

# ¿Qué tan navegable es el lodo fluido?

Traducción y adaptación libre del artículo: “How Navigable are fluid mud layers?” (Kirichek, A. et al. 2018)

Revista Terra et Aqua<sup>1</sup>. No. 151. Verano 2018.

Disponible en: <https://www.iadc-dredging.com/article/how-navigable-are-fluid-mud-layers/>

Traducción: Juan Carlos Gómez López - Demco NV [juan.gomez@demconv.com](mailto:juan.gomez@demconv.com)

Revisión: Peteralv Brabers – Demco NV [pb.demco@telenet.be](mailto:pb.demco@telenet.be)

## Resumen

Este artículo da una visión general de la investigación que se ha llevado a cabo para obtener un mejor entendimiento de la navegación en puertos y en canales en los que existen capas de lodo fluido. El artículo realiza particularmente una revisión actualizada de los experimentos reportados a escala real que está acompañada por experimentos a escala y por modelación numérica. Esta combinación provee una invaluable mirada del comportamiento de los buques con respecto a diferentes condiciones de navegación y a las propiedades físicas del lodo fluido. Otro aspecto de este artículo contempla los métodos de levantamiento que pueden identificar y ubicar la capa de lodo fluido y potencialmente proveer información sobre las características de esta capa. Algunos de estos métodos fueron probados sobre lodo fluido formado por dragado con inyección de agua en el puerto de Rotterdam. Se concluyó que los nuevos métodos basados en la reología<sup>2</sup> mostraron un potencial para el entendimiento de las características de las capas de lodo fluido y más específicamente el interfaz entre lodo fluido y lodo sólido que representa el nivel real de la profundidad náutica. Finalmente, se discuten algunas preguntas abiertas de investigación sobre la seguridad de la navegación a través de la capa de lodo fluido.

---

<sup>1</sup> Con su lanzamiento en 1972 por la Asociación Internacional de Compañías de Dragado (IADC-International Association of Dredging Companies), Terra et Aqua es una publicación trimestral que anima a diseminar el conocimiento acumulado por los profesionales del dragado a nivel global, así como las soluciones de los asuntos que enfrenta la industria. <https://www.iadc-dredging.com/terra-et-aqua/>

<sup>2</sup> La reología es la rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia. También se define como la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

Presentado inicialmente como un artículo de investigación durante el 34° Congreso Mundial de PIANC en el 2018, este artículo ha sido publicado en una versión ligeramente adaptada con permiso del tenedor de los derechos de copia, PIANC<sup>3</sup>.

## Introducción

La navegación segura en puertos y canales debe estar asegurada por las autoridades respectivas<sup>4</sup>. Adicionalmente un buen registro de los índices de seguridad es de máxima importancia para la competitividad de los puertos. En medio de estas premisas, un factor de mayor relevancia para la navegación segura es el espacio que queda bajo la quilla del buque, conocido como UKC (Under Keel Clearance - profundidad bajo la quilla).

Se puede lograr suficiente UKC mediante el establecimiento de una restricción en el calado máximo permitido para los buques que ingresan al puerto o mediante el mantenimiento de la profundidad gracias a intensas operaciones de dragado en áreas sedimentadas. La primera opción es indeseable desde un punto de vista económico y podría resultar en restricciones a las naves que ingresan normalmente al puerto<sup>5</sup>. La segunda opción es favorable en general, sin embargo, el costo y el impacto ambiental del dragado que se requiere para disponer del lodo fluido es bastante importante.

El lodo fluido típicamente se deposita en el fondo del canal por el cual navega el buque cuando la rata de sedimentación neta es mayor que la rata de consolidación (*Winterwerp, J.C. & van Kesteren, W.G.M.,2004*). El lodo fluido forma "ríos" y depósitos sobre el lecho fluvial que se depositan y se consolidan en áreas de baja energía. El lodo fluido es una suspensión altamente concentrada de partículas de sedimento con limos microbianos. Esos limos pueden entenderse como una red de poli-electrolitos que mantienen las partículas de sedimento en suspensión, razón por la cual el lodo fluido puede entenderse como un fluido viscoso-elástico.

