

## **BREVE RESUMEN DE ACTIVIDADES DEL AUTOR**

El ingeniero Guillermo, es Ingeniero Eléctrico, contratado por la Consultora Safeg  
Montgomery Watson (UTE) y los trabajos que originaron el informe los realizó para Aguas  
Argentinas

Su función básica es la revisión de ingeniería de detalle (eléctrica, mecánica y de proceso),  
inspección de obras y puesta en marcha de estaciones de bombeo.

Ha trabajado durante 10 años para Flygt Argentina.

Mayores detalles de su Curriiculum Vitae escribir a [gjunco@infovia.com.arg](mailto:gjunco@infovia.com.arg)

**MEDICION DE CAUDAL EN**

**CONDUCTO DE LA TOMA 3**

**RIO NORTE**

**RIO SUR**

**Mayo - 2002**

## INDICE

Conclusiones.....	Pagina 3
Introduccion.....	Pagina 4
Método para la medición de velocidad.....	Pagina 5
Introducción a la teoría de los cuerpos sumergidos.....	Pagina 7
Metodología.....	Pagina 16
Mediciones en el conducto de agua cruda.....	Pagina 18
Mediciones Rio Norte.....	Pagina 20
Mediciones Rio Sur.....	Pagina 20

## 1. Conclusiones

En el cuadro siguiente se muestran los resultados de las mediciones realizadas, con respecto a agua cruda la medicion dio como resultado un caudal el 11% menor. Para los casos de los rios Norte y Sur, se utilizaron los caudalímetros de las estaciones de bombeo respectivas, teniendo en cuenta la demora del agua en llegar a cada elevadora.

Ademas a los caudales de las elevadoras se le restaron 4.000 m<sup>3</sup>/h a cada uno de los rios para descontar la infiltracion.

	Caudalímetros	Mediciones
Agua Cruda	118.050 m <sup>3</sup> /h	105.230 m <sup>3</sup> /h
Rio Norte	*44.200 m <sup>3</sup> /h	42.805 m <sup>3</sup> /h
Rio Sur	*33.800 m <sup>3</sup> /h	33.492 m <sup>3</sup> /h

## **2. Introducción**

El presente informe se genera a partir de la necesidad de medir el caudal de agua cruda que ingresa a la PSM. Para efectuar esta medición existen dos posibilidades, una es medir el caudal o la velocidad en todos los conductos de agua cruda, dentro de la planta y el otro es medir únicamente el caudal o la velocidad o del conducto de la toma 3, que es la que esta en servicio.

Se recorrió el sistema de agua cruda de la Planta, desde las elevadoras hasta los decantores, de elegir la medición de cada uno de los conductos de agua cruda para conocer el caudal ingresante a la Planta, el trabajo implicaría medir todos los conductos de descarga de las bombas elevadoras, las bombas nuevas se pueden medir, mientras que en las viejas y en las KSB no existen las condiciones mínimas necesarias para efectuar medición alguna, la alternativa es medir los conductos en puntos alejados de las elevadoras y para que esto fuese posible sería necesario realizar obras previas para tener acceso a todos los conductos, luego sería necesario utilizar e instalar instrumentos adecuados para medir conductos metálicos y de hormigón de gran diámetro, por ultimo habría que realizar distintas mediciones, con distintos instrumentos para luego tener el total, corresponde mencionar que también se agregaría un error importante a la medición.

Por lo mencionado mas arriba se descarta la medición de los conductos internos de agua cruda, se decide estudiar la alternativa de medir la velocidad del conducto de la toma 3. El conducto de toma tiene un diámetro de 5,40 metros, una longitud de 1500 metros y una profundidad del orden de los 10 metros, con tres cámaras, La toma N° 3 actualmente en servicio, la cámara de enlace sobre la costanera y la cámara N° 1 en la Planta.

### **3. Métodos para medición de velocidad**

De las consultas y revisiones realizadas, podemos seleccionar dos métodos conocidos para la medición de velocidad, en grandes conductos, el primero utilizando un medidor de velocidad electrónico (por ejemplo correntómetros o correderas) y el segundo, utilizando trazadores.

Tanto uno como el otro, son métodos conocidos, cada uno tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Una tercer posibilidad sobre la que existen antecedentes es la utilización flotadores, que son de cuerpos con determinada y distintas con densidades.

#### **3.1 Correntometro**

En este caso según lo indicado en la norma internacional ISO 7145, Determination of flowrate of fluids in closed conduits of circular cross-section. Primera edición 1982-09-15. Los sistemas de medición electrónicos funcionan de manera correcta si se tiene la precaución de verificar que se cumple con todas las recomendaciones de la norma y además instalarlos siguiendo las recomendaciones del fabricante.

En nuestro caso existe un fuerte inconveniente que se puede visualizar en los planos de la Cámara de Enlace y en el plano de la Cámara 1, ambos referidos a la Toma 3. Si se analiza en Plano Conforme a Obra N° 27.548 DO (Plano N° 04), correspondiente a la Ampliación del Establecimiento Potabilizador Gral. San Martín – Torre de Toma N° 3.

Allí se puede ver la Cámara de Enlace y en la planta se identifica, la columna que, divide el conducto y la cámara en dos partes, esta columna esta construida para dividir el vano y sostener las recatas de las dos compuertas, sus dimensiones son importantes, el largo es de 2,0 metros y el ancho es de 0,60 metros. El nivel superior de la cámara de enlace es de 16,105, el nivel inferior del conducto es 0,465 y el nivel superior del conducto es 5,26.

En la Cámara N° 1 y según el Plano Conforme a Obra 27.546 DO (Plano N° 02), correspondiente a la Ampliación del Establecimiento Potabilizador Gral. San Martín – Torre de Toma y Cámara 1, la terminación del conducto corresponde a uno de los tabiques de la cámara, a 90° en otro tabique se encuentra una compuerta que da, hacia un conducto de 4,10 metros de diámetro, el mismo sentido de circulación del agua cruda, el tabique opuesto a la llegada del conducto de 5,40 metros, nos encontramos con dos compuertas similares a las descritas en la cámara de enlace y la correspondiente columna que sirve para alojar las recatas, de manera de dividir el conducto en dos partes iguales.

