

Sistema de dragado de arenas mediante tubos venturi perforados en su garganta como dispositivos de succión^(*)

I. Desarrollo de la teoría

Por **JUAN FRANCISCO FERNANDEZ BONO**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Valencia.

PASCUAL ABAD MORENO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Valencia.

Con la presente investigación se estudia la viabilidad técnica y económica de una variante original de la succión inducida aplicada al dragado de fondos arenosos, mediante la incorporación de dispositivos venturi conectados con el entorno exterior por su garganta y situados del lado de la impulsión de la instalación de dragado.

Se han estudiado, asimismo, los valores y sensibilidad de los parámetros de diseño del sistema que maximizan el rendimiento global de la instalación, y se ha comparado la rentabilidad de ésta frente a la de una instalación alternativa clásica de dragado por succión directa de sólidos en suspensión a través de bomba centrífuga.

INTRODUCCION AL PROBLEMA

Todos los puertos (comerciales y deportivos), estuarios, embalses y canales navegables, tienen una característica en común: la necesidad del bypass de los materiales sólidos (fundamentalmente arenas) que el flujo líquido deposita en su entorno.

Si aquellas zonas se dejan desatendidas, el bypass puede ocurrir de una forma natural, pero nunca completa, resultando una insuficiencia progresiva del objetivo de la obra hidráulica en cuestión. Lo mas habitual es que la desatención provoque la inutilización de la obra, léase cierre de la entrada a un puerto, calados insuficientes para la navegación, obstrucción de los órganos de desagüe profundos e intermedios de un embalse,... Por lo tanto, el bypass natural debe aumentarse mediante medios mecánicos.

La técnica habitual para el dragado de estas barreras subacuáticas no cohesivas, es el uso de dragas flotantes. Pero, aunque el equipo sea robusto y seguro, en muchas de las localizaciones y situaciones antes planteadas, resulta inadecuado y con un costo prohibitivo. Ejemplos de ello son la existencia de oleaje de incluso moderada amplitud, mareas, corrientes, limitaciones en los movimientos de giro (área escasa para maniobras), profundidades de medias a altas, interferencia con las operaciones normales de navegación,...

El dragado por succión de los depósitos arenosos de los fondos en los entornos de las obras hidráulicas costeras e interiores, se constituye, en los casos de existencia de las limitaciones anteriores, como el sistema de dragado mas económico y eficaz en la actualidad, aunque la investigación en el tema es sorprendentemente escasa.

Es el sistema mas ampliamente utilizado en los Estados Unidos de Norteamérica, mientras en Europa todavía predomina la draga de cangilones.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de julio de 1990.

El dragado clásico por succión exige unos requerimientos muy fuertes en las características y materiales de construcción de las bombas centrífugas, para poder soportar el efecto abrasivo de las partículas sólidas que les llegan desde la tubería de succión mezcladas con agua, así como unas alturas de bombeo limitadas por la problemática de la aparición de la cavitación. Todo ello unido a la utilización de relativamente sofisticados equipos de agitación del fondo, elevación y transporte de las cabezas de arrastre y succión.

Estos problemas pueden solucionarse en gran medida con la aplicación al dragado, de los fundamentos de la succión inducida, de la que existen numerosos ejemplos en el campo de la minería, para la extracción de arenas, gravas, e incluso como sistema de renovación de aire, pero con unas condiciones muy concretas en cuanto a la carga útil.

Las ventajas primordiales del dragado por succión inducida en la tubería de impulsión del sistema, estriban en que la(s) bomba(s) centrífuga(s) succiona(n) agua limpia de arenas y sin problemas de cavitación bombeándola superficialmente, impulsándola hacia la tubería de descarga, que va provista de una boquilla que acelera el flujo en una zona en contacto con las arenas, que penetran en el conducto como mezcla agua-sólidos, por la succión inducida por el chorro proveniente de la(s) bomba(s).

Sin embargo, este sistema no ha trascendido lo suficiente debido a los escasos rendimientos obtenidos y a la complejidad del dispositivo de succión inducida, que dificulta su producción a escala industrial y encarece de nuevo el sistema de dragado.

La investigación que aquí se plantea tiene por objetivo el estudio en modelo reducido a diversas escalas geométricas, de una variante original de la succión inducida aplicada al dragado de fondos arenosos, con la incorporación de dispositivos venturi perforados en su garganta y situados del lado de la impulsión. Colocados en la zona a dragar, las bajas presiones que se producen en la garganta perforada (abierta al exterior), originarán una succión continua de las arenas, lo que constituye a priori, un método económico y efectivo de dragado a pequeña y mediana escala, pues con un elemento de

mas sencilla construcción, localización y operación, se consigue realizar la principal función de las bombas chorro: dragar sin dañar por abrasión las bombas centrífugas, que son los elementos vitales y mas caros del sistema.

La investigación se centra pues, en los estudios teóricos y experimentales para la determinación de los parámetros de diseño del sistema que maximicen el rendimiento, técnicas de organización y operación, y comparación con los rendimientos de la técnica del dragado clásico por succión.

El estudio tiene un marcado interés científico-técnico y social, pues el sistema original propuesto supone una simplificación drástica en el dispositivo de succión inducida, tanto en el conocimiento de su comportamiento teórico como en su utilidad práctica real, que es el principal problema de los dispositivos empleados en la actualidad, demasiado sofisticados para su construcción industrial, lo que ha reducido los sistemas en operación a unas pocas decenas en Estados Unidos, siendo prácticamente inexistentes a nivel comercial en Europa.

La aplicabilidad práctica de la investigación propuesta se centra en zonas costeras (puertos deportivos, dársenas, bancos de arenas,...), embalses, canales de navegación (zonas de esclusas), pudiendo constituir, por tanto, una solución beneficiosa por la economía de instalación, operación y mantenimiento, para los organismos públicos y privados responsables del funcionamiento de las infraestructuras hidráulicas antes mencionadas.

Los trabajos de investigación teórica, y experimental sobre modelos reducidos, se han llevado a cabo a lo largo de un año, en los Laboratorios de Hidráulica y Obras Hidráulicas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, por el equipo de la unidad de investigación departamental de «Diseño y Modelación de Obras Hidráulicas», y ha sido posible gracias a la financiación del mismo por parte de la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (DGICYT) del Ministerio de Educación y Ciencia, que aprobó la solicitud del correspondiente Proyecto en la convocatoria del

Programa Sectorial de Promoción General del Conocimiento de 1987, con el n.º de referencia PB87-0659.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

1. INTRODUCCION

Como ya se ha indicado anteriormente, la investigación se centrará en los estudios teóricos y experimentales que conduzcan a la determinación de los parámetros de diseño del sistema y de flujo, que maximicen el rendimiento del dispositivo de succión y el global de la instalación.

En cuanto al rendimiento del dispositivo de succión, de la bibliografía consultada se desprende que aquél asume diferentes valores dependiendo del uso de la bomba-chorro. Siguiendo a Silvester y Herbach, para fluidos de diferente densidad, el rendimiento del dispositivo de succión inducida es función de dos parámetros adimensionales:

Relación de flujos, $Q^* = \text{Caudal de descarga} / \text{Caudal de impulsión}$

Relación de energías, $H^* = \text{Energía añadida al fluido succionado}$

Energía utilizada por el fluido impulsado + energía añadida al fluido succionado

Así pues, el rendimiento operacional del dispositivo de succión inducida por venturi que se propone investigar, responderá a la expresión:

$$\eta_{op} = Q^* \cdot H^* = \frac{Q_3}{Q_1} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_1} \cdot \frac{H_3 \cdot \rho_m - H_E \cdot \rho_E}{(H_1 \rho_1 - H_3 \rho_m) + (H_3 \rho_m - H_E \rho_E)} =$$

$$\frac{Q_3}{Q_1} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_1} \cdot \frac{H_3 \rho_m - H_E \rho_E}{H_1 \rho_1 - H_E \rho_E} \quad (1)$$

2. EL FENOMENO FISICO DE LA SUCCION INDUCIDA

El dispositivo de succión que se propone insertar en la tubería de impulsión de la bomba centrífuga es un venturímetro clásico, es decir, una tobera convergente-

divergente intercalada en la corriente, dispositivo eficiente para la conversión de carga de presión en carga de velocidad (parte convergente) y viceversa (parte divergente). Así pues, en la zona de la garganta del venturi la carga de velocidad es máxima (sección menor) y la carga de presión es mínima, por lo que se dan las condiciones mas adecuadas para que, si existe un contacto con el exterior (en que la presión es mayor), se cree un movimiento por succión inducida, desde el exterior hacia el interior.

Si el sistema constituido por bomba centrífuga-tubería de impulsión-venturi perforado se dispone en el entorno de una zona a dragar, con el venturi en el fondo arenoso, debe crearse una succión de la mezcla arena-agua hacia la tubería de descarga, sin que afecte a la bomba centrífuga.