---

<sup>3</sup> PIANC es la Asociación Mundial para la Infraestructura del Transporte Acuático. <https://www.pianc.org/>

<sup>4</sup> En Colombia no existe una autoridad portuaria única bajo la concepción integral de otros países.

<sup>5</sup> El artículo hace mención al interés general de muchos puertos (tendencia del mundo marítimo) de recibir buques de mayor porte, pero más eficientes desde el punto de vista del consumo energético.

La navegación en puertos y canales que tienen lodo fluido sobre el lecho puede ser desafiante debido a varios factores. El lodo fluido no puede ser detectado de manera confiable por los métodos acústicos tradicionales. La interpretación de los datos acústicos medidos es ambigua en vista de que la posición del lecho sobre la carta acústica no es clara. Otro desafío para la navegación en áreas lodosas es la generación de ondas internas (ondulaciones). El control y la maniobrabilidad de un buque puede ser obstaculizada por tales ondas en el caso de un buque navegando en las cercanías de la interfaz agua-lodo. En particular la amplitud de las ondulaciones afecta el timón y la eficiencia de la hélice, lo que se ha observado tanto "in situ" como en experimentos de laboratorio.

En 1970, se identificó que las mediciones con sonar<sup>6</sup> no eran confiables en áreas con presencia importante de capas de lodo y por lo tanto no hay más información al respecto. Sobre la base de un experimento a escala real en el puerto de Rotterdam, en Bangkok y a lo largo de la costa de Surinam, se encontró que densidades superiores a  $1.200 \text{ kg/m}^3$  tenían una influencia tolerable en la maniobrabilidad del buque. La "profundidad náutica" se definió en concordancia con esto. La ilustración de este concepto se aprecia en la figura No. 1.

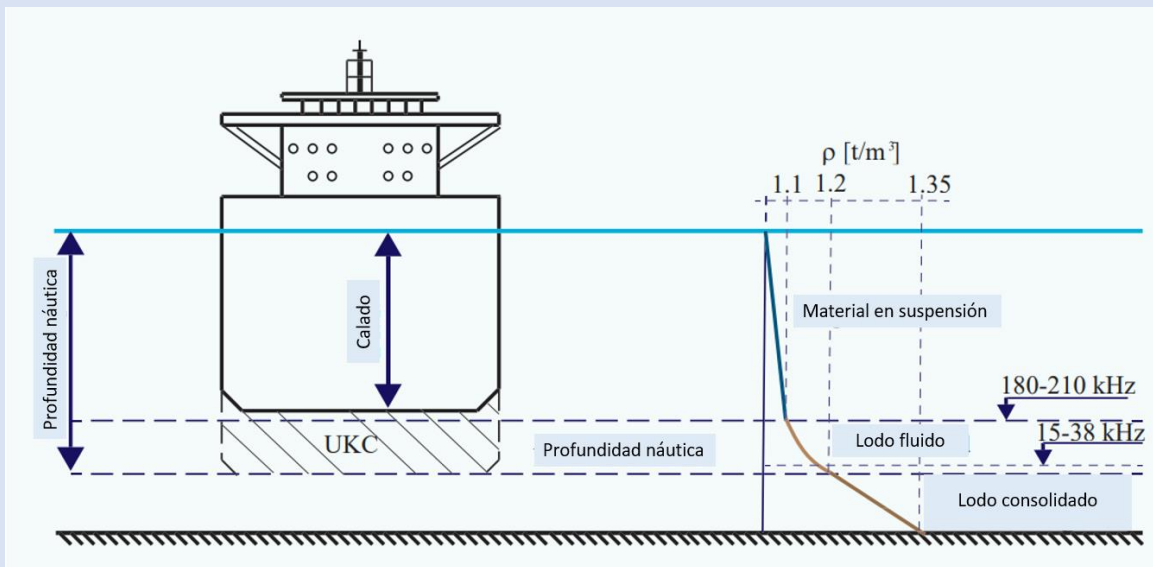


Figura 1 El concepto de la "profundidad náutica", el cual se establece a la densidad límite de  $1,2 \text{ t/m}^3$ . Diagrama adaptado de Nederlof, L. (1978).

