

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL SUMERGIMIENTO CRÍTICO DE LA TUBERÍA DE SUCCIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO, PARA EVITAR LA FORMACIÓN DE VÓRTICES EN RESERVORIOS CON LÍQUIDO EN REPOSO

JUAN CARLOS YAMARTE COBO^{1,2}, *LUIS ALEJANDRO ORTEGA FERNÁNDEZ*^{2,3},
*RAMÓN ENRIQUE CADENAS VILLANUEVA*⁴

¹ Universidad del Zulia. e-mail: jcyamarte@gmail.com

² Universidad Rafael Urdaneta

³ Universidad Rafael Belloso Chacín. e-mail: luisortega026@gmail.com

⁴ Universidad del Zulia

Recibido: marzo 2015

Aprobado para publicación: junio 2016

RESUMEN

La metodología utilizada en el diseño de esta investigación fue del tipo descriptiva y correlacional, usando la observación directa del fenómeno, para registrar e interpretar las diferentes profundidades en las cuales se encontraba sumergida la tubería de succión y estudiar experimentalmente los efectos de los cambios en las variables, caudal, diámetro y posición de la tubería de succión, sobre el sumergimiento crítico en sistemas de bombeo colocados en reservorios con líquido en reposo relativo, hasta la inminencia del vórtice. Se buscó una correlación entre las variables independientes y el nivel de agua por encima del tope de la tubería de succión, realizando una serie de ensayos con un dispositivo generador de vórtices, acoplado a un sistema de bombeo en recirculación, diseñado y construido para simular diferentes condiciones operacionales para distintos arreglos de toma, haciendo cambios discretos en los diámetros y posiciones de la tubería, así como en el flujo de succión. Los datos experimentales fueron analizados y representados gráficamente, deduciendo una ecuación predictora adimensional, con el sumergimiento relativo como una función de los números de Reynolds y Froude, la cual permite la determinación del sumergimiento crítico para distintos fluidos y/o diferentes condiciones operacionales. Esto condujo a la conclusión de que existe una fuerte dependencia funcional del sumergimiento crítico respecto al caudal y al diámetro interno de la tubería de succión. Esta relación entre el sumergimiento crítico y el caudal de bombeo es directa, y entre el sumergimiento crítico y el diámetro interno de la tubería de succión es inversa.

Palabras clave: sumergimiento crítico, vórtice, succión, bombeo, parámetro adimensional

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CRITICAL SUBMERGENCE SUCTION PUMP SYSTEMS TO PREVENT THE VORTEX FORMATION IN RESERVOIRS WITH LIQUID AT REST

ABSTRACT

The methodology used in the design of this research was descriptive and correlational, using direct observation of the phenomenon, to record and interpret the different depths to which the suction pipe was submerged and to experimentally study the effects of changes in the variables; flow, diameter and position of the suction pipe on the critical submergence in pumping systems placed in reservoirs with liquid at relative rest to the imminence of the vortex. A correlation between the independent variables and the water level above the top of the suction pipe was sought, performing a series of tests with a vortices generator device, coupled to a pumping system in recirculation, designed and built to simulate different operating conditions for various arrangements, making discrete changes in the diameters and positions of the pipe, as well as the suction flow. The experimental data were analyzed and represented graphically, deducing a dimensionless predictive equation, with the relative submergence as a function of the Reynolds and Froude numbers, which allows the determination of the critical submergence for different fluids and/or different operating conditions. This led to the conclusion that there is a strong functional dependence of the critical submergence respect to the flow and the internal diameter of the suction pipe. This relationship between the critical submergence and the pump flow is direct, and between the critical submergence and the inner diameter of the suction pipe is reverse.

Keywords: critical submergence, vortex, suction, pumping, dimensionless parameter