Los niveles son, el nivel del fondo del conducto es 2,10, el nivel superior del conducto es 7,50 y el nivel de piso es de 16,20 metros.

Dada la arquitectura del sistema no es posible cumplir con lo recomendado, por el fabricante, ni por la norma ISO 7154, que indica en su apartado 4.1 Selección de la Sección de Medición, del ítem 4 Procedimiento, que recomienda: “para tener la mejor oportunidad de un flujo completamente desarrollado, la longitud del tramo recto, aguas arriba de la sección de medición debe ser tan largo como sea posible y en el ultimo de los casos la distancia mínima corresponde a 10 diámetros, aguas debajo de la sección de medición el tramo recto puede ser como mínimo, igual a 5 diámetros, cualquiera sea el tipo de disturbio en la tubería.”

Como surge de la lectura de la norma y de los planos, no es posible reunir las condiciones mínimas para asegurar un resultado adecuado en la medición, con una instalación sencilla, es por ello que se debe eliminar la aplicación de este método.

Debe quedar claro que, si bien no se puede instrumentar el método indicado mas arriba, existe en realidad, una posibilidad de instalar el sensor en el medio del conducto, esto necesitaría de una obra para la instalación del sensor, la obra tendría un grado de complejidad importante tratándose de agua cruda y que el conducto no puede sacarse de servicio, por lo cual se descarta su ejecución por el momento.

### **3.2 Trazadores**

Para esta medición se usara como referencia la ISO 2975/I, Measurement of water flow in closed conduits-Tracer methods-Part I: General. Primera edición- 1974-05-01. Esta es la primera de una serie de normas, que cubre el método de trazadores para la medición de velocidad en conductos cerrados. No se puede pensar en el uso de algún trazador, ya que el volumen del mismo alcanzaría varias toneladas, además del transporte hasta el punto de descarga (la toma) y la descarga del material en la toma.

### **3.3 Flotadores**

#### **3.3.1. Ancla de capa**

Descartados los métodos del correntometro y el de los trazadores, es posible analizar alguna alternativa razonable, una de las posibilidades es la utilización de un ancla de capa.

Este dispositivo esta construido a partir de un aro, rígido o flexible y un troncocono de lona (plástica), es decir un cono al cual le falta la punta, la variación del lugar del corte de la punta del cono, hace que varíe el diámetro del orificio que se genera y esto hace que varíe la velocidad del dispositivo cuando esta siendo utilizado.

El ancla tiene, en la base del cono un diámetro de 60 cm, una altura de 86 cm y el diámetro superior es regable con un diámetro máximo de 22 cm. Este elemento es utilizado para sostener la deriva de un barco pequeño cuando el mismo esta detenido, también es utilizado para pasar cabos por conductos.

El cono es llenado por la corriente de agua, por lo tanto la fuerza de arrastre sobre el mismo lo hace viajar dentro de la vena líquida en el punto de máxima velocidad. Por la existencia del corte en la punta del cono, el ancla no viaja a la misma velocidad que la vena central, esta diferencia se trato de verificar en el campo, para ello se realizaron una serie de pruebas, comenzando primero por el canal de agua decantada, allí se aprecio el comportamiento del dispositivo, luego se probó en el conducto de agua cruda que llega al sector A1.

Luego de realizar las pruebas se comprobó lo siguiente:

1. Para que el ancla de capa funcione de manera correcta, debe tener, al menos una pequeña carga en el cabo que lo sostiene, es decir que el cabo debe tener siempre una tensión. Esto agregaría un error muy difícil de verificar, salvo que se pudiera medir esta tensión y que la misma permaneciera constante durante toda la medición.

2. El inconveniente más importante para poder medir la velocidad del flujo de agua, es la incidencia del cabo en la velocidad del ancla. El empuje que genera el cabo es tan importante que prácticamente iguala al del ancla.

Fueron estos motivos los que determinaron no continuar con la tentativa de medir con el ancla, ya que las mediciones que se pudiesen realizar no serían representativas.

### 3.3.2. Sonda sumergida

Dada la dificultad encontrada para obtener una solución adecuada a la medición de velocidad, surgió la alternativa del uso de flotadores, la cual se analizó y se consultó que expertos que los han utilizado en otras instalaciones, incluidas algunas de Brasil y Perú. En el ítem metodología se desarrolla la sonda utilizada.

## 4. Introducción a la teoría de los cuerpos sumergidos

### 4.1 Introducción

El tema al cual nos enfrentamos fue estudiado ya en la antigua Grecia, uno de los primeros filósofos en analizar estos conceptos fue el matemático griego Arquímedes de Siracusa (287-212-AC) en su tratado “Acerca de los cuerpos flotantes”.

En los dos libros que componen el tratado, examino la flotabilidad de los cuerpos de diversas formas geométricas y enunció el hoy famoso “Principio de flotabilidad” o “Principio de Arquímedes”: “Cuando un cuerpo flota en un líquido su peso es igual al del fluido desplazado y cuando está sumergido, su peso disminuye en esa cantidad”.

Un contemporáneo de Arquímedes, el inventor griego Ctesibio de Alejandría (285-247-AC) también estudió esos conceptos y desarrolló varios dispositivos, como por ejemplo una bomba de aire con válvulas y una bomba hidráulica para incendios.

En nuestra era (20), uno de los primeros en investigar los conceptos de presión hidrostática y atmosférica, fue el ingeniero griego Heron de Alejandría. En su “Pneumatica (obra compuesta de dos libros) describió un dispositivo inventado por él, el famoso sifón.

La presión estática del aire atmosférico y del agua fueron objeto de un estudio más elaborado a partir del siglo XVI. En efecto en 1586, el matemático flamenco Simón Stevinus (Stevin) (1548-1620) publicó el libro “Principios fundamentales del arte de la balanza”, en el cual abordó el estudio de las máquinas simples y de la hidrostática. Así al estudiar, por ejemplo, la distribución del peso ( $P$ ) total de un líquido de densidad ( $\rho$ ) contenido en un recipiente, descubrió que la distribución no depende de su forma, sino solamente de su altura ( $h$ ) y de la base ( $A$ ) del mismo.