<sup>6</sup> El sonar (del inglés SONAR, acrónimo de Sound Navigation And Ranging, 'navegación por sonido') es una técnica que usa la propagación del sonido bajo el agua (principalmente) para navegar, comunicarse o detectar objetos sumergidos. El sonar puede usarse como medio de localización acústica, funcionando de forma similar al radar, con la diferencia de que en lugar de emitir ondas electromagnéticas emplea pulsos sonoros

En 1980, se realizaron una serie de experimentos a escala real en el puerto de Zeebrugge. La interfaz agua-lodo, la cual se identificó mediante una ecosonda de alta frecuencia (180-210 KHz) se escogió como referencia para la estimación del UKC. Los experimentos se llevaron a cabo con UKC positivo y negativo que corresponden a los niveles por encima y por debajo de la profundidad a la cual se detectó la interfaz agua-lodo por parte de la ecosonda de alta frecuencia. Se concluyó que el lodo fluido con una baja densidad podría ocasionar cambios en el comportamiento náutico normal del buque, pero sin llegar a situaciones peligrosas. Junto con los resultados de estudios en un ‘tanque de pruebas por remolque’, los resultados de los experimentos a escala real llevaron a cambios del criterio de densidad para determinar la profundidad náutica, de 1.150 a 1.200 kg/m<sup>3</sup>. Véase la tabla No. 1.

Tabla 1 Criterios para la definición de la profundidad náutica. De McAnally, W.H. et al. (2007).

Port	Country	Criterion	Value	Dimension
Rotterdam	The Netherlands	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Zeebrugge	Belgium	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Bordeaux	France	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Nantes	France	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Saint Nazaire	France	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Dunkirk	France	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Avonmouth	the UK	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Yangtze	China	density	1250	kg/m <sup>3</sup>
Liang Yungang	China	density	1250-1300	kg/m <sup>3</sup>
Yianjing Xingang	China	density	1200-1300	kg/m <sup>3</sup>
Bangkok	Thailand	density	1200	kg/m <sup>3</sup>
Paramaribo	Suriname	density	1230	kg/m <sup>3</sup>
Emden	Germany	yield stress	100	Pa

Actualmente la siguiente definición de “profundidad náutica” se usa para efectos náuticos en áreas lodosas: **“La profundidad náutica es el nivel en el cual las características físicas del fondo alcanzan un límite crítico más allá, en el cual el contacto de la quilla del buque causa daños o efectos inaceptables en el control y la maniobrabilidad del buque”** (PIANC, 2014).

A diferencia de otros puertos, el puerto de Emden<sup>7</sup> usa el límite de elasticidad (“yield stress”)<sup>8</sup> como el criterio para identificar la profundidad náutica desde 2005 (Wurpts, R., 2005). En Emden

<sup>7</sup> Emden es una ciudad del noroeste de Alemania situada junto al río Ems a la altura de su desembocadura en el mar de Frisia.

<sup>8</sup> El límite de elasticidad es la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican tensiones superiores a este límite, el material experimenta un

el criterio adoptado por encima del cual el lodo fluido es navegable es el punto de 100 Pa (pascal = unidad de viscosidad - "Yield stress"). Se cree que este parámetro está relacionado con el método específico de dragado o con las propiedades del limo en este puerto. Aún queda por investigar cómo las propiedades de dragado afectan la composición del lodo y por lo tanto sus propiedades reológicas.

La visión general de los experimentos a escala real y a diferentes escalas, así como la modelación de navegación de buques en canales en los cuales hay presencia de lodo fluido pueden ser encontrados en Vantorre, M. (1994), Delefortrie, G (2008) and Delefortrie, G. & Vantorre, M. (2015). Este artículo suministra una discusión adicional sobre los métodos para el levantamiento que pueden ser empleados para monitorear las capas de lodo fluido.