INTRODUCCIÓN

Los ensayos para determinar experimentalmente la profundidad mínima, a la cual se inicia el fenómeno vórtice, para varios diámetros de tuberías, con diferentes caudales y distintas posiciones de las tuberías succionando desde un reservorio con agua en reposo relativo, permitió determinar el comportamiento operacional de los sistemas de bombeo bajo estas condiciones y establecer la influencia de las variables principales; diámetro interno de la tubería de succión y caudal sobre la inducción del vórtice y su severidad. Además, permitió el desarrollo de una ecuación a dimensional para la predicción del sumergimiento crítico en diferentes sistemas y aplicaciones de ingeniería, para distintos fluidos y diferentes condiciones de proceso, lo cual viene a complementar un conjunto de conocimientos que junto con las recomendaciones generales, los códigos y normas aplicables, las especificaciones particulares de cada fabricante y el cálculo del NPSH disponible versus el requerido, mejoren el diseño de las obras de toma y la configuración de la descarga de tanques y recipientes, evitando la aparición del fenómeno vórtice durante la vida útil de los sistemas de bombeo, así como emitir recomendaciones operacionales o modificaciones a instalaciones existentes, a fin de minimizar su impacto en la producción, en los costos de mantenimiento de equipos, tuberías y en las estructuras asociadas.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Obtener una ecuación predictiva adimensional aplicable a distintos fluidos y/o parámetros operacionales, realizando ensayos con varios diámetros de tubería de succión (1", 2", 3" y 4"), diferentes caudales (dentro del rango de funcionamiento del equipo de bombeo utilizado) y una de las dos posibles posiciones de la tubería de succión (vertical por el fondo y horizontal lateral), configuradas en el dispositivo generador de vórtices, el cual fue diseñado y construido para facilitar la determinación del sumergimiento crítico, usando agua limpia como fluido de trabajo y manteniendo el líquido en el reservorio en reposo relativo durante los ensayos.

METODOLOGÍA

Para realizar los ensayos se ensambló un sistema de bombeo en recirculación, conformado por varias tuberías, conectadas a un dispositivo que permitía seleccionar uno de entre los cuatro diferentes diámetros de tubería de succión, colocarla en posición vertical simulando una configuración de succión por el fondo y acoplarlo a la succión de una bomba centrífuga autocebante de 1,5 hp con conexiones de

2x1-1/2 pulgadas, un manómetro y una válvula de obturación en la línea de descarga, a fin de modificar a voluntad el caudal, manipulando en forma controlada estas variables y así obtener un conjunto de valores representativos. Este sistema fue colocado en un reservorio con agua en reposo, representado por una piscina de 12x6 m, con una pendiente que va desde los 80 cm en su parte más baja, hasta 190 cm en la zona más profunda, a fin de aprovechar la profundidad variable del fondo de la piscina y así disponer de un sumergimiento ajustable para el dispositivo generador de vórtices como se muestra en la Figura 1.

Se calibró el sistema de bombeo, trazando la curva correspondiente a cada diámetro de tubería. Estas curvas permitieron verificar que cada punto de ensayo estuviera dentro del rango de operación del equipo. Posteriormente fue seleccionado el diámetro de la tubería a ensayar y se configuró el dispositivo para que la tubería estuviese en posición vertical succionando por el fondo. Luego, para cada punto de ensayo, se ajustaba un caudal y se iniciaba el experimento partiendo de una profundidad predeterminada relativamente grande, ejecutando aproximaciones sucesivas al sumergimiento crítico al reducir en forma discreta, progresiva y gradual la profundidad, mientras que el resto de las variables eran mantenidas fijas.

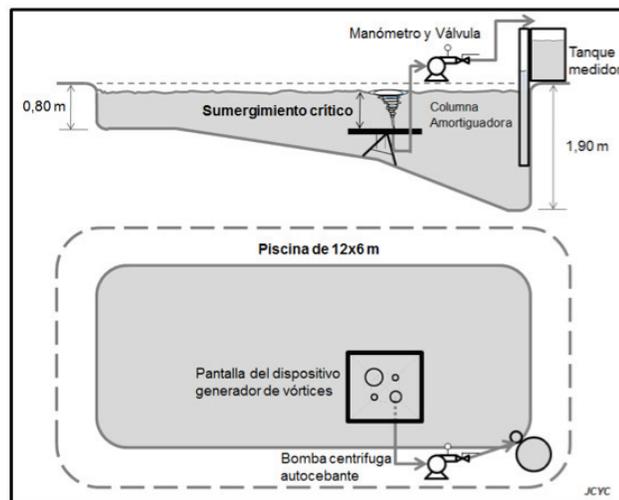


Figura 1. Esquema usado en los ensayos

Considerando que el tipo y diseño de la investigación fue correlacional experimental y que la metodología para el reconocimiento de cada punto de ensayo fue la observación directa del fenómeno, el sistema permanecía en funcionamiento en flujo estable y estado estable durante un tiempo determinado hasta observar la aparición de la condición visual crítica (fase tipo I), mostrada en la Figura 2, la cual es caracterizada por una rotación local y una

leve depresión o concavidad en el espejo de agua (Dimple), y que aparecía sobre la superficie del líquido, alineada verticalmente con la entrada de la tubería seleccionada y mostrando líneas de corriente circulares concéntricas, girando hacia la derecha (sitio de ensayo ubicado en la latitud norte), como fase previa a la formación del vórtice e indicativo de la inminencia del vórtice plenamente desarrollado mostrado en la Figura 3.