3. ANALISIS TEORICO DEL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DEL VENTURI DE SUCCION

La figura 1 muestra un esquema del venturi, con la zona de la garganta perforada, situando las perforaciones en secciones sucesivas, en un primer intento de obtener la forma geométrica óptima de succión inducida.

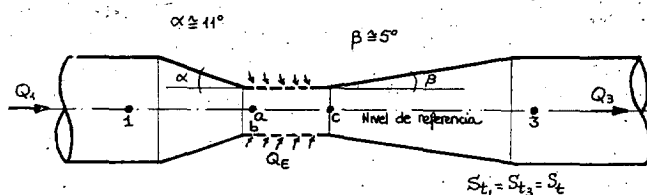


Figura 1.

Los principios básicos que rigen el comportamiento hidráulico de los flujos impulsado e inducido, son los de conservación de la masa (continuidad), conservación de la energía (Bernoulli) y conservación de la cantidad de movimiento.

Así, de la aplicación de la:

- 1) Conservación de la energía entre las secciones 1 y a,
- 2) Conservación de la energía entre las secciones c y 3,

3) Conservación de la energía entre el entorno exterior y la sección b (orificio de entrada a la garganta),

4) Ecuación de conservación de la masa entre las secciones 1 y 3,

5) Condición de presión hidrostática en la zona de la garganta (y en particular en la sección a),

6) Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento en el volumen de control de la figura 2,

podemos llegar a establecer el rendimiento operacional (1) del diseño propuesto para la succión inducida, como:

$$\eta_{op} = \frac{Q_3}{Q_1} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_1} \cdot \frac{HREL}{(1 + HREL)} \quad \text{HREL} = \frac{(Kc+1) \cdot \frac{Q_1^2 \rho_1}{2g Sg^2} - (K_E + 1) \cdot \frac{Q_E^2 \rho_E}{2g S_0^2}}{(Kc+1) \frac{Q_1^2 \rho_1}{Sg S_0^2} + (Kd-1) \frac{Q_3^2 \rho_m}{Sg S_0^2} + \frac{Q_3^2 \rho_m - Q_1^2 \rho_1}{g S_0^2} + \frac{Ff}{g Sg} - \frac{\rho_E Q_E^2 + \rho_E S_0^2}{g S_0 Sg} \cos \theta}$$

es decir, una función de un conjunto de parámetros geométricos, del fluido y del flujo, a partir del cual se ha realizado un análisis experimental y estudio de sensibilidad, para establecer el diseño óptimo con

respecto al rendimiento del dispositivo y global de la instalación.

4. ADIMENSIONALIZACION

Para independizar el problema de los valores particulares de los parámetros geométricos y del flujo, con la consiguiente generalización en la aplicabilidad de las ecuaciones obtenidas, se ha recurrido a la herramienta matemática de la adimensionalización.

Así, en la investigación que nos ocupa, podemos expresar definitivamente el rendimiento buscado, en forma adimensional, como:

$$HREL + \frac{(Kc+1) \left(\frac{Q_1}{Q_E} \right)^2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_E} \right)^2 \left(\frac{S_0}{Sg} \right)^2 (K_E + 1)}{(Kc+1) \left(\frac{Q_1}{Q_E} \right)^2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_E} \right)^2 \left(\frac{S_0}{Sg} \right)^2 + (Kd-1) \left(\frac{Q_3}{Q_E} \right)^2 + \left(\frac{\rho_m}{\rho_E} \right)^2 \left(\frac{S_0}{Sg} \right)^2 \left(\frac{Q_3}{Q_E} \right)^2 + \left(\frac{\rho_m}{\rho_E} \right)^2 \left(\frac{S_0}{Sg} \right)^2} \dots$$

que hemos escrito en lenguaje de programación FORTRAN para realizar un análisis de sensibilidad más exhaustivo y rápido mediante ordenador.

5. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARAMETROS ADIMENSIONALES

La expresión del rendimiento es función de un conjunto de parámetros adimensionales cuya influencia individualizada se pretende estudiar. Como paso previo, debemos conocer los valores correctos de los coeficientes de pérdidas en el estrechamiento (Kc), en la succión (Ke) y en el ensanchamiento (Kd). Este proceso de calibración del modelo matemático, sólo puede llevarse a cabo mediante valores obtenidos experimentalmente en un prototipo o modelo físico a escala geométrica no distorsionada.

Así pues, se ha procedido a construir, en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento

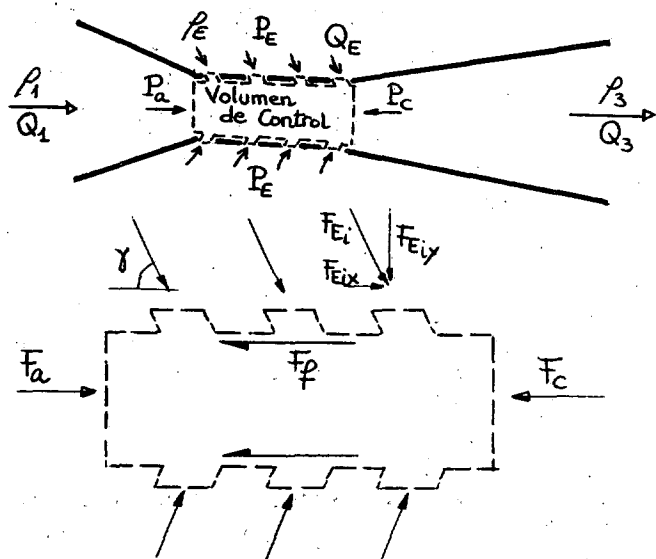


Figura 2.

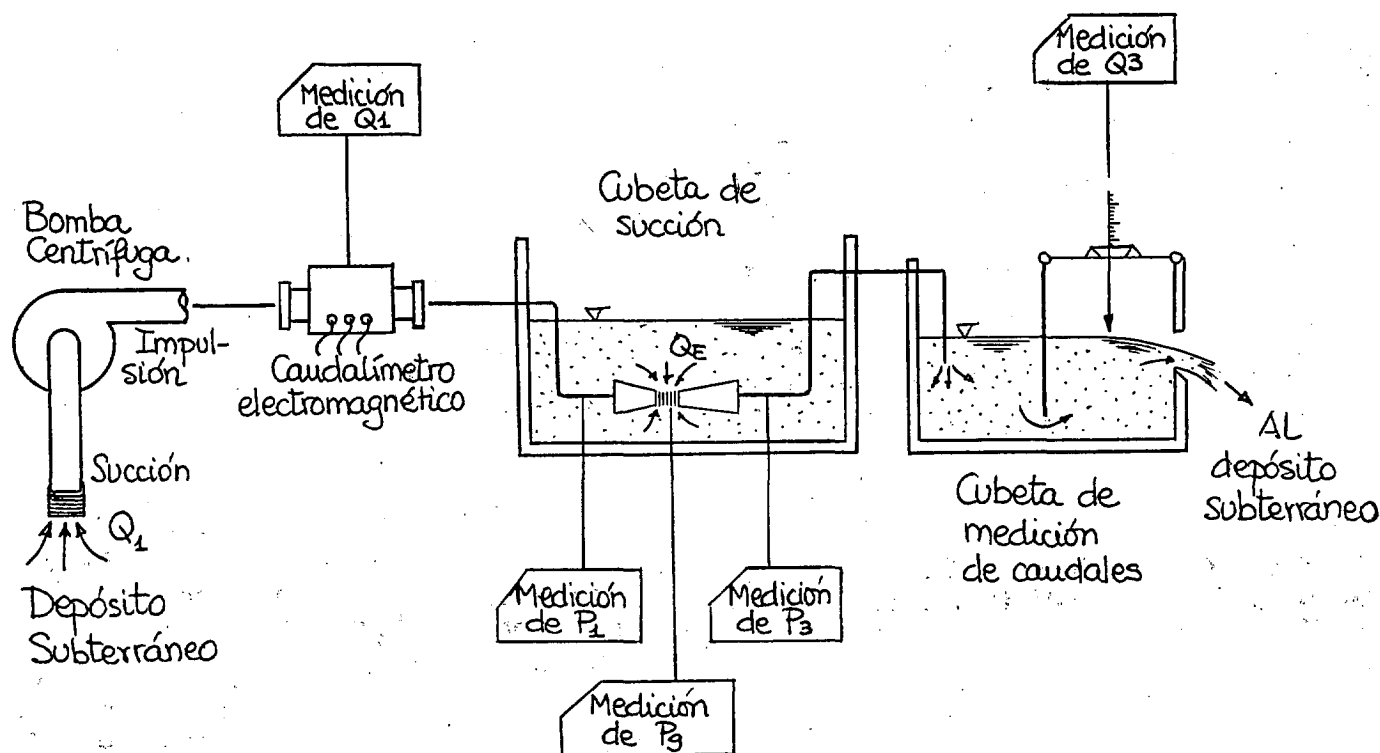


Figura 3.

mento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, un circuito hidráulico de ensayos, constituido por una moto-bomba centrífuga eléctrica semiportátil, que succiona agua de un depósito subterráneo y la impulsa, tras ser aforada con precisión mediante un caudalímetro electromagnético, hasta una cubeta donde se ubica un venturi con las características del diseño propuesto, al que se le han incorporado en las secciones claves, distintos dispositivos para la lectura de las presiones actuantes (transductores de presión manómetros diferenciales de mercurio-agua y aire-agua, manómetros metálicos, todos ellos previamente calibrados con los equipamientos al efecto disponibles en el Laboratorio.