### 4.2 Paradoja hidrodinámica

En 1749, el físico francés Jean le Rond d’Alembert (1717-1783), concluyó (y publicó en 1752) su investigación “Ensayo acerca de una nueva Teoría de la Resistencia de los Fluidos”, donde estudia las líneas de flujo de un fluido a través de un objeto, al admitir el hecho que la resistencia de las partículas que constituyen el fluido está relacionada con la pérdida de cantidad de movimiento (movimiento lineal) por los impactos con el cuerpo móvil y que en consecuencia las fuerzas ejercidas en el frente del objeto deben ser

neutralizadas por fuerzas similares en la parte posterior del mismo, demostró el sorprendente resultado de que esa resistencia es nula.

De tal manera que pudo afirmar que “Un cuerpo moviéndose con velocidad uniforme e través de un fluido no experimenta ninguna resistencia por parte del mismo fluido”.

Sin embargo, dado que experimentalmente se observa una turbulencia detrás del objeto, este enunciado fue conocido como la famosa paradoja hidrodinámica o Paradoja de D’Alambert. Para explicitar esta paradoja fue necesario entender como ocurre la turbulencia.

Los primeros resultados fueron obtenidos por el físico e ingeniero inglés Osborne Reynolds (1842-1912) en sus trabajos publicados en las “Philosophical Transactions of the Royal Society of London 174 (1883).

Así después de examinar el flujo de fluidos viscosos concluye que existen dos tipos de flujos: uno laminar a relativamente baja velocidad, en el cual las partículas del fluido se deslizan en capas paralelas a las paredes del conducto (y para el cual vale la ley de velocidades lineales); el otro tipo de flujo es turbulento a velocidades relativamente altas en el cual las partículas ejecutan un movimiento sinuoso aleatorio variando alrededor de una velocidad media.

En el tratamiento matemático que Reynolds hizo para los dos tipos de flujo, demostró que no dependen directamente de la velocidad sino del parámetro  $R=Vd/v$ , donde  $V$  es la velocidad promedio del fluido en el conducto de diámetro  $d$  y  $v$  es la viscosidad cinemática y  $R$  es el número de Reynolds.

Otro paso importante para la comprensión de la turbulencia fue dado por el físico alemán Ludwig Prandtl (1878-1953) en un trabajo publicado en 1904. En ese trabajo mostró que muchos fluidos pueden ser divididos en dos regiones, una próxima a la superficie de los cuerpos sólidos (paredes de ductos o bien cuerpos sumergidos) y otra alejada de esta superficie.

Mostró que en la región próxima existe una capa límite, el efecto de la viscosidad varía de cero (en la superficie sólida) hasta un valor constante en el extremo del espesor de esa delgada capa. El resto del fluido puede ser tratado como un fluido perfecto.

Con todo el ingeniero húngaro Von Karman (1881-1963) introdujo en 1911 el concepto de vórtice para ayudar a entender la turbulencia. Sin embargo como este fenómeno es no lineal permanece como un problema abierto hasta el día de hoy incluso con la teoría de campo. En consecuencia debemos decir que la paradoja de d’Alambert aun es objeto de investigación.

### **4.3 General**

Cuando un cuerpo se mueve a través del fluido en el que está sumergido la fuerza de arrastre, la de sustentación y la capa límite turbulenta son de principal interés.

El arrastre y la sustentación se definen como los componentes de fuerzas ejercidas sobre un cuerpo por el fluido en movimiento paralelo y normal respectivamente, a la velocidad relativa de aproximación. Los esfuerzos de presión y de viscosidad, o ambos actúan sobre

un cuerpo sumergido y contribuyen a las fuerzas resultantes. La acción dinámica del fluido en movimiento es la que desarrolla arrastre y sustentación.

Conceptualmente, las fuerzas de arrastre y de sustentación se pueden calcular de manera directa de manera directa a partir de los esfuerzos de presión y de la viscosidad. El patrón de flujo alrededor del cuerpo sumergido controla la magnitud de las fuerzas de arrastre y de sustentación, mientras que el desarrollo de la capa límite juega un papel importante en la definición de fuerzas. En la mayor parte de los cuerpos, el patrón de flujo completo y de la presión no se pueden calcular con exactitud, mas comúnmente, las fuerzas se calculan con coeficientes de arrastre y de sustentación empíricamente definidas.

Como se menciona antes en 1904 Prandtl desarrollo el concepto de la capa límite, mismo que proporciona un importante enlace entre el flujo de fluido ideal y flujo de fluido real. Para líquidos con viscosidad muy pequeña, el efecto de la fricción interna en un fluido se aprecia solo en una región estrecha que rodea las fronteras del fluido.

Cuando se inicia el movimiento en un fluido de muy pequeña viscosidad, el flujo es esencialmente irrotacional en los primeros instantes. Ya que el fluido en las fronteras tiene velocidad cero, relativa a las fronteras, existe un alto gradiente de velocidad entre la frontera y el flujo. Este gradiente de velocidad en un fluido real fija las fuerzas cortantes cerca de la frontera.

Aquella capa de fluido que ve afectada su velocidad por la fuerza cortante en la frontera se llama “capa límite”. La velocidad en la capa límite se aproxima a la velocidad en el flujo principal asintóticamente. La capa límite es muy delgada en el extremo situado aguas arriba de un cuerpo de forma aerodinámica en reposo o en flujo uniforme. Al moverse esta capa a lo largo del cuerpo, la acción continua del esfuerzo cortante tiende a retardar las partículas fluidas adicionales, causando un aumento en el espesor de la capa límite distante del punto corriente arriba.

El flujo fuera de la capa límite también puede llevar cantidad de movimiento hacia el interior de la capa. Para las fronteras lisas corriente arriba, la capa límite es una capa límite laminar en la que las partículas de los fluidos se mueven en capas lisas.