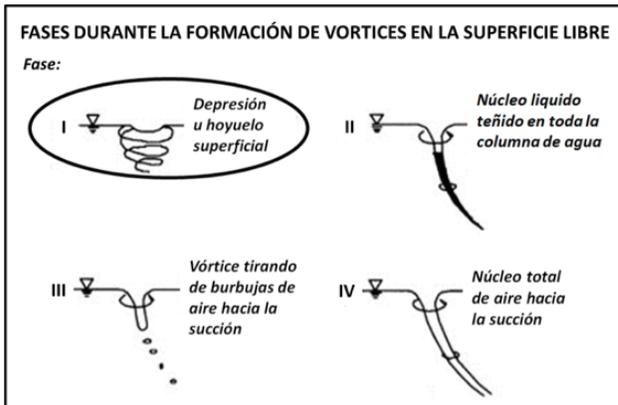


Figura 2. Fases durante la formación del vórtice
Condición crítica seleccionada (Fase I)



Figura 3. Vórtice completamente desarrollado (Fase IV)
Tubería: $\phi=4''$

La información de las condiciones operacionales fue vaciada en un formato de recolección de datos donde se registró la posición y el diámetro de la tubería ensayada, los diferentes caudales, junto con las correspondientes profundidades a las cuales se encontraba la tubería de succión cuando se presentó la condición crítica (Fase I), indicadora del inicio de la formación del vórtice para cada punto de ensayo. Fueron ajustadas curvas a los datos registrados durante las pruebas para cada uno de los diámetros y caudales ensayados, los

cuales muestran una tendencia hacia el incremento del sumergimiento que está directamente relacionado con el caudal o la velocidad de flujo e inversamente relacionado con los diámetros de la tubería de succión del sistema de bombeo, como se observa en la Figura 4.

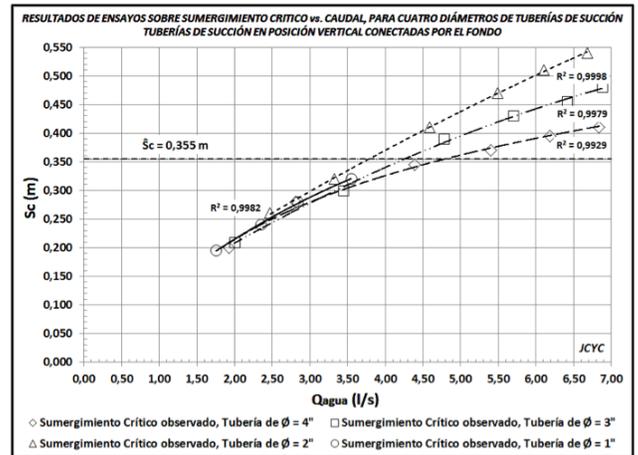


Figura 4. Sumergimiento crítico vs. caudal para tuberías con diámetros de: 4'', 3'', 2'' y 1''

Las curvas ajustadas a los datos originales mostradas en la Figura 4, para cada diámetro de tubería ensayada, presentan unos coeficientes de determinación [$R^2(4'')=0,9929$; $R^2(3'')=0,9979$; $R^2(2'')=0,9998$ y $R^2(1'')=0,9982$], los cuales indican una correlación bien definida y una baja dispersión de los datos alrededor del lugar geométrico que describen los puntos de ensayo. Esto es un indicador de confiabilidad de la información recolectada. Adicionalmente, se muestra que durante los ensayos, para la tubería de una pulgada de diámetro ($\phi=1''$), solo fue posible la adquisición de unos pocos datos a caudales bajos, debido al fenómeno de cavitación que se presentó durante los ensayos para mayores flujos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La lista de las variables dimensionales dependientes e independientes más relevantes en el fenómeno, considerando las principales fuerzas que intervienen (viscosas, inerciales, gravitacionales y de tensión superficial, entre otras), adicional a los parámetros, características geométricas de la instalación, tales como diámetro interno de tuberías, distancias al fondo y a paredes laterales del reservorio respecto a la ubicación del dispositivo generador de vórtices, entre otras, además de las propiedades del fluido usado en este estudio, son mostradas en la siguiente relación funcional general (1)

$$S_c = f(V_s, D_i, l_d, l_i, b, \Gamma, \rho, \mu, \sigma, g, a_c) \quad (1)$$

Donde:

S_c (m): Sumergimiento crítico o mínimo.