## 1. Experimentos a escala real

El primer reporte de un experimento a escala real se llevó a cabo en el puerto de Rotterdam en 1975 (*Nederlof, L., 1978 and Nederlof, L., 1979*). El tanquero SS Lepton fue 'navegado' dentro del área Europort en Hoek van Holland<sup>9</sup>, entrando y saliendo del puerto. Durante las pruebas se registraron los datos de maniobrabilidad del buque y los perfiles profundidad/densidad. El espesor promedio de la capa de lodo fluido en el área investigada fue de 1.15 m. Las maniobras fueron realizadas con un UKC del 6% del calado del buque con respecto a la profundidad registrada por la ecosonda de 210 Khz.

A pesar de que los pilotos experimentaron 'dificultad' durante el ingreso del tanquero, una comparación de la maniobrabilidad del Lepton con la de otro tanquero ingresando al puerto mostró que en efecto no hubo más dificultad que con otros buques de gran porte, e incluso más fácil que con otros. Esta conclusión también se soportó por la medición de la velocidad del tanquero, el porcentaje máximo de timón disponible y la propulsión, los cuales fueron analizados durante el experimento.

---

comportamiento plástico con deformaciones permanentes y no recupera espontáneamente su forma original al retirar las cargas.

<sup>9</sup> Hoek van Holland, es una localidad que hace parte del complejo del puerto de Rotterdam, que se encuentra sobre uno de los brazos del río Rin y las costas sobre el mar del Norte.



*Figura 2 Imagen del tanquero SS Lepton el cual fue sujeto de investigación de los experimentos a escala real en el puerto de Rotterdam en 1974. En la imagen el SS Lepton cargado con agua entra al puerto de Rotterdam. Los observadores a bordo vigilaron cuidadosamente para advertir el comportamiento náutico del buque. El Lepton tiene 350 m de eslora, 55 m de manga, calado de 20,9 m. El promedio de profundidad bajo la quilla fue de 1,6 m y el promedio del espesor de la capa de lodo fue de 1,15 m. (Nederlof, L. 1979).*

Otro experimento con un buen reporte que se realizó a escala real fue el conducido en el puerto de Zeebrugge<sup>10</sup> entre los años 1986 y 1988. Diecisiete pruebas a escala real de tres tipos diferentes fueron llevadas a cabo con la draga de tolva de succión de arrastre Vlaanderen XVIII (van Craenenbroeck, K. & Vantorre, M., 1991). En la zona exterior del puerto de Zeebrugge se llevaron a cabo maniobras cortas con el propulsor (pruebas incrementando y disminuyendo la potencia), maniobras con potencia constante y pruebas de guiñada con el buque detenido mediante el uso de la hélice de proa. Las maniobras se desarrollaron con una profundidad bajo la quilla de -0,35 m a +3,0 m con respecto a la profundidad indicada por la ecosonda de 210 Khz. Se realizaron pruebas de rotación del buque con una profundidad bajo la quilla de -0,3 a -0,4 m. Durante las pruebas se confirmó la presencia de ondas internas en la interfaz agua-lodo. Una onda interna solitaria en popa fue detectada por la ecosonda de 210 Khz. Una onda interna de una amplitud de 2 m fue detectada por un buque de investigación durante el tránsito de un carguero OBO<sup>11</sup> de gran calado.

---

<sup>10</sup> Zeebrugge es una localidad de la costa belga perteneciente a la ciudad de Brujas.

<sup>11</sup> OBO es el acrónimo de Oil-Bulk-Ore, término empleado para identificar buques cargueros con capacidad de transportar tanto carga líquida como carga seca.