Los caudales impulsado y succionado se llevan, a través de la tubería de descarga, hasta una segunda cubeta, donde se realiza una segunda medición de caudales mediante un vertedero triangular en pared delgada, aguas abajo del cual existe un canal receptor y de transporte de aquellos, hasta el depósito subterráneo, cerrándose el circuito hidráulico (fig. 3).

5.1. Conclusiones

Los análisis teórico-experimentales efectuados hasta este punto con el diseño propuesto de succión inducida con un venturi perforado en su garganta por sucesivas hileras de orificios en su perímetro, permiten extraer un conjunto de conclusiones, que conviene tener en cuenta antes de continuar. Son las siguientes:

- El ángulo de succión óptimo es de 0° con respecto al eje del venturi. Dicho ángulo no puede conseguirse con este diseño, que permite la succión en el rango $[30^\circ, 90^\circ]$.
- La determinación experimental de los valores y funciones de calibración de los coeficientes K_c y K_d se encuentran dentro de los límites estadísticos de confianza.
- La determinación experimental del coeficiente K_e queda condicionada por la conclusión a), pero además, para el rango válido de ángulos de succión, los resultados experimentales no permiten extraer función de calibración alguna. Si acaso, ello puede

ser posible para el caso de $SOG = 0.45$ y $SOG = 0.79$, que corresponden a una situación de orificios en la parte anterior de la garganta del venturi (una y dos hileras de orificios, respectivamente), lo que contribuirá por otro lado, a una mejor consecución del flujo paralelo (una de las condiciones de funcionamiento expuestas anteriormente) en la garganta.

Estas conclusiones aconsejan modificar la ubicación y forma de la sección de succión de la garganta, para acercarnos a unas condiciones óptimas de funcionamiento del venturi de succión.

6. SEGUNDO DISEÑO DEL VENTURI DE SUCCION. CARACTERISTICAS FISICAS

El nuevo diseño se aprecia en la foto 1 y se esquematiza en la figura 4. Responde a las indicaciones de las conclusiones anteriores, ya que:

* Se ha prolongado la zona convergente del venturi disminuyendo su sección final,

formando una boquilla de menor diámetro que la garganta que se prolonga en un pequeño tramo de sección constante, para provocar la entrada del fluido succionado paralelamente al eje de la garganta ($\gamma = 0^\circ$).

* Se ha concentrado la zona de succión en la parte anterior de la garganta, tal como parecen sugerir los resultados del análisis de Ke.

* Se ha aumentado la longitud de la garganta para permitir una zona de mezcla de flujos (impulsado y succionado) y de consecución de movimiento paralelo en aquella. Este aumento viene impuesto por la incorporación de la boquilla, que al disminuir la sección de paso, aumenta la velocidad del chorro, necesitando una mayor longitud para adaptarse a la nueva sección.

* Este aumento de velocidad que provoca la boquilla, implica una disminución más fuerte de la presión en la zona de succión, por lo que es de esperar mayores caudales succionados, con lo que aumentaremos los valores de $QE1$ y con ello la cantidad de sólidos incorporados a la acción del dragado inducido.

7. ANALISIS TEORICO DEL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DEL SEGUNDO DISEÑO DEL VENTURI DE SUCCION

Las leyes físicas que condicionan el comportamiento hidráulico del segundo diseño del venturi de succión son las ya establecidas para el primer diseño, con ligeras variaciones en la estructura de las ecuaciones. Siguiendo, pues, un proceso análogo, y tras la adimensionalización, llegamos a la expresión de HREL:

$$HREL = \frac{(K_c + 1) \cdot Q1E^2 \cdot D1E \cdot SOB^2 \cdot (K_e + 1)}{(K_c + 1) \cdot Q1E^2 \cdot D1E \cdot SOB^2 + (K_a - 1) \cdot (Q1E + 1)^2 \cdot DME \cdot SOG^2 + \dots}$$

$$+ \{1/4 (D1E + DME) \cdot SOG^2 [Q1E^2 + (Q1E + 1)^2] + (Q1E + 1)^2 \cdot DME \cdot 2 \cdot SOG^2 \cdot \dots$$

$$\dots - 1$$

$$\dots - Q1E^2 \cdot D1E \cdot 2 \cdot SOG \cdot SOB \cdot 2 \cdot SOG \quad (4)$$

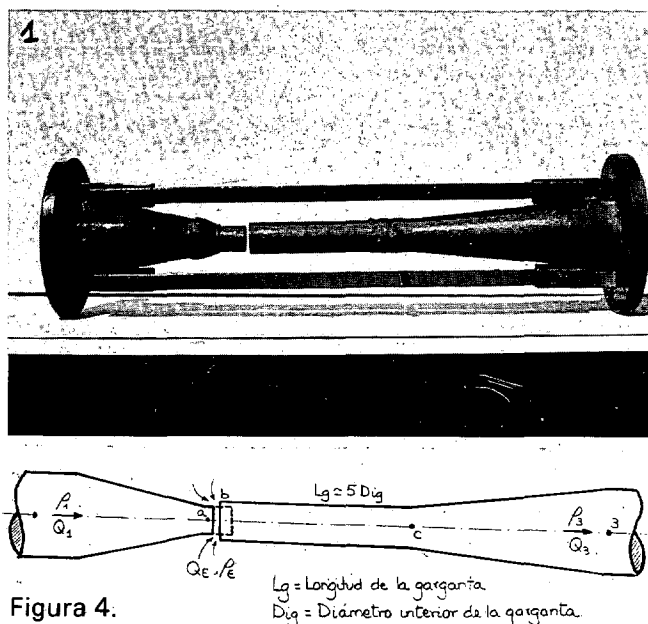


Figura 4.

Segundo diseño del venturi de succión.

Foto 1.—Situación final tras el montaje de las guías-rigidizadores, para posibilitar el estudio de distintas posiciones de la boquilla respecto a la garganta. Escala A.

Fig. 4.—Esquema descriptivo de las variables y puntos de medición y cálculo.

que se desarrolla en el programa VENTURA2. For cuya finalidad es la de describir las condiciones de funcionamiento y el rendimiento del venturi para distintos diseños a escala geométrica no distorsionada.

Para la calibración previa de los parámetros geométricos adimensionales no conocidos, se ha utilizado el mismo circuito hidráulico ya descrito y los mismos sistemas de medición y cálculo, en un proceso híbrido esquematizado en la figura 5.

Este proceso conduce a las funciones indicadas en la figura 6, que pueden ahora introducirse en el modelo matemático del comportamiento hidráulico del venturi de succión en forma de subrutina, con lo que para cada situación concreta tendremos el rendimiento del dispositivo diseñado en el dragado de sólidos, que es mayor que el del primer diseño.

Sin embargo, todavía quedan dos aspectos

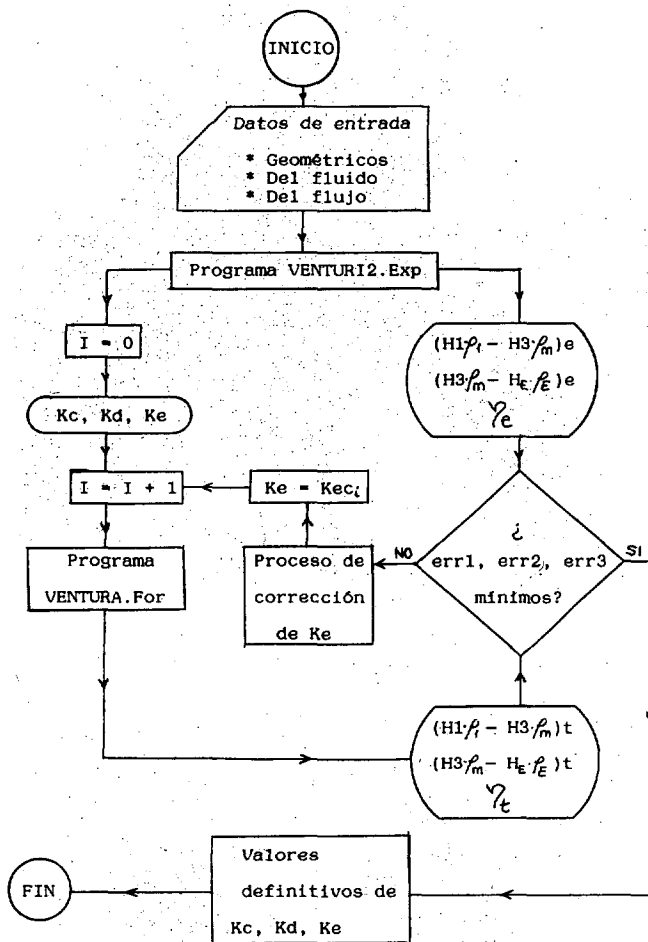


Figura 5.