Al aumentar en espesor, la capa límite laminar se vuelve inestable y finalmente se transforma en una capa límite turbulenta, en la que las partículas del fluido se mueven en trayectorias caprichosas aunque su velocidad se ha reducido por la acción de la viscosidad en la frontera. Cuando la capa límite se ha hecho turbulenta, aun hay una capa muy delgada junto a la frontera que tiene movimiento laminar, llamada subcapa laminar.

#### **4.4 Capa Limite (Turbulenta)**

La ecuación de cantidad de movimiento sirve para determinar el crecimiento de la capa límite turbulenta y los esfuerzos cortantes sobre una placa lisa, de manera análoga al estudio de la capa límite laminar. La ley universal de distribución de velocidad para tubos lisos es:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{Y u_x}{\gamma} + A$$

donde  
u = velocidad

$u_*$  = velocidad del esfuerzo cortante

$A = N - (1/\chi) \ln N$ , se encuentra experimentalmente graficando  $u/u_*$  contra  $\ln(Yu_*/\gamma)$ , esta ley proporciona la mejor base, pero los cálculos son complicados. Una forma sencilla es usar la ley de la potencia a la un séptimo, de Prandtl. Esta ley es

$$(u/u_{max}) = (Y/r_0)^{1/7}$$

donde  $Y$ , se mide desde la pared del tubo y  $r_0$  es el radio del tubo. Si se lo aplica a placa planas:

$$F = \frac{u}{U} = \left(\frac{Y}{\delta}\right)^{1/7} = \eta^{1/7}$$

y

$$\tau_0 = 0,0228\rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta}\right)^{1/4}$$

donde  $\tau_0$  es el esfuerzo cortante en la pared de una placa lisa con una capa limite turbulenta, esta ecuación se obtiene de las siguientes expresiones para tubos:

$$\tau_0 = \rho \cdot f \cdot V^2 / 8$$

$$f = 0,316 / R^{1/4}$$

que corresponde a la ecuacion de Blasius

$$R = V 2r_0 / \mu$$

$$V = u_m / 1,235$$

Para transferir a la placa plana

$$r_0 \approx \delta, u_m \approx U$$

El método usado para calcular la capa limite laminar da

$$\tau_0 = \rho U^2 \frac{d\delta}{dx} \int_0^1 (1-\eta^{1/7}) \eta^{1/7} d\eta = \frac{7}{72} \rho U^2 \frac{d\delta}{dx}$$

y

$$\tau_0 = 0,0228\rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta}\right)^{1/4}$$

donde  $\tau_0$  es el esfuerzo cortante en la pared de una placa lisa con una capa limite turbulenta, esta ecuación se obtiene de las siguientes expresiones para tubos:

$$\tau_0 = \rho \cdot f \cdot V^2 / 8$$

$$f = 0,316 / R^{1/4}$$

que corresponde a la ecuacion de Blasius

$$R = V 2r_0 / \mu$$

$$V = u_m / 1,235$$

Para transferir a la placa plana

$$r_0 \approx \delta, u_m \approx U$$

El método usado para calcular la capa limite laminar da

$$\tau_0 = \rho U^2 \frac{d\delta}{dx} \int_0^1 (1-\eta^{1/7})^n d\eta = \frac{7}{72} \rho U^2 \frac{d\delta}{dx}$$

El arrastre por unidad de ancho en un lado de la placa es (Ley de arrastre)

$$\text{Arrastre} = \int_0^l \tau_0 dx = 0,036 \cdot \rho U^2 l \left( \frac{v}{Ul} \right)^{1/5} = \frac{0,036 \rho U^2 l}{\Re_l^{1/5}}$$

en términos del coeficiente de arrastre

$$C_D = 0,072 \Re_l^{-1/5}$$

donde  $\Re_l$  es el número de Reynolds basado en la longitud de la placa.

Las ecuaciones son válidas solo para los límites donde la ecuación de la resistencia de Blasius sea válida.

Para números de Reynolds mayores en flujo por tubos lisos, el exponente en la ley de distribución de velocidad se reduce. Para números de Reynolds = 400.000,  $n = 1/8$  y para números de Reynolds > 400.000,  $n = 1/10$ . La ley del arrastre, es válida para los siguientes límites

$$5 \times 10^5 \leq \Re_l \leq 10^7$$

La experimentación demuestra que el coeficiente de arrastre es ligeramente mayor que el indicado más arriba

$$C_D = 0,074 \cdot \Re_l^{-1/5}$$

La capa límite en realidad es laminar en la sección de la placa situada aguas arriba. Prandtl restó el arrastre de la ecuación para el extremo corriente arriba de la placa hasta el número crítico de Reynolds y después agregó el arrastre dado por la ecuación laminar para esta porción de la placa, produciendo

$$C_D = 0,074 \cdot \Re_l^{-1/5} - \frac{1700}{\Re_l} \quad 5 \times 10^5 \leq \Re_l \leq 10^7$$

El uso de la distribución de velocidad logarítmica produce:

$$C_D = \frac{0,455}{(\log \Re_l)^{2,58}} \quad 10^6 \leq \Re_l \leq 10^9$$

Estelas

La capa límite a lo largo de una placa continua creciendo en la dirección corriente abajo, sin importar la longitud de la misma, cuando el gradiente de la presión permanece igual a cero. Con la presión decreciendo en la dirección corriente abajo, como en una sección cónica de reducción, la capa límite tiende a reducirse en espesor. Para gradientes de presión adversa, es decir, con la presión aumentando en la dirección corriente abajo, la capa límite se ensancha rápidamente.

El gradiente adverso y el corte en la frontera disminuyen el momento en la capa límite y si ambos actúan sobre una distancia suficiente, causan que la capa límite se separe. Este fenómeno se llama separación. Esta región corriente debajo de la línea de corriente que se separa de la frontera se conoce como estela.