V_s (m/s): Velocidad del flujo en la tubería de succión.

D_i (m): Diámetro interno de la tubería de succión.

l_d, l_i y b , (m): Distancia de la tubería de succión a la pared lateral derecha, izquierda y al fondo del reservorio, respectivamente.

Γ (m²/s): Intensidad de rotación del fluido.

ρ (kg/m³): Densidad del fluido a las condiciones de succión.

μ (N.s/m²): Viscosidad del fluido a las condiciones de succión.

σ (N/m): Tensión superficial a las condiciones de succión.

g (9,81 m/s²): Constante gravitacional.

a_c (m/s²): Aceleración de Coriolis (causada por la rotación terrestre y según la latitud geográfica).

De esta lista de variables fueron eliminadas las distancias a las paredes laterales (l_i, l_d), ya que las tuberías conectadas al dispositivo se encontraban suficientemente alejadas de las paredes del reservorio, considerando estas distancias como infinitas. Adicionalmente, fue desechada la distancia al fondo (b), debido a que los ensayos fueron realizados con las tuberías en posición vertical conectadas para succionar por el fondo del dispositivo generador de vórtices. También, fue descartada la intensidad de circulación (Γ), debido a que está relacionada con una rotación local inducida por la velocidad de un flujo de aproximación, que no se presenta en reservorios con líquido en reposo. De los parámetros involucrados fue eliminada la aceleración de Coriolis (la cual depende de la velocidad angular de la tierra y la latitud geográfica donde se encuentre), debido a que sus efectos sobre la formación del vórtice no fueron significativos durante los ensayos, más bien están relacionados con la tendencia del líquido a girar en un sentido u otro (en ausencia de perturbaciones, como corrientes y/o turbulencia, entre otras). En la tabla 1 se resume esta selección.

Tabla 1. Variables y parámetros dimensionales seleccionados

S_c	V_s	D_i	ρ	μ	σ	g
L	LT ⁻¹	L	ML ⁻³	ML ⁻¹ T ⁻¹	MT ⁻²	LT ⁻²

Analizando las variables, usando el “Teorema Pi de Buckingham”, para reducir en orden secuencial el número de variables dimensionales a solo un grupo de parámetros adimensionales recogidos en una expresión funcional representada por la ecuación (2).

$$f\left[\frac{S_c}{D_i}, \frac{1}{(v_s * D_i * \frac{\rho}{\mu})}, \frac{1}{(v_s^2 * D_i * \frac{\rho}{\sigma})}, \frac{1}{(g * D_i)}\right] = 0 \quad (2)$$

Considerando que el sumergimiento crítico (dimensional) aparece solamente en uno de los parámetros adimensionales determinados, éste puede salir de la ecuación (2) como la variable dependiente adimensional que llamaremos sumergimiento relativo, el cual depende de la dimensión de longitud fundamental; diámetro interno de la tubería de succión, con la cual fueron definidos el resto de los parámetros adimensionales trascendentales determinados en este estudio. Adicionalmente, para White (2004), el número de Weber juega un papel importante solo si es del orden de la unidad o menor, mientras que si el número de Weber es grande, sus efectos son despreciables. También, Jain et al 1978, basados en estudios experimentales, concluyeron que la tensión superficial no influye sobre el sumergimiento crítico, cuando $We > 120$. Por lo antes expuesto, el número de Weber se elimina de la función, debido a que los valores calculados de este parámetro a partir de los datos experimentales son casi en su totalidad superiores a 120, quedando finalmente la relación funcional adimensional “z”, mostrada en la ecuación (3). Ya no será necesario cambiar todos los valores de las variables y parámetros dimensionales separadamente durante los ensayos, sino que basta cambiar el grupo adimensional.

$$S_r = z\left(\frac{1}{Re}, \frac{1}{Fr}\right) \quad (3)$$

Esta ecuación no describe la forma de la ecuación predictora, solo la relación funcional entre las variables adimensionales. Para esto, se inspecciona visualmente el gráfico de los datos resultado de los ensayos para posteriormente determinar cual tipo de función se ajusta mejor al conjunto de datos.