Se realizaron dos pruebas más en el puerto de Delfzijl<sup>12</sup> desde el 2013 hasta el 2015. La primera prueba fue llevada a cabo con el buque de carga general CSL Rhine con un UKC positivo del 14% y mayores con respecto a la interfaz agua-lodo que fue detectada con una ecosonda de 210 KHz. Los resultados mostraron que el comportamiento de la maniobra y la propulsión del buque fueron influenciados por la capa de lodo con un UKC menor al 18%. La segunda prueba fue llevada a cabo con la draga de tolva Geopotes-15. El UKC usado para la prueba fue entre -5% y +17% del calado con referencia a la profundidad de la interfaz agua-lodo detectada por la ecosonda de 210 kHz. Durante la prueba se concluyó que mientras se navegó con un UKC de +14% se causó menos perturbación con respecto a la interfaz agua-lodo que con el buque CSL Rhine con el mismo UKC. Se concluyó que la maniobrabilidad fue mucho más favorable con capas de lodo fluido de 2,5 m a 3,5 m de espesor en combinación con un UKC negativo que con un UKC positivo de 1% al 13%. Con un UKC del +10% al 20% el mismo buque produce ondas internas las cuales obstaculizan la hélice y el timón del buque debido a la baja viscosidad de la capa de lodo. Se reportó que las maniobras del buque estaban acordes con los estudios de la simulación realizada de manera paralela (*Verwilligen, J. et al, 2014 and Barth, R. et al., 2015*).

## 2. Experimentos a escala

Las pruebas de modelos a escala fueron desarrolladas para tener un mejor entendimiento de la maniobrabilidad de los buques en ambientes lodosos. Estas pruebas fueron acopladas a modelos matemáticos de maniobrabilidad para cuantificar el efecto de la capa de lodo en el control del buque. Los experimentos a escala con lodo real pueden ser problemáticos debido a los efectos del tiempo en el lodo (p.e. configuración y consolidación). Por lo tanto, se empleó un fluido denso y viscoso para imitar el lodo fluido en un sistema de dos capas. Las propiedades físicas de un lodo artificial (densidad y viscosidad) se seleccionaron para asemejarse a las condiciones del lodo fluido.

Una de las primeras pruebas realizadas a escala se llevó a cabo para investigar los efectos del lodo fluido en maniobras que se llevaron a cabo con un modelo a escala 1:82,5 de un tanquero que estaba equipado con timón y hélice, navegando sobre o en contacto con una capa de fluido denso (*Sellmeijer, R. & van Oortmerssen, G., 1983*). Se usó una mezcla de parafina clorada y queroseno para simular la capa de lodo fluido. Dos valores de densidad, 1.140 kg/m<sup>3</sup> y 1.240 kg/m<sup>3</sup>, fueron los valores seleccionados para simular las condiciones reales del lodo en el puerto de Rotterdam durante el invierno y el verano respectivamente. El espesor de la capa de lodo testeado varió entre 1,35 m y 3,85 m. Tanto el UKC positivo como el UKC negativo con respecto al nivel de la interfaz "agua-fluido denso" fueron probados cambiando el nivel del agua en el tanque de pruebas. Se llevaron a cabo dos tipos de experimentos:

---

<sup>12</sup> Delfzijl es una ciudad portuaria de los Países Bajos (Holanda) sobre el estuario del río Ems en el mar de Frizia (mar costero conexo al mar del Norte).



1. Desplazamiento libre del "modelo a escala" para evaluar el efecto total del lodo sobre las maniobras del modelo y
2. Experimentos 'cautivos' llevados a cabo para predecir maniobras estándar a través de modelos matemáticos<sup>13</sup>.

Se analizaron los efectos del lodo en el asiento dinámico ("squat") y en el trimado del tanquero. Se observó que el tanquero (a escala) se vuelve lento con UKC del 3 al 5% de calado por encima del fluido denso. Sin embargo, las reducciones realizadas a valores negativos del UKC hicieron al tanquero menos lento en sus maniobras. Además, la presencia de fluido denso en el fondo tiende a reducir el movimiento estable y a acelerar los movimientos dinámicos.

Una observación muy importante fue la formación de ondas internas en la interfaz "agua-fluido denso" cuando pasa un buque. La amplitud de estas ondas internas (ver figura No. 3) se incrementa con el espesor de la capa de fluido denso y con la reducción de la densidad del fluido y afectan la eficiencia de la hélice como se observó durante las pruebas de "desplazamiento libre".



