

LAS BOMBAS DE DRAGADO Y SUS PÉRDIDAS DE CARGA

DREDGING PUMPS AND LOSS OF LOAD

JUAN MORENO GUTIÉRREZ. Doctor en Ciencias del Mar.

Director del Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Motores Térmicos y Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Cádiz. juan.moreno@uca.es

JUAN JOSÉ MUÑOZ PÉREZ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr. en Ciencias Físicas

Servicio de Proyectos y Obras de la Demarcación de costas de Andalucía-Atlántico. juanjose.munoz@uca.es

CRISTINA V. DURÁN GRADOS. Licenciada en Máquinas Navales.

Profesora del Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Motores Térmicos y Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Cádiz.

RESUMEN: Los problemas de pérdidas de carga que ocasiona el transporte de sólidos en suspensión a través de una bomba centrífuga de dragado, son de especial interés dadas las altas potencias que se manejan. La mayoría de las ecuaciones existentes son empíricas y proceden de ensayos experimentales que se encuentran en continua evolución por lo que la actualización de conocimientos en este sentido se hace a veces bastante laboriosa. En este artículo se trata precisamente de relacionar las distintas ecuaciones que definen las pérdidas de carga que tienen lugar en el interior de la bomba como consecuencia del transporte de sólidos en suspensión, haciendo una revisión cronológica de las mismas. Para ello, previamente, se exponen las diferencias básicas existentes entre las bombas de líquido y las de dragado que originan las discrepancias en los valores de los rendimientos y que justifican las formas distintas que adquieren las curvas características de ambos tipos de bomba.

PALABRAS CLAVE: DRAGADO, BOMBAS, TRANSPORTE POR TUBERÍAS, DRAGAS DE SUCCIÓN

ABSTRACT: The problems with headlosses caused by the transport of solids in suspension through a centrifugal dredging pump, are of special interest due to the high power in use. Most of the actual equations are empirical and come from experiments in continous development which makes the updating of knowledge in this matter be a hard task. This paper deals precisely with the relationship of the various equations defining the headlosses inside the pump as a consequence of the transport of solid in suspension, making a cronological revision of them. To do that, the basic differences between the single-liquid pumps and the dredging ones are stated , which originate the discrepancies in the value of efficiency and justify the different curves of the two types of pumps.

KEYWORDS: DREDGING, PUMPS, PIPE TRANSPORT, TRAIL SUCTION DREDGERS

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de las playas dentro del sector turístico ya ha sido establecida por numerosos autores (Houston, 1995, 1996; King, 1999; Muñoz-Pérez et al., 2001). El sostenimiento de las mismas, junto con la imperiosa necesidad de mantener la actividad económica de los puertos, ha conducido a un desarrollo espectacular de la industria de dragado. Es interesante remarcar que la draga de rosario o de canaïlones se ha convertido en un artefacto propio de

museo pese a que nuestra entrañable Sánchez Guerra saliera del Astillero Unión Naval de Levante hace poco más de 30 años. Este tipo de draga se encuentra en declive ante otras, como las de succión en marcha, que pueden sustituirla con mejores condiciones de rendimientos, costos y menor complejidad de operaciones (Vigueras y Peña, 1996; Vanderostyne and Cohen, 1999; Riddell, 2000).

Por otra parte, el transporte de material dragado a través de tuberías ha sido posible gracias a la bomba centrífuga de dragado que se ha desarrollado a partir de las bom-

bas centrífugas radiales para agua, adecuando sus características para el transporte de una mezcla de agua y materiales sólidos. La bomba centrífuga consiste, en esencia, en un impulsor o rodete dotado de álabes o paletas que transmite al fluido la energía necesaria para establecer la diferencia de presiones que hace posible el transporte. La bomba centrífuga de dragado se caracteriza, entre otros aspectos, por su gran paso, que le permite bombear fragmentos de roca, por la robustez y sencillez de su construcción y por ir dotada de elementos de desgaste recambiables.

Aunque se debe considerar a las bombas de dragado como bombas centrífugas que, al mismo tiempo, también trabajan con agua, no se deben, sin embargo, construir como éstas desde el punto de vista hidrodinámico debido fundamentalmente a los cuerpos sólidos que las atraviesan. Si se estudian las bombas de dragado de acuerdo simplemente con las leyes hidrodinámicas, existirían problemas para analizar el rendimiento óptimo, porque se tendrían que adoptar dimensiones que provocarían atascos continuos como consecuencia de la relación entre espacio en el interior del impulsor y volumen del material sólido transportado por el fluido. Tampoco parece razonable el criterio adoptado antiguamente para las denominadas "viejas bombas holandesas" en cuanto que se descuidaban tanto la hidrodinámica como el rendimiento en el diseño del conjunto y sólo se atendía el que el material sólido no encontrase obstáculo a su paso por el interior del impulsor. Deben existir, por tanto, unas claras diferencias entre las bombas centrífugas diseñadas para impulsar líquido solamente y las pensadas para impulsar mezclas de dragado.