El efecto de la separación es disminuir la cantidad neta de trabajo de flujo que se puede realizar por un elemento de fluido en el fluido circunvecino a expensas de su energía cinética, con el resultado neto que la recuperación de la presión es incompleta y que las pérdidas de flujo (arrastre) aumentan.

La siguiente figura ilustra casos reales de flujo con un gradiente de presión adverso muy pequeño que causa un crecimiento de la capa límite y el segundo con un ángulo difusor grande, que causa separación hacia atrás mas cerca de las fronteras.

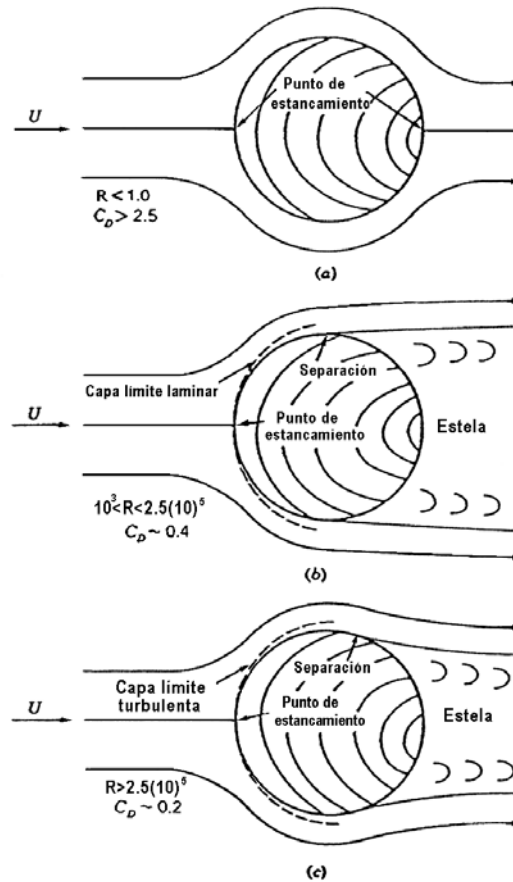


Figura 1

#### 4.5 Arrastre sobre cuerpos sumergidos

El arrastre es el componente de fuerza paralelo a la velocidad relativa de aproximación ejercido sobre el cuerpo por el fluido en movimiento. El coeficiente de arrastre se define por :

$$\text{Arrastre} = C_D A \rho \frac{U^2}{2}$$

donde A es el área proyectada por el cuerpo en un plano normal al flujo.

Las curvas de arrastre para esferas y discos circulares se muestran en la figura siguiente

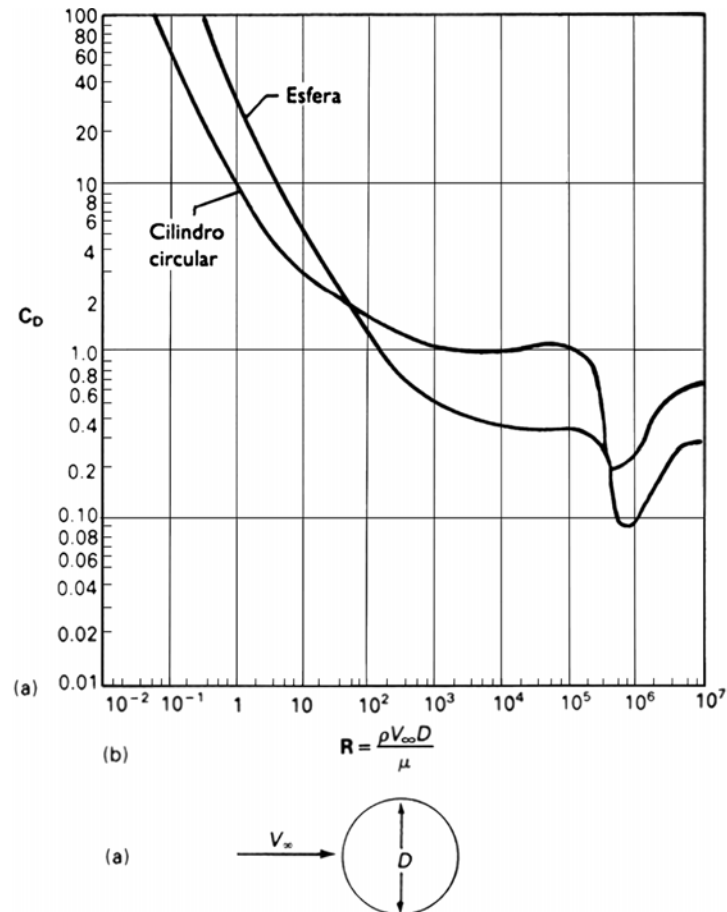


Figura 2

El flujo de un fluido incompresible viscoso alrededor de una esfera ha sido resuelto por Stokes, para valores de Numero de Reynolds debajo de 1. Stokes encontró que el arrastre es

$$\text{Arrastre} = 3\pi \cdot D \cdot \mu \cdot U$$

La figura 2 muestra el cambio del flujo en la capa limite de laminar a turbulento como es evidente por la caída brusca en el coeficiente de arrastre. El numero de Reynolds exacto para el cambio brusco depende de la suavidad de la esfera y la turbulencia en la corriente del fluido.

Cuando mayor sea la turbulencia de la corriente del fluido, menor será el numero de Reynolds para el cambio en el punto de separación. La velocidad de caída libre de una esfera a través de un fluido que de otra manera estaría en reposo, es una cantidad que es útil en varias aplicaciones de ingeniería. Involucra la combinación de la fuerza de arrastre, la fuerza de flotación y la fuerza gravitacional una vez que el cuerpo en caída deja acelerarse a través de un fluido con propiedades constantes.

Si se supone que la ley de Stokes es valida, la fuerza de flotación, mas la fuerza de arrastre es igual a la fuerza gravitacional, lo que produce

$$\frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \gamma + 3\pi D \mu U = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \gamma_s$$

donde  $\gamma$  es el peso especifico del liquido y  $\gamma_s$ , es el peso especifico de la esfera. Entonces si se resuelve por U, se tiene la velocidad terminal

$$U = \frac{D^2}{18\mu}(\gamma_s - \gamma)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad.