SBG	SOG	Kc	r	Aproximación global
0.3002	0.6906	1.6485 + 0.3552 lnQ1	0.92	1.6148+0.3909lnQ1 r = 0.92
	0.8632	1.6536 + 0.3599 lnQ1	0.94	
	1.2948	1.5424 + 0.4575 lnQ1	0.92	
0.4691	0.4926	1.4455 - 3.629E-3 Q1	0.26	1.094 +0.2799lnQ1 r = 0.70
	0.5243	1.2348 + 0.2281 lnQ1	0.89	
	0.6673	1.2211 + 0.2342 lnQ1	0.95	
	0.7626	0.9204 + 0.4418 lnQ1	0.95	
0.6755	0.2787	1.2277 + 0.1282 lnQ1	0.93	1.0085+0.3118lnQ1 r = 0.68
	1.0133	0.8956 + 0.3988 lnQ1	0.95	
	1.5200	0.8727 + 0.4117 lnQ1	0.95	
	2.0266	0.6293 + 0.5616 lnQ1	0.97	

SBG	SOG	Kd	r	Aproximación global
0.3002	0.6906	3.481E-4 Q3 ^{2.2234}	0.70	-2.26E-2+5.97E-2lnQ3 r = 0.43
	0.8632	-8.707E-2+2.041E-2Q3	0.70	
	1.2948	-0.1485-0.9459Q3	0.46	
0.4691	0.4926	-0.1338+2.691E-2 Q3	0.98	-0.5123+6.0446E-2Q3 r = 0.65
	0.5243	-0.1965+3.1239E-2 Q3	0.96	
	0.6673	-0.7313+8.1238E-2 Q3	0.95	
	0.7626	-1.1268+0.1114 Q3	0.93	
0.6755	0.2787	-0.1701+1.9927E-2 Q3	0.95	-0.1641+0.01943 Q3 r = 0.91
	1.0133	-0.1697+1.9095E-2 Q3	0.96	
	1.5200	-0.1040+1.4739E-2 Q3	0.96	
	2.0266	-0.2080+2.2917E-2 Q3	0.96	

SBG	SOG	Ke	r	Aproximación global
0.3002	0.6906	3.2425 Qe ^{-1.1530}	0.99	7.2636 Qe ^{-1.2498} r = 0.63
	0.8632	3.9481 Qe ^{-0.8540}	0.97	
	1.2948	10.5650 Qe ^{-0.9355}	0.97	
0.4691	0.4926	2.5524 Qe ^{-0.8694}	0.95	5.4117 Qe ^{-1.162} r = 0.795
	0.5243	4.0952 Qe ^{-1.0284}	0.97	
	0.6673	5.3520 Qe ^{-0.1230}	0.96	
	0.7626	5.7994 Qe ^{-0.6757}	0.93	
0.6755	0.2787	4.3740 Qe ^{-1.114}	0.99	26.4713 Qe ^{-0.7468} r = 0.68
	1.0133	30.9507 Qe ^{-1.2625}	0.98	
	1.5200	69.4340 Qe ^{-1.378}	0.99	
	2.0266	173.2110 Qe ^{-0.781}	0.98	

Figura 6. Resultados de los análisis experimentales de Kc y Kd.

tos trascendentales por comprobar antes de sancionar la validez del modelo calibrado como herramienta descriptora del comportamiento hidráulico del venturi de succión. Estos aspectos son:

- La succión real de arenas.
- Los efectos de escala en el comportamiento hidráulico.

Para estudiar ambos efectos se ha diseñado un nuevo circuito hidráulico, capaz de simular situaciones de carga exterior mayores, y en el que se ha intercalado un venturi de succión semejante geométricamente al utilizado en los ensayos anteriores, a escala 4/3. Este circuito hidráulico se ubica en el Laboratorio de Obras Hidráulicas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

8. ESTUDIO DE LA SUCCION REAL DE ARENAS

Antes de proceder al estudio cuantitativo de la concentración de arenas en la succión y en la tubería de descarga, se han realizado unos ensayos previos para comprobar cualitativamente la existencia de la succión inducida de sólidos.

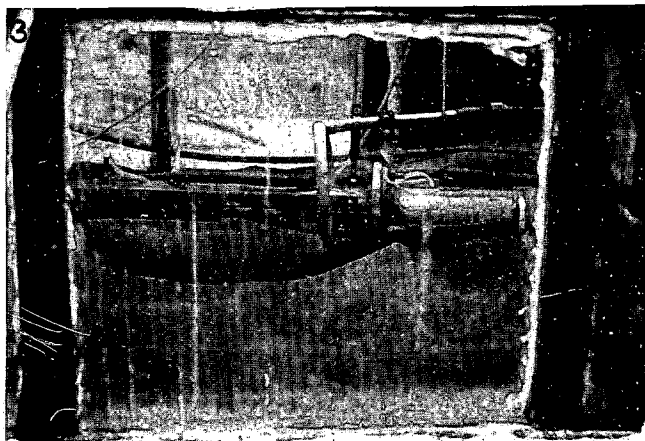
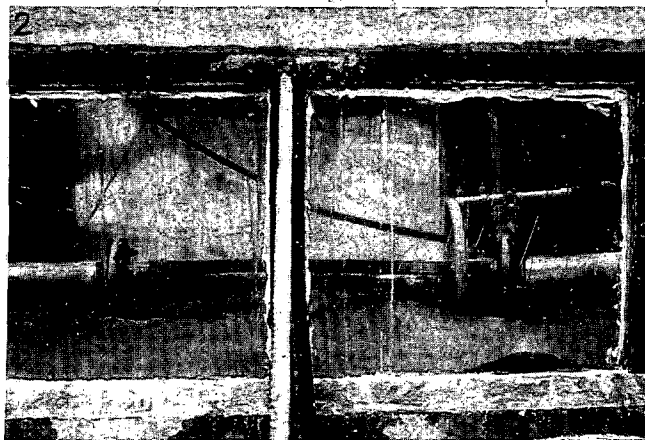
Las fotos 2 y 3 fueron tomadas durante estos ensayos. Las pruebas mostraron escasa succión de sólidos, aún con el dispositivo aspersor anular para levantar la arena del lecho y formar un entorno con sólidos en suspensión. La situación mostrada en dichas fotos dan, pues, una falsa impresión de succión, ya que en realidad el cono de depresión del lecho de arena corresponde, en gran parte, al lanzamiento

de la arena desde el centro del cono a los bordes del mismo, donde se acumula en forma de duna perimetral.

Ello motivó una nueva modificación en el segundo diseño del venturi para aumentar la succión de sólidos.

Las fotos 4 y 5 y fig. 7 muestran la modificación, consistente en una extensión de la parte anterior de la garganta, en dirección perpendicular al eje del venturi y dirigida hacia el lecho arenoso, localizando la succión exactamente en la zona adecuada. Este accesorio de succión respondió satisfactoriamente a las pruebas cualitativas de succión (fotos 6 y 7). Además, el diseño de éste accesorio no modifica en absoluto los desarrollos teóricos del segundo diseño.

A continuación procede el estudio cuanti-



Segundo diseño del venturi de succión. Escala B.

Vista en alzado del fondo de la cubeta de medición a través de los ventanales de metacrilato. Situación previa (Foto 2) y posterior (Foto 3) a la succión.

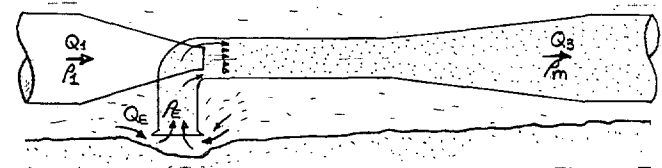
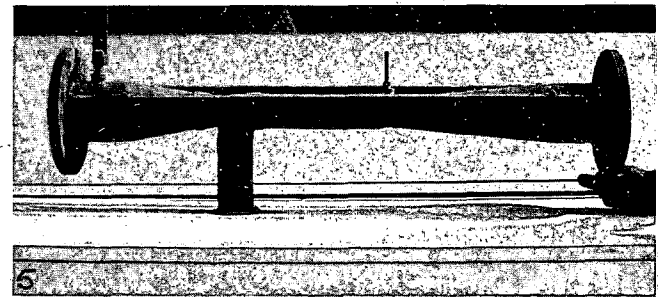
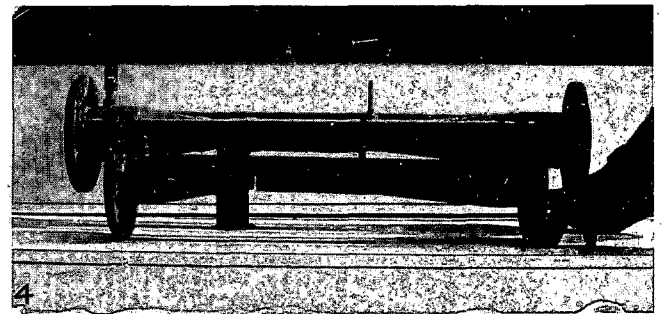