En principio, es lógico suponer que cuando una bomba de dragado trabaja transportando mezcla, la altura real de bombeo que se alcanza es inferior a la que consigue si sólo bombea agua. Ello se debe a la carga adicional que supone el transporte de materia sólida en suspensión; como consecuencia de esto, se producen variaciones en el rendimiento global del conjunto. Aparece, por tanto, la consiguiente necesidad de conocer las características de las bombas de dragado y sus diferencias con respecto a las de líquidos. Conviene conocer sus peculiaridades a la hora de diseñar un proyecto de dragado, optimizar el coste del mismo y evitar problemas durante la ejecución de los trabajos.

En este artículo se analizan estas cuestiones así como la situación actual de conocimientos en cuanto a las ecuaciones que definen las pérdidas de carga en el interior de las bombas de dragado.

2. ANTECEDENTES

Las magnitudes principales que caracterizan el funcionamiento de las turbo máquinas hidráulicas son el caudal, la altura de presión y la presión que ellas desarrollan. El per-

feccionamiento hidrodinámico y mecánico de la máquina se caracteriza por su rendimiento total.

El caudal es la cantidad de líquido que desplaza la máquina en la unidad de tiempo. Suponiendo que no existan fugas, el caudal másico será igual en todas las secciones de la misma. No obstante, al analizar el rendimiento, veremos que en toda bomba centrífuga existen fugas que lo hacen disminuir.

En los sistemas de bombeo se habla de altura de presión como una magnitud enlazada con la presión por la relación que existe entre ésta y el peso específico del fluido transportado y consecuentemente calculada en unidades de longitud y que representa físicamente la altura de la columna del líquido.

En cuanto a la potencia útil de la máquina se puede definir como el trabajo por segundo comunicado por ésta al medio. Al representar el trabajo como el producto de la fuerza por la longitud del trayecto, se puede decir que la potencia útil sería el producto del peso del fluido suministrado por la máquina en un segundo por la altura alcanzada. Por otro lado, la potencia suministrada a la bomba desde el motor será la potencia de la bomba. Las pérdidas de energía inevitables en cualquier proceso de trabajo, conducen a la desigualdad entre la potencia útil y la potencia de la bomba. Consecuentemente, la relación entre ambas potencias nos llevará a la definición del rendimiento de la bomba.

Para un mejor análisis de las pérdidas de carga que se producen en una bomba de dragado, conviene diferenciar entre las que tienen lugar cuando se bombea mezcla y las que corresponden al bombeo de líquidos exclusivamente.

Las curvas características que relacionan el flujo volumétrico con la altura desarrollada así como la potencia consumida, están representadas en la figura 1, en la que:

H , altura de presión suministrada por la bomba
 Q_M flujo volumétrico suministrado por la bomba
 W , potencia de accionamiento

H_t representa la relación teórica $H-Q$ (lineal)

H_l relación cuadrática real $H-Q$ (considerando las pérdidas volumétricas, hidráulicas y mecánicas) que tiene lugar cuando sólo se bombea líquido

H_k curva característica teniendo en cuenta el aumento de rugosidad como consecuencia del transporte de sólidos

$H_{k,d}$ curva característica descontadas las pérdidas debidas a los cambios geométricos en el impulsor por desgaste producido por el bombeo de sólidos

$H_{k,c}$ curva real para una concentración de sólidos determinada

De la fig. 1 se desprende que cuando una bomba de dragado transporta sólo agua, las pérdidas de carga no son de igual magnitud que las producidas en bombas diseñadas para líquidos. Las diferencias existentes entre las características físicas de ambos tipos de bombas (dragado y líquidos) hacen que sus distintos elementos (relación diámetro exterior /diámetro interior del impulsor, número de álabes y espesor de los mismos,