Si la ley de Stokes no fuera aplicable debido a un número de Reynolds grande, el mismo principio es aplicable pero se requiere un procedimiento de prueba usando  $C_D$  de la figura 2

Los datos experimentales referentes a la fuerza de rozamiento ejercida sobre una partícula esférica por un fluido en movimiento pueden expresarse convenientemente sobre una amplia gama de velocidades, de manera similar a la utilizada para el flujo en una tubería, representando el grupo adimensional  $R'/\rho u^2$  (factor de fricción) frente a un número de Reynolds modificado  $Re'$ , en el que la dimensión lineal es el diámetro de la esfera y la velocidad es la relativa entre el fluido y la partícula.

$Re'$  es entonces igual a  $ud\rho/\mu$  donde  $\rho$  es la densidad del fluido.  $R'$  es la fuerza ejercida sobre la unidad de área de la partícula proyectada sobre un plano que forma un ángulo recto con la dirección de su movimiento: esta área es por tanto igual a la de un círculo del mismo diámetro que la esfera.

Se dan valores de  $R'/\rho u^2$  en función de  $Re'$ , y se han representado  $\log(R'/\rho u^2)$  frente a  $\log Re'$ . La curva puede dividirse en cuatro regiones de la siguiente manera:

Región (a) ( $10^{-4} < Re' < 0,2$ ) La ecuación de la curva se aproxima a

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3\gamma + 3\pi D\mu U = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3\gamma_s$$

donde  $\gamma$  es el peso específico del líquido y  $\gamma_s$  es el peso específico de la esfera. Entonces si se resuelve por  $U$ , se tiene la velocidad terminal

$$U = \frac{D^2}{18\mu}(\gamma_s - \gamma)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad. Si la ley de Stokes no fuera aplicable debido a un número de Reynolds grande, el mismo principio es aplicable pero se requiere un procedimiento de prueba usando  $C_D$  de la figura 2

Los datos experimentales referentes a la fuerza de rozamiento ejercida sobre una partícula esférica por un fluido en movimiento pueden expresarse convenientemente sobre una amplia gama de velocidades, de manera similar a la utilizada para el flujo en una tubería, representando el grupo adimensional  $R'/\rho u^2$  (factor de fricción) frente a un número de Reynolds modificado  $Re'$ , en el que la dimensión lineal es el diámetro de la esfera y la velocidad es la relativa entre el fluido y la partícula.

$Re'$  es entonces igual a  $ud\rho/\mu$  donde  $\rho$  es la densidad del fluido.  $R'$  es la fuerza ejercida sobre la unidad de área de la partícula proyectada sobre un plano que forma un ángulo recto con la dirección de su movimiento: esta área es por tanto igual a la de un círculo del mismo diámetro que la esfera.

Se dan valores de  $R'/\rho u^2$  en función de  $Re'$ , y se han representado  $\log(R'/\rho u^2)$  frente a  $\log Re'$ . La curva puede dividirse en cuatro regiones de la siguiente manera:

Región (a) ( $10^{-4} < Re' < 0,2$ ) La ecuación de la curva se aproxima a

$$\Phi = \frac{12}{Re'}$$

es decir, en escala logarítmica, es una línea recta de pendiente -1.

114

Movimiento de partículas en un fluido

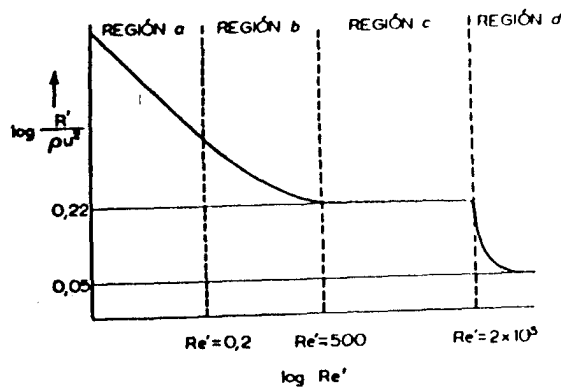


FIG. 3.4. Relación entre  $R'/\rho u^2$  y  $Re'$  para una esfera.

Stokes  $Fr = 3\pi\mu du^2$

Región (b) ( $0,2 < Re' < 500-1000$ )

GOLDSTEIN ha dado una serie de infinitos términos para la fuerza de rozamiento sobre una partícula esférica. Puede ser utilizada para valores de  $Re'$  de hasta 2, pero a valores más altos la serie converge muy lentamente o es divergente. La relación es

$$\Phi = \frac{12}{Re'} \{1 + 3/16 Re' - 19/1280 Re'^2 + 71/20480 Re'^3 \dots\dots\dots\}$$

Osseen toma únicamente los dos primeros términos de la serie de  $Re'$  y su fórmula puede ser utilizada para valores de  $Re'$  de hasta 0.1 Por tanto, tiene la forma

$$\Phi = \frac{12}{Re'} \{1 + 3/16 Re'\}$$

La pendiente de la curva cambia gradualmente desde -1 hasta 0 al variar  $Re'$  desde 0,2 hasta 500 o 1000. SCHILLER y NAUMANN han dado la siguiente ecuación empírica para cubrir esta zona

$$\Phi = \frac{12}{Re'} \{1 + 0.15 Re'^{0.687}\} \Rightarrow Fr = 3\pi\mu du(1 - 0.15 Re'^{0.687})$$

Otras fórmulas aproximadas han sido sugeridas para la fuerza de rozamiento en esta región. ALLEN ha considerado que la curva tiene una pendiente medio de -1/2, sugiriendo que los datos pueden representarse tornando  $R'/\rho u^2$  proporcional a  $Re'^{-1/2}$ .