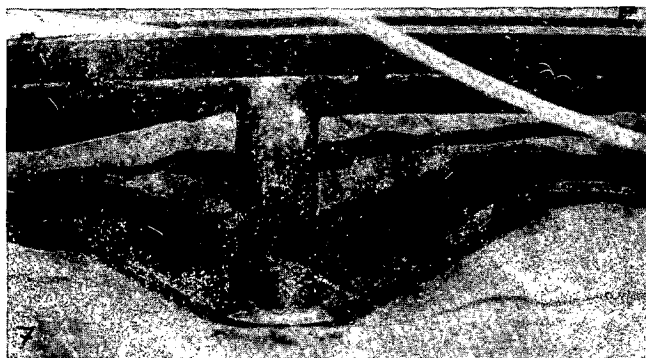
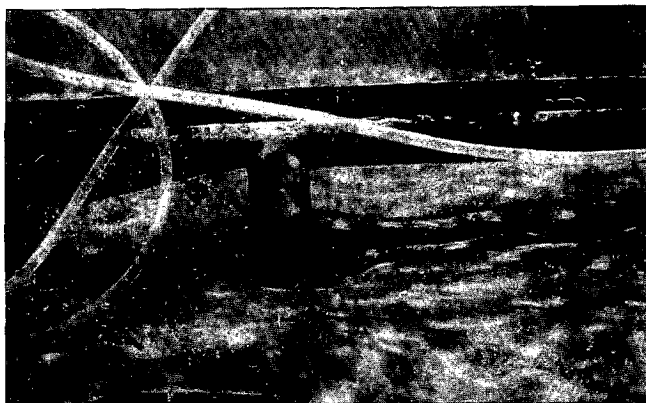
Figura 7.

Segundo diseño del venturi de succión. Escala B.

Foto 4.—Comparación de los venturis a escalas A y B = 4/3 A.

Foto 5.—Escala B. Modificación con la extensión de succión en la garganta.

Fig. 7.—Esquema de la succión a través de la extensión al efecto.



Fotos 6 y 7.—Segundo diseño del venturi de succión. Escala B. Funcionamiento satisfactorio de la extensión de succión de sólidos del fondo.

tativo de la succión, consistente en conocer las posibilidades concretas de dragado de sólidos. Ello se conocerá si llegamos a establecer la concentración de sólidos en la zona de succión (CE) y en la tubería de descarga (Cm).

En realidad, basta con conocer la concentración Cm en la tubería de descarga así como los caudales circulantes, para determinar la concentración CE.

En efecto, el proceso será:

- Determinar experimentalmente ρ_s , ρ_1 .
- Determinar experimentalmente ρ_m .
- Calcular Cm de: $C_m = (\rho_m - \rho_1) / (\rho_s - \rho_1)$ (5)

- Calcular $\rho_E = \rho_m (Q_{1E} + 1) - Q_{1E} \cdot \rho_1$ (6)

- Calcular CE de: $CE = (\rho_E - \rho_1) / (\rho_s - \rho_1)$ (7)

Para la determinación experimental de Cm, se ha diseñado un sistema de detección de la concentración de arena en la tubería de salida de salida, totalmente original. Resumiendo, se trata de un sistema emisor-receptor de haces de luz, instalados en los extremos opuestos de tres diámetros orientados en diferentes direcciones.

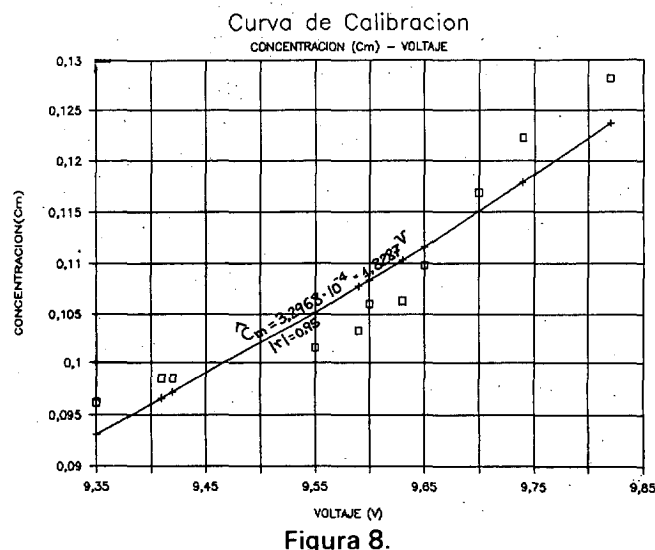
Las células que reciben los haces originales amortiguados por la turbidez del flujo circulante, transmiten las señales a un equipo receptor digital de voltaje asociado a la concentración Cm, también original y diseñado ex-profeso.

Este sistema será operativo en los sucesivos ensayos, si ha sido conveniente y previamente calibrado. El proceso de calibración consiste en obtener una curva (o tabla) que relacione los voltajes con las correspondientes concentraciones de sólidos en el flujo que determina aquellos valores. El resultado es la curva de la figura 8.

En ella podemos apreciar que, para los valores de caudal ensayados, las condiciones de concentración de sólidos en la tubería de descarga se encuentran en el intervalo [0.10, 0.13].

A partir de estas concentraciones, podemos obtener las correspondientes en la succión, CE, para cada uno de los experimentos realizados. La figura 9 resume los cálculos.

Como se desprende de la última columna, las características de diseño del dispositivo



Q1 (1/s)	Q3 (1/s)	ρ_m (54) (Tm/m ³)	Cm (51) (-)	Q1E (-)	ρ_E (52) (Tm/m)	C _E (53) (-)
12.48	18.075	1.178	0.1060	2.23	1.577	0.343
12.00	16.565	1.165	0.0985	2.63	1.602	0.357
11.50	15.840	1.161	0.0961	2.65	1.590	0.351
11.00	15.360	1.170	0.1015	2.52	1.601	0.357
10.50	14.905	1.165	0.0985	2.38	1.558	0.332
10.00	14.225	1.173	0.1033	2.37	1.585	0.348
9.50	13.565	1.178	0.1063	2.34	1.596	0.354
9.00	13.136	1.184	0.1098	2.18	1.587	0.349
8.50	12.714	1.196	0.1169	2.02	1.593	0.353
8.00	12.302	1.205	0.1223	1.86	1.588	0.350
7.50	11.897	1.215	0.1282	1.71	1.583	0.347

Kc(exp)	$\hat{K}_c$ (teor)	Kd(exp)	$\hat{K}_d$ (teor)
1.536	1.600	0.276	0.259
1.526	1.556	0.042	0.216
1.524	1.554	0.144	0.215
1.554	1.566	0.205	0.226
1.542	1.581	0.192	0.241
1.527	1.583	0.204	0.243
1.508	1.587	0.240	0.247
1.492	1.608	0.388	0.267
1.489	1.631	0.311	0.289
1.531	1.658	0.421	0.315
1.492	1.690	0.259	0.345

Figura 9.

de succión permiten, para el rango de caudales ensayados, un caudal de succión con una concentración de sólidos $CE \cong 0.35$ (concentración en volumen).

9. ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE ESCALA EN EL FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO

Nos resta, en este punto, comprobar que las funciones de Kc y Kd encontradas para el diseño de venturi a escala 3/4 del actual, siguen siendo válidas, es decir, que no se presentan efectos de escala en los parámetros geométricos.

La adimensionalización de las funciones Kc y Kd de la figura 6, conduce a las siguientes expresiones genéricas:

$$\hat{K}_c = 1,089 - 0,8196 \cdot SOG + (0,1451 + 0,449 \cdot SOG) \cdot Q31 \quad (8)$$

$$\hat{K}_d = 5,1692 - 12,8786 \cdot SOG + (-2,8653 + 7,7297 \cdot SOG) \cdot Q31 \quad (9)$$

En la figura 9 se comparan los valores empíricos y los obtenidos con (8) y (9), apreciándose la bondad del ajuste teórico obtenido para una determinada escala, con los obtenidos en ensayos de laboratorio, en otra escala geométrica.

La adecuación de los parámetros geométricos a las distintas escalas del diseño geométrico del venturi, permite la consideración de la validez genérica de la función teórica de Ke que obtengamos a partir de los resultados empíricos realizados con la extensión de succión. La función teórica obtenida es:

$$\hat{K}_e = 3,6753 - 5,9548 \cdot QE1 \quad (10)$$

La introducción de las funciones (8), (9) y (10) en el programa VENTURI2.For, conduce al programa de modelación matemática calibrado HAQ31.For.

10. RENDIMIENTO DEL DRAGADO DE ARENAS

La obtención del rendimiento del dispositivo diseñado para la succión inducida de arenas y sedimentos finos no cohesivos es el objetivo final de la presente investigación.