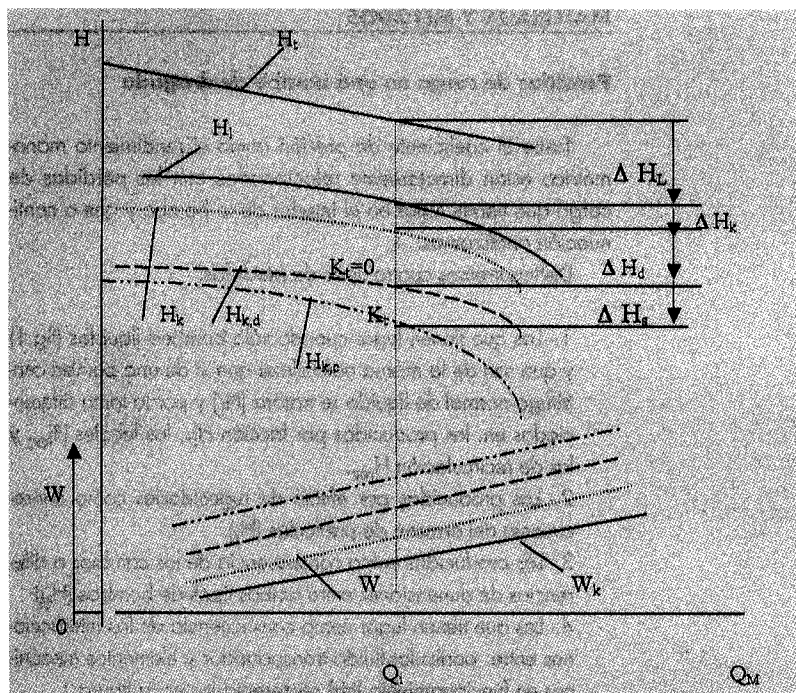


Figura 1. Efectos del bombeo de sólidos sobre las curvas características en una bomba de dragado.

número de revoluciones, etc.), no guarden la misma proporcionalidad entre ellos.

En primer lugar, la construcción de una bomba centrífuga para dragado es mucho más robusta que la centrífuga normal de líquido, ya que aquella está concebida fundamentalmente en atención al desgaste. Además existen ciertas características perfectamente diferenciadas para ambas bombas como se verá a continuación

Diferencias físicas entre las bombas de líquidos y las de dragado

Si se toman dos bombas (una de líquidos y otra de dragado) con un mismo diámetro de tubería de succión y misma velocidad periférica (velocidad lineal en el extremo del álabe del impulsor), se puede verificar que:

1.- el diámetro del rodete es mayor en la bomba de dragado como consecuencia del menor número de revoluciones (existe una proporcionalidad del 10 al 15% aproximadamente), sin descuidar la relación diámetro de rodete/diámetro tubería aspiración (proporcionalidad de 2 a 3 aproximadamente).

2.- la distancia entre álabes debe ser algo superior al radio de la tubería de aspiración con lo que, algunas veces, se puede llegar a 3 álabes solamente (condicionado al paso de material sólido) frente al caso ideal para una bomba de líquidos que como se sabe, debe ser el mayor posible. Por lo tanto, la pérdida por número de álabes es mayor en las bombas de dragado.

3.- la sección total de salida es superior en la bomba de dragado y como consecuencia el fluido posee una velocidad radial de flujo inferior, diferencia ésta muy importante que justifica alguna de las características opuestas entre ambos tipos de bomba.

4.- la sección menor se encuentra a la entrada diseño que obedece a los requerimientos de accesibilidad para la eliminación de los obstáculos que puedan perturbar el funcionamiento de la bomba. Para conseguir el mayor paso en el rodete, el número de álabes debe ser el menor posible con la influencia negativa anteriormente expuesta. Normalmente, se adopta una solución de compromiso dependiente del tamaño y del paso necesario del rodete.

5.- Por último, el volumen del rodete de una bomba de dragado viene a ser aproximadamente como unas cinco veces superior al de la bomba de líquidos con objeto de limitar las velocidades periféricas consiguiéndose de esta forma un menor grado de desgaste y una abrasión más uniforme.

Para conseguir reducir las pérdidas hidráulicas de mezcla de arenaagua a lo largo del lado exterior del rodete, el espacio existente entre las paredes de éste y las tapas de la bomba debe ser el menor posible. No obstante, se suele emplear una bomba adicional que sirve para mantener libre de arenas dicho espacio con una presión de lavado que debe aproximarse a la presión máxima de trabajo de la bomba de dragado lo que supone un consumo de energía que no necesitan las bombas de líquido.

En cuanto al diseño de la carcasa, de la misma manera que si de una bomba de líquido se tratara, la presión en la periferia debe ser lo más uniforme posible. Por este motivo, como norma general, el radio mínimo en la carcasa suele tener un valor superior al radio del impulsor en una cantidad próxima al 20% del diámetro del mismo.