Figura 3 Patrón de propagación de ondas internas en la interfaz "agua-fluido denso", para viscosidades de 0,0002 Pa s en la imagen de la izquierda y 0,03 Pa s en la imagen de la derecha. (Delefortrie, G. & Vantorre, M. , 2015). Pa s es la abreviatura de la unidad de medida de la viscosidad, Pascales segundo.

---

<sup>13</sup> Estos modelos matemáticos describen el movimiento del modelo a escala en un plano horizontal.



Una serie de pruebas con modelos a escala fueron llevados a cabo en un tanque de pruebas de olas con tanqueros modelados a escalas 1:100, 1:70 y 1:55 (Brossard, C. et al., 1991). Los modelos fueron equipados con sensores para medir el asiento dinámico (squat), el trimado y la fuerza tractiva<sup>14</sup>. La meta de los experimentos fue investigar la resistencia y las variaciones del asiento dinámico sobre una capa de lodo artificial compuesta. La capa de lodo estudiada presentó gradientes<sup>15</sup> de densidad en función de la profundidad. Tres tipos de lodos fueron evaluados: con bajo gradiente de densidad, con gradiente de densidad intermedio y con alto gradiente de densidad. Las capas de lodo con diferentes valores de fluencia fueron usadas en el estudio. En este estudio se observó la presencia de ondulaciones en la interfaz agua-lodo.

Las pruebas de modelos autopropulsados fueron llevadas a cabo con modelos a escala de un tanquero de GNL<sup>16</sup> y de una draga de tolva guiados a lo largo de un carril sobre un sistema agua-lodo con una capa de lodo fluido denso. Se observó un comportamiento inestable del timón y poca eficiencia de la propulsión esto debido a una combinación de un UKC inicial, efectos del asiento dinámico y ondas internas sobre la quilla del buque que ocasionaron su contacto con ambos fluidos. (Vantorre, M. & Coen, I., 1988).

Una serie de experimentos cautivos fueron realizados mediante diferentes maniobras simuladas (Delefortrie, G. et al., 2005). Durante las pruebas se midieron los componentes de fuerzas laterales y longitudinales, movimiento vertical, parámetros del timón, y parámetros de la hélice. Una mezcla de parafina clorada y petróleo fue empleada para imitar el lodo. Fueron desarrollados modelos matemáticos para maniobras de buques con diferentes tipos de fluidos de densidades de 1.100 a 1.250 kg/m<sup>3</sup> y viscosidades<sup>17</sup> de 0,03 – 0,46 Pa, capas de fluido denso con espesores de 0,75, 1,5 y 3 metros; modelos a escala 1:80 y 1:75, navegación con un UKC de -12% a +21% relativo a la interfaz "agua-fluido denso", y con velocidades entre 2 nudos en marcha atrás y 10 nudos marcha adelante.

---

<sup>14</sup> La fuerza tractiva, fuerza de corte o fuerza de arrastre, en hidráulica, es la fuerza que produce un flujo de agua ya sea en un canal o en una tubería, en el fondo del canal o en la generatriz inferior de un tubo. Esta fuerza tenderá a arrastrar materiales que se encuentren eventualmente depositados en el fondo.

<sup>15</sup> Variación de una magnitud en función de la distancia.

<sup>16</sup> Gas Natural Licuado.

<sup>17</sup> En realidad, corresponde a valores de viscosidad dinámica  $\mu$  que relacionan el esfuerzo o tensión local en un fluido en movimiento con la deformación de las partículas fluidas. La viscosidad de un fluido es la resistencia a que distintas láminas deslicen entre sí. Se mide en Pascal-segundo.