Hemos obtenido un modelo matemático que maneja parámetros adimensionales, de gran utilidad para determinar el rendimiento del venturi propiamente dicho, en función de un conjunto de parámetros y características (adimensionales en su mayoría) externos al dispositivo de succión.

Ello nos lleva a desarrollar este punto en dos fases: la primera, corresponderá a establecer la(s) tabla(s) y/o ábaco(s) de funcionamiento del venturi de succión, y la segunda, a establecer el proceso de determinación del rendimiento global de una instalación de dragado con succión inducida en la tubería de impulsión de una bomba centrífuga, mediante el venturi con la extensión de succión en la garganta.

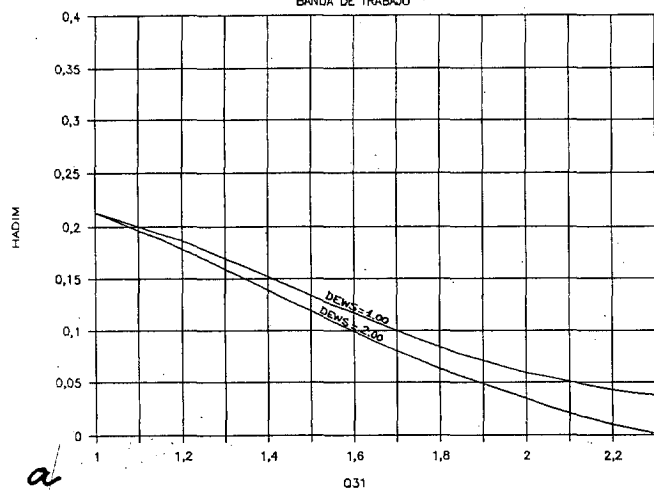
10.1 Rendimiento del venturi de succión

Para ello basta con realizar sucesivas

SISTEMA DE DRAGADO DE ARENAS MEDIANTE TUBOS VENTURI

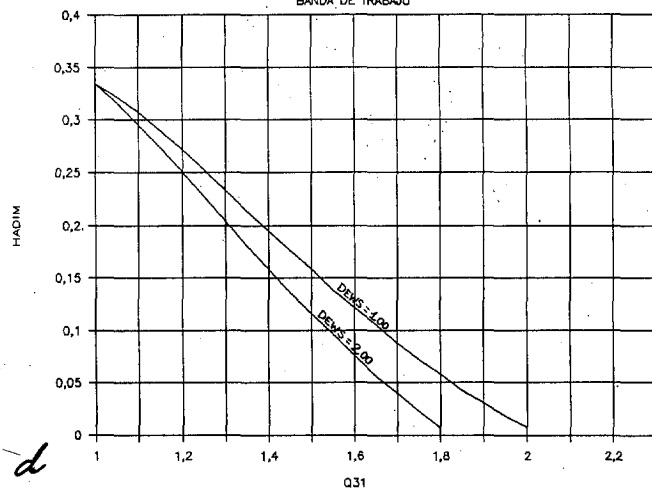
SBG = 0.20 DEWS ∈ [1.00, 2.00]

BANDA DE TRABAJO



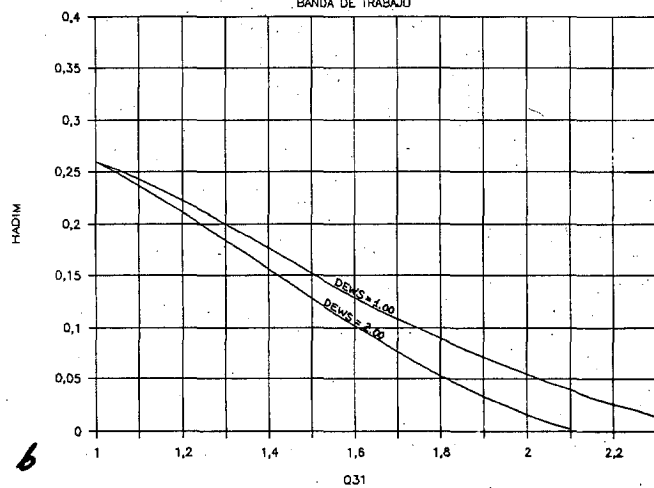
SBG = 0.35 DEWS ∈ [1.00, 2.00]

BANDA DE TRABAJO



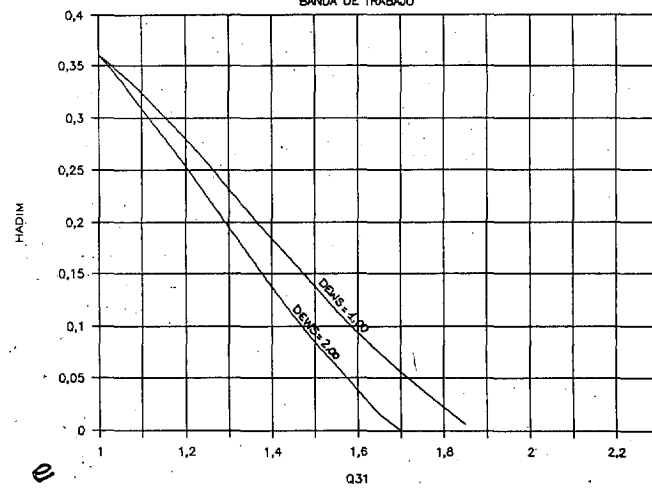
SBG = 0.25 DEWS ∈ [1.00, 2.00]

BANDA DE TRABAJO



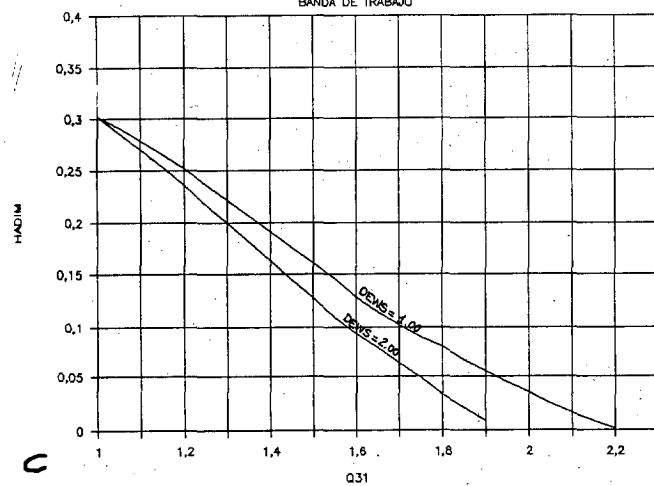
SBG = 0.40 DEWS ∈ [1.00, 2.00]

BANDA DE TRABAJO



SBG = 0.30 DEWS ∈ [1.00, 2.00]

BANDA DE TRABAJO



SBG = 0.45 DEWS ∈ [1.00, 2.00]

BANDA DE TRABAJO

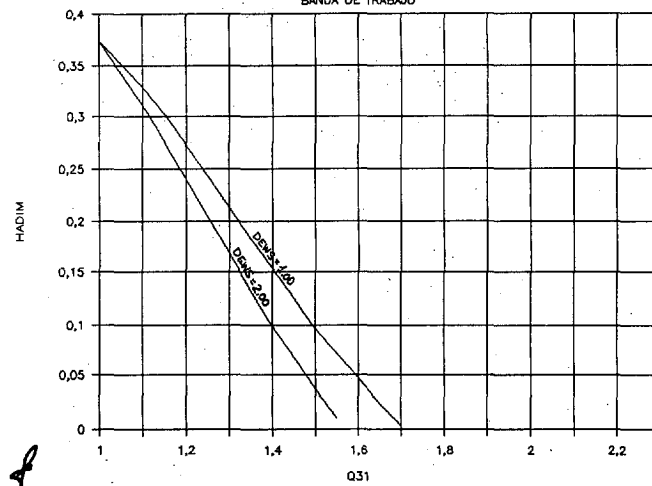


Figura 10.

pasadas del programa HAQ31. For, que abarquen los rangos factibles de los parámetros SBG, Q31, Ce, para obtener las tablas de los rendimientos esperados, del dispositivo de succión.

Así, en la figura 10 se muestran las bandas en que se encuentra los puntos de funcionamiento del venturi para los rangos SBG [0.20 -0.45] y DEWS [1.00 - 2.00].

La figura 11 muestra, por otra parte, las curvas de rendimiento para SBG [0.20 ; 0.45] y para un valor característico de la concentración en la succión de $C_e = 0.31$ (el encontrado experimentalmente para el dragado de arenas es de $C_e = 0.35$). En dicha curva se puede apreciar, prácticamente, la envolvente de las curvas de ren-

dimientos, la cual nos indica un rendimiento máximo en el rango práctico de funcionamiento ($Q_e \geq 0.20 Q_1$), de $\eta \approx 33 \%$.