Las diferencias enumeradas anteriormente hacen que los parámetros que influyen en el rendimiento de la bomba sufran modificaciones sustanciales como se verá a continuación.

Rendimientos en bombas de dragado

Del análisis de la expresión general del rendimiento volumétrico η_v (relación entre caudal real y teórico), se tiene que

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_t} = \frac{Q}{\pi \cdot D_2 \cdot b \cdot V_{f2}}$$

siendo D_2 es el diámetro exterior del impulsor,

b el ancho del mismo,

V_{f2} la velocidad radial,

Q_t el caudal teórico y Q el caudal real.

Se observa que si la velocidad radial (V_{r2}) disminuye, como sucede en las bombas de dragado, ello no significa que el rendimiento aumente ya que, como anteriormente se expuso, el volumen de los rodets de las bombas de dragado (proporcional a D_2 y b) es muy superior al de las bombas de líquido y por lo tanto la proporción en la que este volumen aumenta es muy superior a la disminución de la velocidad lo que hace que la expresión anterior disminuya.

Otro de los valores característicos de las bombas centrífugas, el denominado coeficiente de presión ψ (relación entre la altura debida exclusivamente a la velocidad periférica de salida del rodete y la altura real alcanzada), adquiere gran importancia cuando se trata de una bomba de dragado. En la expresión general que define este coeficiente, si llamamos H_t a la altura teórica alcanzada, u_2 a la velocidad periférica del rodete, sustituyendo esta velocidad en función del diámetro exterior y llamando δ a la relación entre los diámetros exterior de salida d_2 e interior de entrada d_1 , y siendo N el número de revoluciones por minuto del impulsor, se tiene que:

$$\psi = \frac{2gH_t}{u_2^2} = \frac{2 \cdot g \cdot H_t}{\pi^2 \cdot \delta^2 \cdot d_1^2 \cdot N^2} \quad (2)$$

Dado que la velocidad periférica u_2 permanece constante cuando se trabaja sobre la curva característica de velocidad de giro constante, los coeficientes de presión tienen la misma forma que las curvas de altura de impulsión. Este coeficiente puede servir, de alguna forma, como referencia para expresar el rendimiento hidráulico del sistema.

La ecuación de Euler aplicada a una bomba centrífuga que relaciona las distintas velocidades con la altura de carga, permite deducir que el coeficiente de presión de las bombas de dragado debe ser mayor que el de las bombas de agua dado que la velocidad absoluta a la salida es mayor en la bomba de dragado.

Por último, el rendimiento manométrico (relación entre altura real alcanzada y altura teórica) también se verá afectado por la influencia que el transporte de material sólido ejerce en la altura real como se verá más adelante.

En resumen, y como consecuencia de lo anteriormente expuesto, en una bomba de dragado se producen unas pérdidas de carga que en términos generales se pueden clasificar de la siguientes manera:

- 1.- las mismas que se producirían si de una bomba de líquidos se tratara.
- 2.- las que tienen lugar como consecuencia de lo anteriormente expuesto en cuanto a rugosidades producidas por el bombeo de sólidos y los cambios de dimensiones
- 3.- las añadidas debidas exclusivamente al bombeo de mezclas, que pasamos a analizar.

MATERIALES Y METODOS

Pérdidas de carga en una bomba de dragado

Tanto el coeficiente de presión como el rendimiento manométrico están directamente relacionados con las pérdidas de carga que tienen lugar en el interior de la bomba y que a continuación analizamos.

Distinguiremos cuatro tipos de pérdidas:

- 1.- Las que tienen lugar cuando sólo bombea líquidos (fig.1) y que son de la misma naturaleza que si de una bomba centrífuga normal de líquido se tratara (H_l) y por lo tanto diferenciadas en: las producidas por fricción H_{fr} , las locales H_{loc} y las de recirculación H_{rec} .
- 2.- Las producidas por efecto de rugosidades como consecuencia del arrastre de partículas (H_r)
- 3.- Las producidas como consecuencia de los cambios o diferencias de dimensiones entre ambos tipos de bombas (H_d)
- 4.- Las que tienen lugar como consecuencia de las interacciones entre partículas-fluido transportador y elementos mecánicos en funcionamiento (H_s) representadas en la figura 1.

Las pérdidas correspondientes a los efectos de fugas también incluyen las debidas al flujo secundario o recirculación (ΔH_{sf}) y tienen un tratamiento parecido a los de las bombas centrífugas para líquidos. Responden a la expresión $\Delta H_{sf} = H_l k_L$, siendo k_L el coeficiente de deslizamiento.