Región (c) El valor de  $R'/\rho u^2$  permanece aproximadamente constante e igual a 0,22 para los valores de  $Re'$  comprendidos aproximadamente entre 500-1000 y  $2 \times 10^5$  Los datos pueden representarse por

$$Fr = 0.22 \pi \rho d^2 u^2 / 4$$

Región (d) Cuando  $Re'$  supera el valor de aproximadamente  $2 \times 10^5$  el flujo en la capa límite cambia desde laminar a turbulento y la separación tiene lugar cerca de la parte posterior de la esfera; la fuerza de rozamiento disminuye considerablemente y entonces ( $R'/\rho u^2 = 0,05$ )

$$Fr = 0.0125 \pi \rho d^2 u^2$$

La curva mostrada en la figura es en realidad continua y su división en cuatro regiones es únicamente un método conveniente mediante el cual puede asignársela una serie de ecuaciones.

En la región (a) se supone que todo el rozamiento es debido únicamente al rozamiento de pared, y en las regiones (c) y (d) se supone que únicamente actúa el rozamiento de forma.

En realidad sobre toda la gama de números de Reynolds se encuentran presentes tanto el rozamiento de pared como el de forma, en una cierta magnitud, pero ambos son de magnitud comparable únicamente en la región (b) La división exacta entre las regiones (a) y (b) y entre las (b) y (c) depende de los límites en los que se suponga que los rozamientos de forma y de pared, respectivamente, adquieren importancia.

Así, el límite superior de la ecuación  $\Phi = \frac{12}{Re'}$  es establecido por la precisión requerida.

Como esta es una ecuación de fácil utilización, se aplica a menudo para números de Reynolds de hasta 2, pero los valores calculados de  $R'/\rho u^2$  son entonces mucho menos precisos para esta zona ampliada. Aunque  $R'/\rho u^2$  es constante e igual a 0,22 en la región (c), se ha registrado a menudo que este valor aumenta gradualmente al elevarse el número de Reynolds, pero la precisión que pueden aplicarse estas relaciones raras veces justifica refinamientos de esta índole.

Para determinar el arrastre en un flujo de gas a alta velocidad, los efectos de la compresibilidad expresados por el número de Mach, son más importantes que los números de Reynolds.

El número de Mach se define como la razón de la velocidad del fluido a la velocidad del sonido en el medio fluido. Cuando el flujo se encuentra a la velocidad crítica  $C$ , tiene la misma velocidad del sonido, de manera que las pequeñas ondas de presión no pueden viajar corriente arriba, luego esta condición es  $M=1$ . Cuando  $M$  es mayor que la unidad, el flujo es supersónico y cuando  $M$  es menor que la unidad es subsónico.

El arrastre sobre los cuerpos varía en gran medida con el número de Mach y se vuelve relativamente independiente del número de Reynolds cuando los efectos de la compresibilidad se vuelven importantes.

## 5. Metodología

Para realizar las pruebas en campo, se construyeron varios cuerpos esféricos de densidad similar al agua. Este cuerpo debería cumplir con dos preceptos, uno viajar a la velocidad del flujo del conducto de toma y dos en caso que llegara a las bombas elevadoras no debería afectarlas.

El dispositivo se construyó a partir de una esfera de 10 cm de diámetro construida en "Telgopor", la cual se cargó con pequeños elementos metálicos distribuidos de manera uniforme hasta alcanzar el equivalente al peso del volumen de agua desalojado. El resultado fue que la esfera utilizada tiene un peso total de 598,4 gramos, mientras que el volumen de agua desalojado por la misma esfera tiene un peso de 598,9 gramos, con una densidad para 20° de 998,2 Kg/m<sup>3</sup>.

Las esferas se construyeron de manera tal que la superficie fuese rugosa, tal como una pelota de golf, esto se busco para inducir una temprana transición a la capa limite turbulenta antes de ocurrir la separación, la transferencia de gran cantidad de movimiento en la capa limite turbulenta retrasaría la separación, de manera que la estela es reducida sustancialmente, dando como resultado un arrastre total sobre la esfera menor a la mitad del que ocurriría en la misma esfera lisa.

Una vez construido, se verifico su comportamiento en recipientes de distinto tamaño, la comparación se realizo con tinta de manera de apreciar que ante distintos impulsos, el agua y la esfera tenían el mismo comportamiento. Por ultimo se probó la esfera en la cámara de carga de las elevadoras “Alemanas” para verificar que la misma, con la turbulencia existente en la cámara buscaría la corriente de mayor velocidad.

La idea central del uso de la esfera seria medir la velocidad del flujo en el conducto ya que la misma viajaría a la misma velocidad del flujo. El obstáculo a superar era que si la esfera viajaba sumergida como se quería, seria muy difícil determinar su paso en las cámara existentes en PSM, por otro lado como se menciona antes, existía la posibilidad que la esfera llegara a las bombas elevadoras, si bien al momento de construir la esfera se tuvo en cuenta esto ultimo, de todos modos era un riesgo que no se debía correr.

Entonces se decidió que la medición de la distancia recorrida por la esfera, se realizaría manteniendo la esfera vinculada por medio de un hilo de pescar de 0,7 mm de diámetro. Luego de realizar las primeras pruebas se modifico el soporte del hilo de pescar, pasando a utilizar un reel de pesca, el cual nos entregaba un menor rozamiento y un error menor al medir la distancia y al medir el tiempo.

Por lo tanto el esquema final fue lanzar la esfera reteniéndola con el hilo hasta que se ubicara unos 5 metros dentro del conducto (esto permitía superar el tabique divisor en la cámara por tres metros) y luego soltar 20 metros de hilo cuidando que este no quedara retenido en ningún punto de su longitud, en esa situación se tomo el tiempo de cada recorrido. Esta metodología provocara un aumento en el error comparado con la medición de un tramo mas largo, pero resulta un procedimiento mas seguro

## **5.1 Fuerzas actuantes**

Construida la esfera y establecido el método de medición se deben analizar las fuerzas que actuaran sobre el sólido, de manera que sea posible comprender el resultado de la medición. En definitiva la pregunta es a que velocidad viajara la esfera respecto del agua.