10.2 Rendimiento global de la instalación de dragado por succión inducida mediante venturi.

Es evidente que el dispositivo de succión, en nuestra investigación el venturi perforado con extensión de succión inducida, es el elemento primordial que singulariza la instalación de dragado, pero también resulta evidente que existirá un conjunto de parámetros geométricos, del fluido y del flujo en el resto de la instalación, que harán mas o menos adecuado (o incluso inadecu-

Rendimiento Venturi de Succion

dews = 1.50 ($C_e = 0.31$)

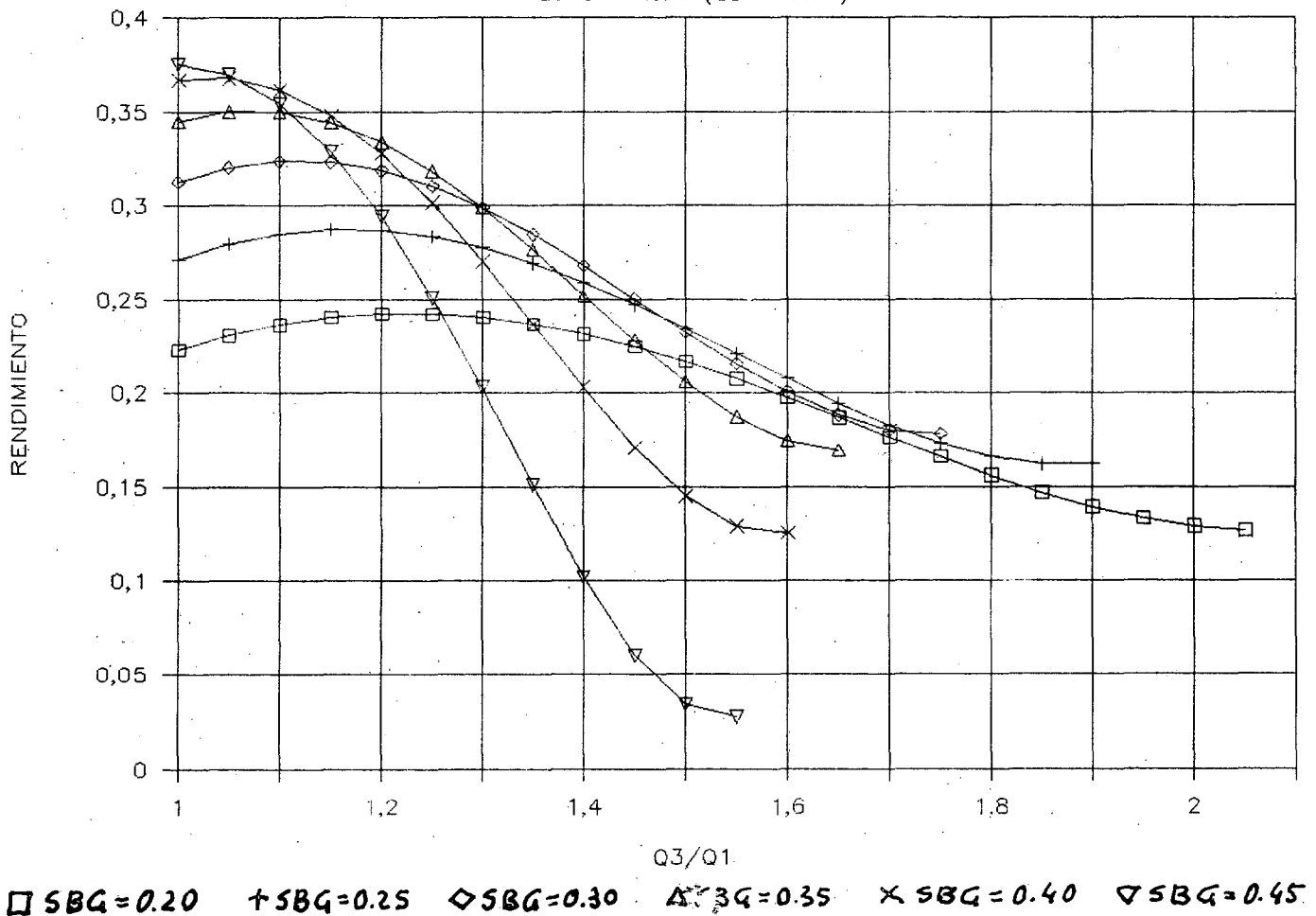


Figura 11.

cuado) este sistema propuesto para el transporte de sólidos, frente al sistema actual de succión directa a través de la bomba centrífuga.

Así pues, se ha confeccionado un modelo matemático que permite la determinación de los rendimientos globales de los dos tipos de instalaciones de dragado por succión que pueden ser competitivas, o dicho de otra manera, en qué casos una instalación de dragado por succión inducida en la tubería de impulsión de una bomba centrífuga mediante un venturi perforado en su garganta con una extensión de succión, empieza a ser económicamente rentable, frente a una instalación de dragado por succión directa de arenas a través de la bomba centrífuga.

Para establecer las conclusiones con respecto a la rentabilidad relativa de las dos instalaciones de dragado alternativas, es importante resaltar que las bombas centrífugas (b. c.) horizontales tienen unos rendimientos hidráulicos muy elevados, del orden del 80 %, siempre y cuando los líquidos bombeados carezcan de sólidos abrasivos. Ello podrá conseguirse pues, con el sistema de dragado por succión inducida, al succionar la b. c. agua limpia de sólidos (cercana a la superficie); en cambio, en la succión directa a través de la b. c., el rendimiento máximo en el trasiego de líquidos con sólidos en suspensión no supera el 60 %; además, el problema de la abrasión en los álabes y voluta limitan la concentración máxima de sólidos en suspensión en la boca de succión, a un 15 %.

Los parámetros que influyen decisivamente la bondad del sistema de dragado por succión inducida, son:

— La relación por cociente entre las secciones transversales de la boquilla y garganta $SB/SG = SBG$, cuyo valor óptimo es distinto según el caudal succionado, aunque la zona óptima se mueve en el rango [0.25 , 0.35]. Ahora bien, los casos con (SBG) opt. = 0.25 habría que descartarlos, bien por el escaso caudal sólido relativo ($C_m = 0.05$), bien por la escasa rentabilidad de la instalación (al igual que la clásica) y las restricciones de cavitación mas fuertes.

Así pues, se concluye como rango óptimo

para SBG el siguiente: [0.30 - 0.35].

— La velocidad de salida recomendable para una circulación adecuada de los sólidos por la tubería de descarga, se ha determinado a partir de las pruebas realizadas en los modelos reducidos en laboratorio, obteniéndose un mínimo de seguridad, de 2,0 m/seg.

— La cota de salida de la tubería de descarga (CSAL) tiene una gran importancia en el sistema de dragado por succión inducida, pues la energía de la bomba-chorro necesaria para conseguir los mismos resultados de succión, casi se duplica cuando la cota de salida sube tan solo 0.50 m., mientras que el efecto es cuantitativamente mucho menor en la succión directa.

Por tanto, el valor de CSAL debe mantenerse lo mas bajo posible. Se recomienda un valor de 0.50 m. respecto al nivel de la superficie libre en la zona de descarga.

— Este efecto multiplicativo de la energía resistente en el venturi de succión, se presenta igualmente si la longitud de la tubería de descarga aumenta, ya que en definitiva representa una cota física equivalente adicional a vencer. Si el aumento de longitud tiene lugar en la parte de tubería de impulsión aguas arriba del venturi, dicho efecto multiplicativo no se presenta; en cambio, el campo de validez de la succión inducida disminuye comparativamente si la longitud de impulsión aguas abajo del venturi aumenta. Así pues, si la tubería de impulsión debe prolongarse, el aumento de longitud aguas arriba del venturi es ligeramente favorable a la instalación aquí investigada.

En cuanto a los diámetros de las conducciones, hay que supeditarse a las tipologías comerciales de las mismas y de las b. c., aunque siempre es posible acoplar sendos dispositivos de ampliación o reducción de sección. En cualquier caso, podemos concluir:

— La conveniencia de mantener una velocidad mínima en la tubería de salida, sea cual sea el diámetro, implica que a mayor diámetro tendremos mayores caudales impulsados y succionados, y por tanto, mayor extracción de arenas.

— Para un mismo diámetro en la tubería

Cm	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15
SBG	RBC				
0.20	63.21	47.72	40.20	34.47	25.46
0.25	<u>67.35</u>	51.06	44.24	36.70	<u>25.96</u>
0.30	64.39	52.62	45.87	<u>36.84</u>	25.46
0.32	63.67	53.31	<u>46.05</u>	35.99	24.39
0.35	62.93	<u>53.40</u>	45.07	33.36	23.57
0.40	62.46	52.22	40.76	24.76	17.42
0.45	62.15	48.11	29.53	5.85	0
Q31	1.167	1.296	1.400	1.522	1.750
(Qs)r	1.0	1.6	2.0	2.4	3.0
Ze(m)	RBC				
3.0	35.51	41.83	39.19	33.96	25.93
4.0	<u>54.86</u>	<u>52.05</u>	46.09	38.26	27.77
5.0	102.74	65.79	<u>54.27</u>	42.92	29.56
6.0	>	85.27	64.09	<u>47.96</u>	31.31
7.0		114.99	76.13	<u>53.45</u>	33.01
8.0			91.22	<u>59.45</u>	34.68
9.0			110.71	66.02	36.30
10.0			>	73.25	37.89
11.0				81.25	39.43
12.0				90.16	40.95
13.0	Zona de aplicación del venturi de succión			100.12	42.42
14.0				111.35	43.87
15.0				>	45.28
16.0					46.66
17.0					48.01
18.0					<u>49.33</u>
19.0					50.62
20.0					51.89
Qs01.	286.95	459.12	573.91	688.69	860.86 T/hora

Figura 12.

de succión, a mayor diámetro en la tubería de impulsión, el campo de aplicación de la succión inducida aumenta respecto de la succión directa.