De la misma manera, las pérdidas locales representadas por $\Delta H_{loc} = k_{loc} \cdot \Delta(Q-Q_L)^2$ (Q , caudal real), y normalmente denominadas pérdidas por choque, están producidas principalmente por las diferentes condiciones de entrada y salida del flujo a través del impulsor; en esta ecuación k_{loc} es el coeficiente de pérdidas locales y Q_L (caudal nominal) corresponde al flujo al cual las pérdidas locales son mínimas.

Por último, las pérdidas por fricción ΔH_{fr} , son las que tienen lugar como consecuencia de los rozamientos del fluido con la carcasa por lo que, dadas las diferentes secciones geométricas que ésta presenta al fluido durante su paso a través de las paredes, dichas pérdidas dependerán de la superficie de rozamiento puntual.

Cuando se pasa al bombeo de mezclas de sólidos estas pérdidas aumentan y dan lugar a las curvas representadas en la mencionada figura 1.

En ella se representa con (H_r , las pérdidas de carga debidas a aumento de rugosidad cuando se bombean sólidos, con (H_d , las debidas a los cambios geométricos del impulsor y carcasa por desgastes cuando se bombean sólidos y con (H_s , las correspondientes a las resistencias hidráulicas suplementarias cuando se bombean sólidos (interacciones partícula/partícula, partícula/paredes y partícula/fluido).

Por consiguiente, las pérdidas totales responderán a la siguiente relación:

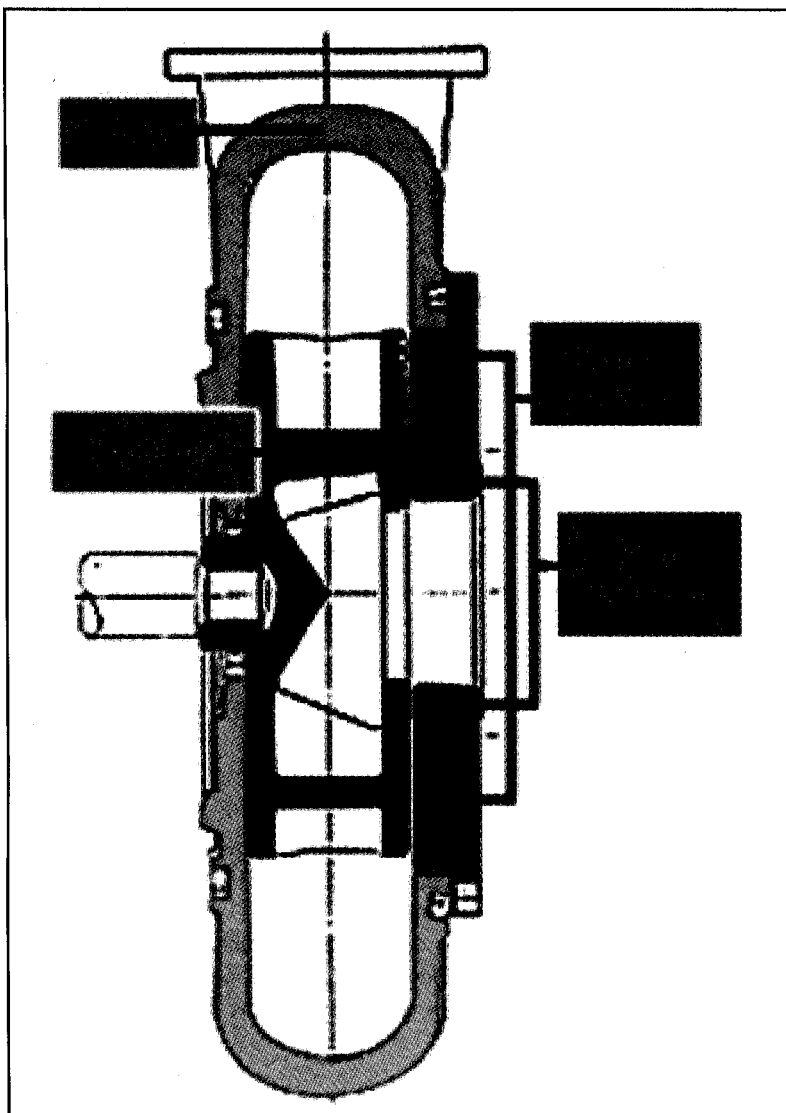


Figura 2. Bomba de dragado.

$$H_t - H_{k,c} = \Delta H_L + \Delta H_k + \Delta H_d + \Delta H_s$$

donde, H_t = altura teórica que alcanzaría la bomba de no existir ningún tipo de pérdidas.