### 3. Métodos de Monitoreo

Tradicionalmente, los reflejos de las señales acústicas se usan para determinar la interfaz entre el agua y el lecho (el fondo del cuerpo acuático). El pulso acústico emitido se propaga a través de la columna de agua y se refleja desde el fondo. La distancia desde la fuente acústica hasta la superficie sobre la cual se refleja es proporcional al tiempo que tardan las ondas acústicas en la columna del agua. En áreas de navegación de fondos lodosos se emplean diferentes frecuencias para la emisión de la señal. Las bajas frecuencias (15-38 kHz) y las altas frecuencias (180-210 kHz) usadas de manera estándar son señales usadas para proveer información acerca de la ubicación de la interfaz "agua-lodo fluido" ("lutoclina") y de la interfaz "lecho-lodo fluido" respectivamente. La primera interfaz típicamente exhibe un fuerte contraste. La segunda interfaz usualmente es inconsistente debido a un débil gradiente de densidad al interior de la capa de lodo fluido lo que juega un importante papel en la reflexión de las señales acústicas emitidas (Kirby, R. et al., 1980). Es por ello, que se han propuesto otras técnicas de medición para monitorear la interfaz "agua-lecho" en áreas de fondos lodosos. Estas técnicas típicamente se basan en la física de la dispersión<sup>18</sup> y la radiación gama transmitida, la retrodispersión acústica y óptica o a través de dispositivos mecánicos. Uno de los métodos más precisos hasta ahora existentes es el que se basa en la dispersión y la radiación gama transmitida. Este método nuclear es típicamente empleado para determinar la densidad de la columna de agua. Todos los métodos no-acústicos tienen varios inconvenientes comunes. Debido a la naturaleza de los perfiladores, la resolución espacial de estas herramientas está limitada a 1 dimensión para el perfil vertical (ver figura 4). Por lo tanto, la interpolación entre las mediciones para obtener un mapa espacial generalmente se hace mediante la combinación de esos métodos con sondeo acústico. Otra desventaja importante de estos métodos es la naturaleza intrusiva del levantamiento. Las herramientas de medición tienen que estar en contacto directo con la capa de lodo fluido para proveer una caracterización cuantitativa.

---

<sup>18</sup> Fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material.

MEDICIONES DE DENSIDAD EN LAS POSICIONES G Y H DURANTE LA LLEGADA Y SALIDA DEL "LEPTON" RESPECTIVAMENTE (12-04-1975)

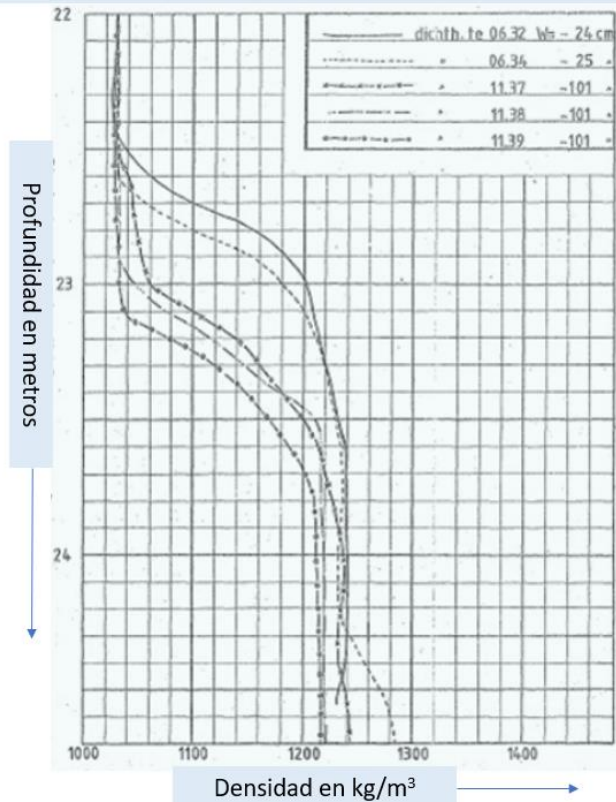


Figura 4 Diagrama de los cambios temporales de los perfiles de densidad durante el experimento a escala real del SS Lepton en 1975. (Rijkswaterstaat, 1977).

Incluso se ha reconocido que los métodos de levantamiento que están basados en parámetros reológicos son los más ajustados para propósitos náuticos. La medición "in situ" de esos parámetros es una tarea desafiante. Dos estrategias se pueden encontrar para determinar tales parámetros. La primera es que las muestras son tomadas "in situ" y analizadas en el laboratorio. La segunda es el uso "in situ" de los instrumentos. Ambas estrategias se discuten más adelante.