Teniendo en cuenta que los parámetros adimensionales encontrados a partir de la aplicación del teorema “Pi” son productos de potencias, adicionalmente se conoce que, en general, las variables de diseño en ingeniería son a menudo dependientes de varias variables independientes y comunmente, esta dependencia funcional se caracteriza mejor con ecuaciones de potencias multivariadas. Por estas razones se propuso la ecuación (4) de productos de potencias con bases adimensionales, la cual cumple con la relación funcional establecida en la ecuación (3) y que será evaluada mediante regresión lineal múltiple.

$$S_r = a * \left(\frac{1}{Fr}\right)^b * \left(\frac{1}{Re}\right)^c \quad (4)$$

Donde a, b y c; son el coeficiente y las potencias de ajustes a los datos experimentales, por mínimos cuadrados, para determinar la relación con fines predictivos. Debido a que la relación entre la variable dependiente y las independientes no es lineal, se transforma la ecuación para hacerla compatible con la regresión lineal múltiple.

La Figura 5 muestra la recta de regresión obtenida de la linealización de la ecuación de productos de potencias, la cual es única y la mejor para el conjunto de datos de ensayo, debido a que, cualquier otra línea diferente a la calculada, dará como resultado una mayor suma de cuadrados de los residuos (Chapra S, 2007). Este teorema, junto con el coeficiente de determinación ($R^2=0,9855$), que indica que la línea de regresión explica el 98,55% de la variabilidad de los datos experimentales (incertidumbre original) y el error estándar calculado ($S_{y/x} = 0,028591$), comprueba la mejora y por ende, la confiabilidad de los valores obtenidos para el coeficiente $a=0,04541$ y los exponentes $b=0,138866$ y $c=0,410757$, ya que tanto el valor del coeficiente de determinación y del error estándar se encuentran relativamente cercanos a los valores de ajuste perfecto ($R^2 = 1$ y $S = 0$).

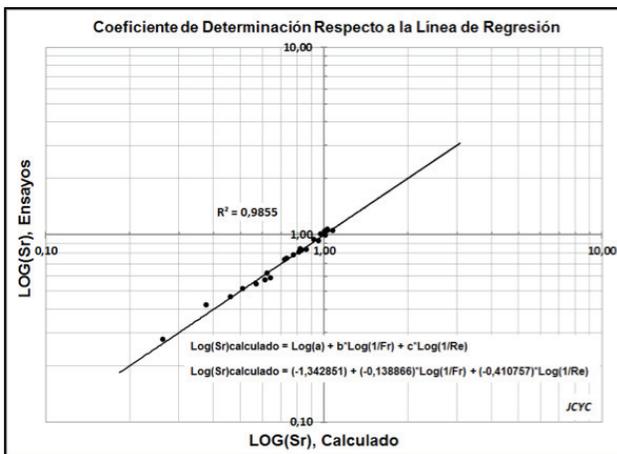


Figura 5. Coeficiente de determinación y correlación de la regresión lineal múltiple

Como el valor del error estándar “ $S_{y/x}$ ” que cuantifica la dispersión de los datos transformados alrededor de la línea de regresión múltiple:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{C_r}{n - (m + 1)}} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - a_0 - a_1 * x_{1i} - a_2 * x_{2i})^2}{n - (m + 1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum [\log(S_r) - \log(a) - b * \log(1/F_r) - c * \log(1/R_e)]^2}{n - (m + 1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,015532}{22 - (2 + 1)}} = 0,028591$$

es mucho menor que el valor de la desviación estándar que cuantifica la dispersión respecto a la media de los datos registrados: $S_y = 0,226123$, el modelo de regresión lineal se considera adecuado y se comprueba la bondad del ajuste. Regresando la ecuación linealizada a su estado original y posterior a algunas simplificaciones, se obtiene la ecuación adimensional (5) que caracteriza de manera general la tendencia de los datos, sin pasar a través de algún punto específico; pero, que minimiza la discrepancia entre los valores de ensayo y los de la predicción (Chapra S, 2007).

$$S_r = 0,0454 * F_r^{0,139} * R_e^{0,411} \quad (5)$$

La correlación adimensional del sumergimiento relativo, en función del número de Froude y de Reynolds, representa la ecuación predictora de los datos recolectados en el estudio y presenta un coeficiente de determinación $R^2= 0,9776$ y de correlación $R= 0,9887$, lo cual indica que esta ecuación explica el 97,76% de la incertidumbre de los datos originales.