H = curva real de la bomba para impulsión de líquido solamente

$H_{k,c}$ = curva real de la bomba de dragado.

ΔH_L = pérdidas de carga debidas al líquido solamente, ya mencionadas anteriormente.

Las ecuaciones para determinar las pérdidas de carga en tuberías cuando transportan mezclas de productos de dragado están basadas en cálculos experimentales y difieren entre ellas fundamentalmente en los valores de algunos coeficientes debido fundamentalmente a que los ensayos no son coincidentes en cuanto a diámetro de tubería y tipo de material en particular. No obstante, todas coinciden cuando se trata de flujos homo-

géneos (partículas fluidizadas con diámetro medio $< 0,150$ mm), en cuyo caso, para el cálculo del coeficiente de fricción, se aplican las mismas ecuaciones que se vienen utilizando para el caso de pérdidas de carga en líquidos pero sustituyendo los valores de la rugosidad de la tubería (k) por el de la concentración volumétrica de material (k_f) y el de la densidad del líquido por el de la densidad media de la mezcla.

En las mezclas heterogéneas (diámetro medio de partículas $> 0,150$ mm), parte del material es transportado en suspensión y parte por saltos manteniéndose el movimiento de la mezcla por la turbulencia y por las fuerzas de arrastre. Fürthbötter (1961) y Durand (1953) definen ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de carga que sólo difieren en un coeficiente que, al mismo tiempo, es función del diámetro medio de partícula exclusivamente. Así pues, cuando el diámetro está comprendido entre $0,150$ mm y $0,800$ mm se emplea la de Fürthbötter y cuando es mayor de $0,800$ mm la de Durand.

En ambas ecuaciones interviene la velocidad de sedimentación de la partícula y dada la relación existente entre el diámetro de ésta y aquélla, conviene aclarar que para el cálculo del diámetro medio de la partícula se suele tomar a veces el correspondiente al d_{50} pero parece más exacto aplicar la ecuación siguiente:

$$d_m = \frac{1}{0,2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}$$

Siendo d_i el valor del diámetro medio correspondiente a las ordenadas del 10,30,50,70 y 90% respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuaciones experimentales

Cuando se trata de aplicar estas ecuaciones al transporte en el interior de la bomba, no se pueden hacer las mismas consideraciones que cuando dicho transporte tiene lugar a lo largo de conducciones por tuberías dadas las diversas modificaciones (presión, velocidad y efectos de turbulencias) que sufren tanto el fluido como los sólidos en el interior de la bomba. Entre estos efectos, los de turbulencia son los más difíciles de adaptar a las teorías existentes; citemos como ejemplo que existen ensayos suficientemente probados que revelan que en puntos de turbulencia máxima, las pérdidas de carga en fluidos con material en suspensión son incluso menores que con líquido sólo.

Para analizar estas pérdidas de carga hay que tener en cuenta que mientras que en los fluidos portadores puros los fenómenos de flujo son semejantes si la relación de las fuerzas de inercia y rozamiento es igual, en el transporte de ma-

teriales se ha de contar adicionalmente con la fuerza de la gravedad, por lo que resulta necesario considerar un coeficiente que expresa la relación de las fuerzas de inercia con respecto a la gravedad y que es el número de Froude, $Fr = V/(gd)^{1/2}$. Dada la diversidad que existe en los diámetros de partículas, la relación velocidad-diámetro de tubería no puede ser aplicada a cualquier diámetro de tuberías por la repercusión que ello tiene sobre la sedimentación. Además, hay que tener en cuenta la diversidad en los diámetros de partículas de los sólidos transportados. Por ésto, se toma la velocidad media de caída v_f como sustitutiva de V en la expresión anterior dando lugar al denominado coeficiente de Froude modificado. Sentadas estas bases, la situación actual en cuanto a ecuaciones empíricas se refiere (cronológicamente), para el cálculo de pérdidas de carga, es la siguiente:

Wiedenroth (1970) define las pérdidas suplementarias producidas como consecuencia del transporte de sólidos por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{k_t}{\psi} Re_d^{1/3} \cdot \left[\frac{13,2}{N_s} \right]^{2,46}$$

donde, ψ = coeficiente de presión de la bomba
 N_s = número específico de revoluciones de la bomba