Primero se tendrá una fuerza de empuje sobre la esfera, este empuje dependara de la velocidad del flujo y de la superficie de la esfera. Si la esfera tiende a reducir su velocidad respecto al flujo entonces aparecerá una fuerza de arrastre (estela hacia delante), que se sumara a la fuerza de empuje por lo tanto la esfera aumentara su velocidad, si la velocidad de la esfera aumenta tanto que supere la velocidad del flujo, entonces la fuerza de arrastre cambiara su sentido (estela hacia atrás), que se restara a la fuerza de empuje, disminuyendo la velocidad de la esfera. Por lo tanto es de esperar que el sólido viaje a la misma velocidad del flujo.

## 6. Mediciones en conducto de agua cruda

Los datos de la mediciones efectuada se vuelcan en el siguiente cuadro:

		14-05-02		
Referencias	Unidades	Hora	Longitud	Tiempo
Unidades			(metros)	(segundos)
Medicion 1		11:45	20,00 +/- 0,50	20
Medicion 2		11:55	20,00 +/- 0,50	18
Medicion 3		12:06	20,00 +/- 0,50	16
Medicion 4		12,14	20,00 +/- 0,50	17
Valor Medio				17,75
Varianza				2,92
Desviacion estándar			0,8	1,71
Incertidumbre combinada			0,06	
Nivel confianza (k)			2	
Determinacion de tp			2,05	
Incertidumbre expandida			0,13	
Velocidad	m/s		1,13	
Resultado	m/s	1,13	+ / -	0,13
Velocidad minima	m/s		1,00	
Velocidad maxima	m/s		1,26	
Velocidad considerada	m/s		1,26	
Caudal	m <sup>3</sup> /h		103.594,97	
Caudalímetros PSM	m <sup>3</sup> /h		119.700,00	
Error con la lectura	%		15,55	
Nivel de Rio	Cota		11,78	

Cuadro 1

		14-05-02		
Referencias	Unid.	Hora	Longitud	Tiempo
Unidades			(metros)	(segundos)
Medicion 1		16:55	(20,00 +/- 0,50)	15
Medicion 2		17:04	(20,00 +/- 0,50)	19
Medicion 3		17:16	(20,00 +/- 0,50)	21
Medicion 4		17:28	(20,00 +/- 0,50)	22
Valor Medio				19,25
Varianza				9,58
Desviacion estándar			0,8	3,10
Incertidumbre combinada			0,13	
Nivel confianza (k)			2	
Determinacion de tp			2,05	
Incertidumbre expandida			0,26	
Velocidad	m/s		1,04	
Resultado	m/s	1,04	+ / -	0,26
Velocidad minima	m/s		0,78	
Velocidad maxima	m/s		1,30	
Velocidad considerada	m/s		1,30	
Caudal	m <sup>3</sup> /h		106.865,50	
Caudalímetros PSM	m <sup>3</sup> /h		116.400,00	
Error con la lectura	%		8,92	
Nivel de Rio	Cota		11,37	

Cuadro 2

Los valores del cuadro 1, corresponden a la mañana, mientras que los del cuadro 2 fueron tomados por la tarde. El promedio de ambos caudales resulta de 105.230 m<sup>3</sup>/h. Si se toma el promedio de la lectura de los caudalímetros el error entre una medición y otra es del 11%.

## 7. Mediciones en el Rio Norte

Con la misma metodología que la utilizada en el conducto de agua cruda se realizó la medición del Rio Norte, un conducto de 4,6 metros de diámetro, los resultados fueron:

		28-05-2002--Rio Norte		
Referencias	Unid.	Hora	Longitud	Tiempo
Unidades			(metros)	(segundos)
Medicion 1		09:00	(20,00 +/- 0,50)	32
Medicion 2		09:15	(20,00 +/- 0,50)	28
Medicion 3		09:25	(20,00 +/- 0,50)	29
Valor Medio				29,67
Varianza				4,33
Desviacion estándar			0,8	2,08
Incertidumbre combinada			0,02	
Nivel confianza (k)			2	
Determinacion de tp			2,05	
Incertidumbre expandida			0,04	
Velocidad	m/s		0,67	
Resultado	m/s	0,67	+ / -	0,04
Velocidad minima	m/s		0,63	
Velocidad maxima	m/s		0,72	
Velocidad considerada	m/s		0,72	
Caudal	m <sup>3</sup> /h			42.805,02

## 8. Mediciones en el Rio Sur

De la misma manera que se realizó la medición en el conducto de toma y en el Rio Norte, se completo la medición en el Rio Sur, que también es un conducto de 4,60 metros de diámetro, el resultado de la medición es:

		28-05-2002--Rio Sur		
Referencias	Unid.	Hora	Longitud	Tiempo
Unidades			(metros)	(segundos)
Medicion 1		10:35	(20,00 +/- 0,50)	37
Medicion 2		10:45	(20,00 +/- 0,50)	37
Medicion 3		10:55	(20,00 +/- 0,50)	41
Valor Medio				38,33
Varianza				5,33
Desviacion estándar			0,8	2,31
Incertidumbre combinada			0,01	
Nivel confianza (k)			2	
Determinacion de tp			2,05	
Incertidumbre expandida			0,02	
Velocidad	m/s		0,52	
Resultado	m/s	0,52	+ / -	0,02
Velocidad minima	m/s		0,50	
Velocidad maxima	m/s		0,54	
Velocidad considerada	m/s		0,54	
Caudal	m <sup>3</sup> /h			32.492,71

En las conclusiones se pueden apreciar la relación entre los valores medidos y los estimados con los caudalímetros de las elevadoras respectivas.

## FOTOGRAFIAS DE LA SONDA

La sonda esta construida sobre una esfera de "Telgopor", un eje de acero y un soporte de alambre sobre el cual veras arrollado el hilo de pescar de 0,7 mm de diámetro. Sobre la esfera que tiene 10 cm de diámetro, use como contrapeso tornillos "Parker" de 50 mm de largo, todo esta recubierto con una malla de látex que le da el color marrón claro. En el informe se indica que el peso para su volumen es el mismo que el del agua.



Foto N° 1



Foto N° 1