Al graficar los valores de las predicciones dimensionales a los mismos caudales de ensayo y para cada diámetro interno de tubería estudiado, se observa que la predicción subestima ligeramente los valores de sumergimiento crítico y en otros casos los sobreestima ligeramente. Para estimar el porcentaje de error involucrado entre la predicción del sumergimiento relativo y el valor observado correspondiente, se grafican ambos sumergimientos sobre un mismo sistema de ejes rectangulares con la misma escala e iguales rangos, para compararlos contra la línea de compromiso, como se muestra en la Figura 6, para el sumergimiento relativo.

En la Figura 6, se observa que para el sumergimiento relativo (adimensional), la curva de ajuste a los puntos en el gráfico de sumergimiento observado vs. sumergimiento calculado coinciden exactamente con la línea de compromiso y los puntos correspondientes se encuentran distribuidos alrededor de esta, mostrando una correlación evidente y sin indicación de sesgo hacia ninguno de los ejes de valores representados. Esto es indicativo de que la correlación predictora produce resultados satisfactorios dentro de un margen de error de: $\pm 8\%$, respecto a los valores observados, con un coeficiente de determinación del sumergimiento relativo de: $R^2 = 0,9855$.

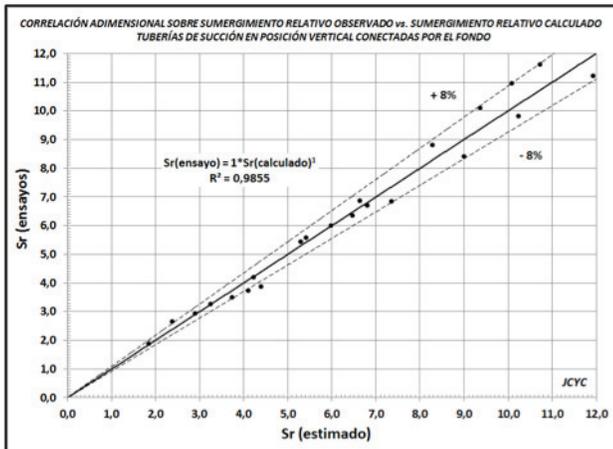


Figura 6. Sumergimiento relativo observado y predicho

La correlación adimensional del sumergimiento relativo puede ser utilizada para predecir el sumergimiento crítico de diferentes tipos de fluidos a distintas condiciones operacionales y diferentes diámetros internos de tuberías (Streeter, Wylie y Bedford, 2007); sin embargo, se requerirá determinar si existen o no efectos de escalamiento.

Ejemplo de aplicación

Para obtener una ecuación predictora dimensional hija, como la (6), se simplifica la correlación adimensional madre (5), aplicándola al fluido de trabajo, en este caso, el usado durante los ensayos bajo condiciones supuestas. Esto es:

Fluido: Agua limpia.

Condiciones operacionales (t y p): 20°C
1Atmósfera.

Aceleración de la gravedad (g): 9,81 m/s²

Densidad (ρ): 998,2 kg/m³

Viscosidad (μ): 0,001003 N.s/m²

Tensión superficial (σ): 0,0728 N/m²

La aplicación de la correlación predictora, proporciona una ecuación dimensional (6) del sumergimiento crítico para condiciones operacionales y geometrías de obras de toma similares.

$$S_c = 0,0978 * \frac{Q^{0,689}}{D_i^{0,105}} \quad (6)$$

Donde:

S_c: Sumergimiento crítico (m)

Q: Caudal o gasto volumétrico (l/s)

D_i: Diámetro interno de la tubería de succión (m)

Esta ecuación permite estimar el sumergimiento crítico para agua limpia, como función solo del caudal y del diámetro interno de la tubería de succión con un margen de error de ±8%.