Por otro lado, Karin (1971)

$$\frac{k}{k + F_r}, k = 0,5, F_r = \frac{W_o \cdot d}{r}$$

donde k es el coeficiente de rugosidad y F_r , el número de Froude

Posteriormente, Vocadlo et al (1974)

$$K_t \cdot \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right] \cdot \left[0,167 + 6,02 \left[\frac{d}{D} \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right] \right]^{1/2} \right]$$

Burger (1976) $1 - (1 - K_t)^n$; $n = n(d_s, \rho_s)$

$n = \text{rpm de la bomba}$

finalmente Sellgren (1979)

$$0,32 \cdot K_t^{0,7} \cdot C_D^{-0,25} \cdot \left[\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right]^{0,7}$$

donde, C_D = Coeficiente de rozamiento (Ley de Newton de sedimentación)

Todas estas ecuaciones representan el incremento de pérdidas de carga debido al transporte de material con relación al debido al transporte con agua exclusivamente.

Por último, basándose en ensayos realizados en el Hydraulic Laboratory, GIW Industries, Inc. Grovetown, GA (USA) y cuyos resultados fueron presentados en Dallas en 8th Energy-sources Technology Conference (1985), M.C.Rocco (1986) introduce tanto el coeficiente de Froude, hasta ahora sólo considerado por Wiedenroth, como el de Reynolds y el de Richardson con ciertas modificaciones:

Número de Froude modificado

$$F_r^* = \frac{v^2 \cdot a}{a \cdot d \cdot (\rho_s - 1)} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_m}$$

Número de Reynolds modificado

$$R_e^* = \frac{W_r d}{V_l}$$

Número de Richardson modificado

$$R_i^* = \frac{\left[-a \frac{\partial \rho_m}{\partial x_i} \right]}{\left[\rho_m \frac{\partial U}{\partial x} \right]^2}$$

Dado el pequeño valor que adquiere la estratificación frente a las fuerzas de inercia y viscosidad, el término Ri^* puede ser despreciado

Los resultados de los ensayos publicados distinguen los tres tipos de pérdidas de carga (fricción, locales y recirculación) y definen sus respectivos valores mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{(\Delta H_{loc})_s}{(\Delta H_{loc})_l} = k_t (\rho_s - 1) \cdot k_{loc,s} \cdot F_r^{x_2} \cdot N_s^{y_2}$$

$$\frac{(\Delta H_{sf})_s}{(\Delta H_{sf})_l} = k_t (\rho_s - 1) \cdot k_s \cdot Re^{x_1} \cdot N_s^{y_1}$$

$$\frac{(\Delta H_{fr})_s}{(\Delta H_{fr})_l} = k_t (\rho_s - 1) \cdot k_{fr,s} \cdot \frac{g \cdot D_l}{V_i^2} \cdot \frac{W_o}{V_i}$$

En estas últimas ecuaciones se denota la relevancia de los números de Froude y Reynolds modificados cuya participación parece fundamental en procesos de esta índole, cuestión que anteriormente no había sido considerada por los distintos autores. También existe otra diferencia fundamental entre unas y otras en el sentido de que sólo estas últimas definen y diferencian las pérdidas de carga producidas por fricción de las de flujo secundario y de las locales. Asimismo, cabe destacar que de todas las ecuaciones anteriormente mencionadas, a

excepción de estas últimas, solamente Wiedenroth toma en cuenta el nº de Reynolds de la partícula y la velocidad específica de la bomba. El resto de los investigadores tampoco estiman los números de Froude, Reynolds y Richardson modificados para partículas en movimiento.

Los significados de los distintos términos en las ecuaciones anteriores son los siguientes:

a es la aceleración local $= cu_2^2 / (D_2/2)$.

$B_{2,imp.}$ = ancho del impulsor en el diámetro de salida.

c_{u2} representa la proyección de la velocidad absoluta del fluido u_2 y se calcula como

$u_2 [1 - k_1 - (Q/A_2) / (\tan \beta_2 \cdot u_2)]$,

δ es la relación entre los diámetros exterior de salida d_2 e interior de entrada d_1

d = diámetro de partícula .

D_i, V_i = diámetro y velocidad en secciones puntuales de la carcasa.

E , coeficiente experimental en función de la viscosidad del líquido y de la velocidad de sedimentación de la partícula.

k' y $k'_{loc,S}$ = coeficientes constantes del modelo.