El análisis de la influencia de la profundidad de dragado en el campo de aplicación del venturi de succión, se ha llevado a cabo a partir de los valores cuasi-óptimos de los anteriores parámetros mediante el programa INSTALZE. A partir de dicho análisis se confecciona el cuadro de la figura 12 así como el ábaco de la figura 13, de los que se extrae la siguiente conclusión, de gran importancia en el proceso de toma de decisiones respecto de la instalación de dragado de arenas:

— Para las condiciones de concentración de sólidos en la tubería de descarga encontradas experimentalmente en laboratorio y esperadas a escala natural ($C_m \in [0.08 - 0.12]$), los puntos de funcionamiento del dragado por succión a profundidades iguales o superiores a 5 m. caen dentro del

campo de aplicación del venturi de succión, es decir, que para que con la instalación clásica de succión directa pudiéramos obtener la misma cantidad de sólidos dragados, sería necesario que la b. c. trabajara a un rendimiento hidráulico superior al máximo práctico por condiciones de paso de sólidos a través del rodete (60 %), lo que conlleva una menor potencia necesaria en la instalación de succión inducida (menores gastos de energía), así como una mayor vida económica de la b. c. (menores gastos fijos).

APENDICE I. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Fernández Bono, J.F., Fullana Serra, V. Sistema de dragado de arenas mediante tubos venturi perforados en su garganta como dispositivos de succión. Publicación III-89, 232 págs. (1989) Laboratorio de Diseño y Modelación de Obras Hidráulicas Departamentod e Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente Universidad Politécnica de Valencia.

APENDICE II. NOTACION

En este artículo se utilizan los siguientes símbolos:

C_E	Concentración de sólidos (en volumen)
DEWS	P_e/P_{ws}
Dg	Diámetro de la garganta del venturi
DME	ρ_m/P_e
D1E	ρ_1/ρ_e
Ff	Fuerza de fricción en el perímetro de la garganta
H	Energía por unidad de peso del fluido circulante
Kc	Coefficiente de pérdidas de carga por estrechamiento gradual entre las secciones 1 y a
Kd	Coefficiente de pérdidas de carga por ensanchamiento gradual entre las secciones c y 3
Ke	Coefficiente de pérdidas de carga en la entrada desde el exterior a la garganta, a través de los orificios
Lg	Longitud de la garganta del venturi
Q	Caudal

Figura 13. Gráfico de RBC equivalente (%) vs Q_3/Q_1 para diferentes alturas Z_e . O eixo Y representa o RBC equivalente em porcentagem, variando de 20 a 120. O eixo X representa a razão Q_3/Q_1 , variando de 1,1 a 1,7. O gráfico mostra curvas descendentes para alturas Z_e de 3,00 m a 15,00 m. Uma linha horizontal tracejada indica o RBC Limite em 50%. O campo de aplicação da sucção clássica é delimitado por $Q_3/Q_1 < 1,3$ e $RBC < 30\%$. O campo de aplicação do Venturi de sucção é delimitado por $Q_3/Q_1 > 1,3$ e $RBC > 30\%$.

Figura 13.

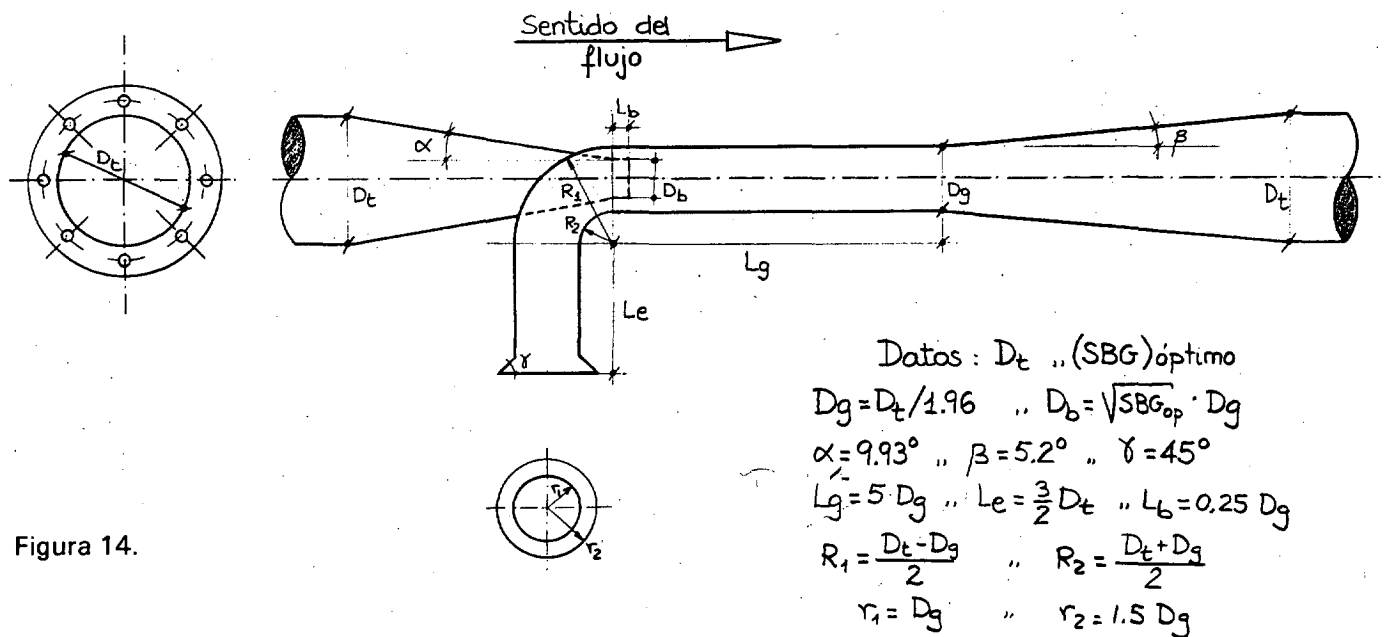


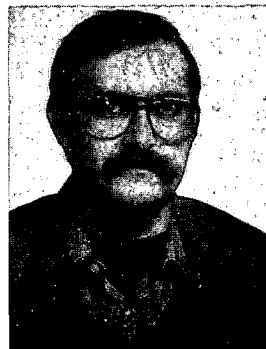
Figura 14.

Q1E	$Q1/QE = 1/QE1$
Q31	$Q3/Q1 = QE1 + 1$
RBC	Rendimiento de la bomba centrífuga a partir del cual el dragado por succión inducida de una determinada cantidad de sólidos, exige menor potencia de entrada que en el dragado por succión clásico.
RLDG	Lg/Dg
Sb	Sección de la boquilla en la garganta del venturi
Sg	Sección transversal de la garganta del venturi
So	Sección transversal de los orificios de succión
SOB	So/Sb
SOG	So/Sg
St	Sección transversal de la tubería de impulsión
Ze	Profundidad de dragado
γ	Angulo que forman la dirección de la succión y el eje del venturi
	Peso específico
ρ	Densidad
η	Rendimiento

Subíndices

(.)e	Entorno de la succión inducida
(.)m	Tubería de descarga, a. abajo del venturi
(.) ₁	Tubería de impulsión, sección de acceso al venturi
(.) ₃	Tubería de impulsión, sección de salida del venturi

Juan Francisco Fernández Bono



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, título obtenido en 1983 en la Universidad Politécnica de Valencia.

Desde 1979 viene desarrollando estudios, proyectos y trabajos de investigación en la áreas de la Hidráulica Fluvial, Crecida, Hidráulica Urbana, Modelación Física a escala reducida de Obras Hidráulicas.

Actualmente es profesor Titular Numerario del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, Director de los Laboratorios de Hidráulica y Obras Hidráulicas del citado Departamento y Responsable de la Unidad de Diseño y Modelación de Obras Hidráulicas.

Pascual Abad Moreno



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la E.T.S. de Ing. de Caminos, C. y P. de Valencia (1989), con Matrícula de Honor en el Ejercicio Final de Carrera.

Desde 1987 colabora regularmente, como becario, en diversos trabajos de investigación hidráulico-hidrológicos, en la Unidad de Diseño y Modelación de Obras Hidráulicas del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.