Al graficar los valores del sumergimiento crítico estimados con la ecuación predictora dimensional, al igual que los datos originales, se genera también una nube de puntos un poco más compacta alrededor de la curva de tendencia, como se muestra en la Figura 7. La ecuación predictora adimensional proporciona una herramienta de utilidad práctica para estimar el sumergimiento mínimo necesario de la tubería de succión en sistemas de bombeo para diferentes caudales, diámetros y posiciones de tuberías de succión, otros fluidos y/o diferentes condiciones operacionales que se presentan en problemas prácticos de ingeniería.

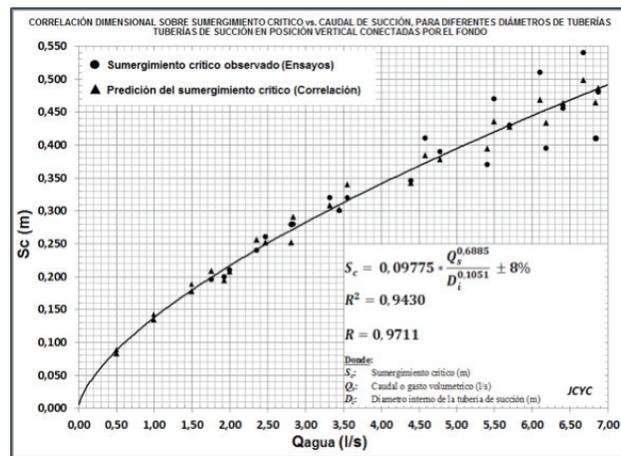


Figura 7. Correlación dimensional del sumergimiento crítico v.s. caudal

La Figura 8 representa la relación de la variable dimensional dependiente “Sumergimiento Crítico (S_c)” como función de las variables independientes caudal o velocidad media de flujo, diámetro interno y posición de las tuberías de succión estudiadas para agua limpia a las condiciones de ensayo, donde se destaca la sensibilidad del Sumergimiento Crítico respecto a estas últimas. En ésta puede observarse que el requerimiento de sumergimiento se incrementa junto con el caudal y que, para un gasto determinado, el requerimiento de sumergimiento se incrementa al disminuir el diámetro interno de la tubería de succión.

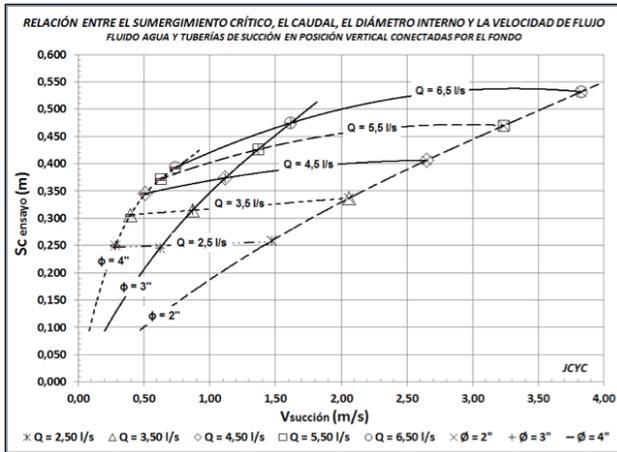


Figura 8. Resumen de la relación entre las variables dependientes e independientes y el comportamiento físico del sistema; líquido en el reservorio y la tubería de succión

CONCLUSIONES

Existe una fuerte dependencia funcional del sumergimiento crítico con respecto al caudal y al diámetro interno de la tubería de succión entre otras variables.

La relación entre el sumergimiento crítico y el caudal de bombeo es directa, ya que la profundidad a la cual debe encontrarse sumergida la tubería de succión aumenta con el incremento del caudal. Mientras que la relación entre el sumergimiento crítico y el diámetro interno de la tubería de succión es inversa; es decir que, para un caudal específico, a mayores diámetros de tubería, la profundidad a la cual ésta necesita encontrarse sumergida se reduce.

La dependencia del sumergimiento relativo es directa respecto a los números de Froude y de Reynolds; esto es: el sumergimiento relativo crece con los incrementos del número de Froude y/o del Reynolds. Los efectos del número de Froude sobre la variación del sumergimiento relativo son más significativos que los del número de Reynolds y Weber. A caudales bajos, las diferencias de sumergimiento crítico para distintos diámetros de tubería de succión se hacen relativamente pequeñas. Mientras que a grandes caudales la divergencia en las tendencias del sumergimiento crítico respecto a los diámetros de las tuberías se hacen mínimas.