$k_{fr,S} = 1100$ (experimental de Newitt)

k_t = concentración volumétrica de sólidos,

ψ coeficiente de presión, relación entre la altura debida exclusivamente a la velocidad periférica de salida del rodete y la altura real alcanzada,

U = velocidad media normal,

ν_L = viscosidad cinemática del líquido.

v^* = la velocidad de fricción (cortante) medida en el diámetro exterior del impulsor que viene expresada por $c_{u2} / [5,98 + 5,75 \cdot \log. (B_{2,imp} / 2k)]$

W_r = velocidad relativa entre partículas sólidas y mezcla,

$W_r = W_0 \cdot (a/g)^{0,5} \cdot (1 - K_t)^E$

W_0 es la velocidad de sedimentación de la partícula

x_1, x_2, y_1, y_2 , exponentes a determinar en relación con resultados experimentales.

CONCLUSIONES

Definir las pérdidas de carga en el interior de la bomba de dragado con las ecuaciones anteriormente expuestas puede servirnos para predecir el estado funcional de la bomba en cuanto que identificamos la importancia de cada una de las tres causas que originan dichas pérdidas: fricción, flujo secundario y locales (o de choque).

En las tres últimas ecuaciones del artículo, se aprecia la relevancia de utilizar los números de Froude y Reynolds modificados cuya participación parece fundamental a la hora de calcular y diferenciar las pérdidas de carga en bombas de dragado frente a las de impulsión de líquidos exclusivamente, cuestión que hasta la fecha no se había considerado.

Igualmente, la participación de la velocidad específica de giro aparece como un factor sumamente importante en el cálculo de las pérdidas por recirculación y locales. ■

REFERENCIAS

- DURAND, R. "Basic Relationships on the transportation of solids in pipes, experimental research". Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis. Minnesota 1953.
- FÜRTHBÖTER, A. "El transporte de mezclas arena-Agua en tuberías. Informaciones del Instituto Franzius para obras de fondo y agua". T.U. Hannover Cuad.19. 1961.
- WIEDENROTH, W. "The influence of sand and gravel on the characteristics of centrifugal pumps and some aspects of wear in hydrotransport". Hydrotransport 1. BHRA, Cranfield 1970, Paper E1.
- KARIN, A.I. "Characteristic index of slurry pumps", Gidrotech. Stroit(11)1971.
- VOCADLO, J.J. et al. "Performance of centrifugal pumps in slurry service". Hydrotransport 3, BHRA, Cranfield 1974 Paper J2.
- Mc.ELVAIN, R.E. "High pressure pumping". Skillings Mining Review, 63(4).1974.
- CAVE, I. "Effects of suspended solids on the performance of centrifugal pumps". Hydrotransport 4, BHRA. Cranfield 1976.
- BURGESS, K.E. "The effects of sizing, specific gravity and concentration on the performance of centrifugal slurry pumps". Proc. Inst. Mech. Engrs. 190(36/76) 1976.
- SELLGREN, A. "Slurry transportation of ores and industrial minerals in a vertical pipe by centrifugal pumps". Dissertation Chalmers Univ. of Technology. Göteborg 1979.
- ROCCO, M.C. "Dredge pump performance prediction". Journal of Pipelines. Elsevier Science Publishers. B.V. Amsterdam 1986.
- BLAUM AND MARNITZ. "Die Shwunmbagger". Ersterd band. Bodentechnische Grundlagen Saugbagger. Springer. Verlag. Berlin 1963.
- HOUSTON, J.R. "The Economic Value of Beaches". The CERCular CERC 95-4. US Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, p. 1-4, 1995.
- HOUSTON, J.R. "Intenational tourism and US beaches". Shore & Beach 64, p. 3-4, 1996.
- KING, P. "The Fiscal Impact of Beaches in California". Report 29 pp. Public Research Institute. San Francisco State Univ. 1999.
- MUÑOZ-PÉREZ, J.J., B. LÓPEZ, J.M. GUTIÉRREZ-MAS, L. MORENO and G.J. CUENNA. "Cost of Beach Maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain)". Coastal Engineering 42, p 143-153, 2001.
- RIDDELL, J. "Dredging: Opportunities and Challenges for 2000 and Beyond". Terra et Aqua n. 78, p. 3-10, March 2000.
- VANDEROSTYNE, M. and M. COHEN. "From Hand-drag to Jumbo: A millennium of dredging". Terra et Aqua n. 77, p. 1-48, December 1999.
- VIGUERAS, M. y J. PEÑA. "Dragas y Dragados: Investigación previa para el estudio de la evolución de la tecnología de los equipos de dragado a lo largo de la Historia". Puertos del Estado, 326 pags.; 1996.