La formación de vórtice es altamente sensible a corrientes profundas y superficiales, así como a turbulencias debido al viento, fluctuaciones debido a olas, caídas de agua cercanas a la succión, entre otras. Estas perturbaciones pueden favorecer u oponerse a la formación de vórtices en un momento determinado, por lo que, debido a su naturaleza

aleatoria, el estudio para la predicción del sumergimiento crítico a condiciones inestables o fuera del reposo relativo del líquido en un reservorio se hace dificultoso.

La correlación adimensional deducida para la predicción del sumergimiento relativo a partir de los datos experimentales produce resultados satisfactorios y puede ser utilizada para fluidos diferentes al agua limpia (usada en esta investigación) y/o para diferentes condiciones operacionales, sobre todo en recipientes cerrados y presurizados, donde no es posible observar a simple vista la presencia del fenómeno vórtice.

RECOMENDACIONES

Se propone la correlación (7), dada a continuación, para determinar el sumergimiento relativo mínimo recomendado para aplicaciones prácticas con cualquier tipo de fluido Newtoniano y diferentes condiciones de servicio, a fin de evitar la formación de vórtices y la consecuente succión de aire o vapores que formen parte de la atmósfera gaseosa de los equipos de proceso.

$$S_r = 0,050 * F_r^{0,139} * R_e^{0,411} \quad (7)$$

Para que no existan problemas con la formación de vórtices, los resultados obtenidos, al aplicar la ecuación (7), deben ser interpretados como la profundidad mínima a la cual debe colocarse la tubería de succión en sistemas de bombeo, medido desde la superficie media del líquido (interfase) hasta el tope de la tubería. Esta ecuación considera un margen de seguridad del 10%, el cual incluye el porcentaje de error de +8% implícito en los resultados de esta investigación.

REFERENCIAS

- AHMAD Z. (s.f) Critical Sumergence for Horizontal Intakes in Open Channel Flow. *Dam Engineering*. Vol XIX (2). 71- 90.
- AHMAD Z. (2011). Rational Design of a Pump-Sump and Its Model Testing. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000074, 53-63.
- ASCE LIBRARY AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEER (2011). Rational Design of a Pump-Sump and Its Model Testing. Recuperado el 28 de junio de 2016 de <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29PS.1949-1204.0000074>.

- BORGHEI S. (2010). Effect of Anti-Vortex Plates on Critical Submergence at Vertical Intake. *Trasaction A: Civil Engineering*. Vol. 17 (2) 89-95.
- CHAPRA S. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. Mc Graw Hill. 5ta Ed. México.
- GOULDS PUMPS, INC. (1988). *Goulds Pump Manual GPM*. Industrial Products Group. USA.
- HEKAL N. (2010). Effect of Water Surface Fluctuations on Water Intake Performance. Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC 14. 1017-1033.
- JAIN, A.K. (1978). Air Entrainment in Radial Flow Towards Intakes. *J. Hydraul. Div. ASCE*. HY9, 1323-1329.
- JAIN, A.K. (1978). Vortex Formation at Vertical Pipe Intakes. *J. Hydraul. Div. ASCE*. HY10, 1429-1448.
- KARASSIK I. (s.f). *Deals with Vortex Formation. How to Increase NPSH*. CENTRIFUGAL PUMPS CLINIC No. 67. WORTHINGTON CORPORATION, Harrison, New Jersey.
- KARASSIK I. (1960). The Phenomenon of the Whirlpool or Vortex Formation. *Let's Learn More About Centrifugal Pumps*. CLINIC No. 34. WORTHINGTON CORPORATION, Harrison, New Jersey.
- KARASSIK I. (1991). Operation, Maintenance and Troubleshooting of Centrifugal Pumps. *APPLIED CENTRIFUGAL PUMP TECHNOLOGY COURSE*, pages 5 and pages 201-212. WORTHINGTON CORPORATION, East Brunswick, New Jersey.
- KEREMTAS T. (2010). Effects of Dimensionless Parameters on Air-entraining Vortices. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 48, No. 1, pp. 57-64.
- MCNAUGHTON K. (1992). *Bombas. selección, uso y mantenimiento*. Mc Graw Hill/Interamericana de México, S.A. 126
- STREETER V. (2000). *Mecánica de fluidos*. 9na. Ed. Mc Graw Hill. Bogotá Colombia.
- WHITE F. (2004). *Mecánica de fluidos*. Mc Graw Hill. 5ta. Ed. Madrid España.