## 4. Laboratorio

Las propiedades reológicas pueden ser determinadas de manera rutinaria en el laboratorio, por ejemplo, las pruebas tipo paleta o los reómetros rotacionales. Estos métodos de laboratorio miden la resistencia a fluir de las muestras del 'lodo fluido' en respuesta a fuerzas cortantes que le son aplicadas. Esto se puede lograr cuando se controla la rata de corte  $\dot{\gamma}$ , o el estrés de corte  $\tau$ , el cual arroja las curvas de flujo para las diferentes muestras de lodo (ver figura No. 5). Dos

comportamientos mecánicos del lodo se pueden deducir de una curva de flujo tradicional: elástico y viscoso.

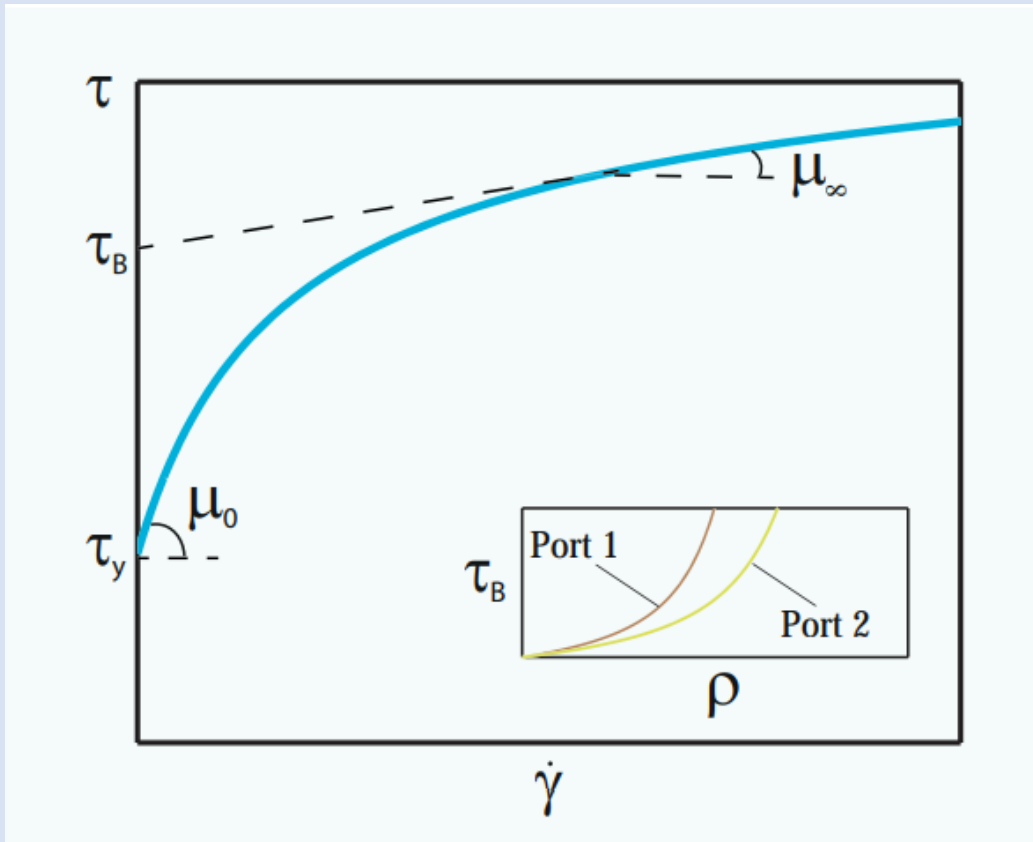


Figura 5 Diagrama de la curva de flujo con parámetros reológicos.  $\dot{\gamma}$  (gamma) corresponde a la tasa de corte,  $\tau$  (tau) corresponde al estrés de corte.

El comportamiento elástico es normalmente observado a muy bajas tasas de esfuerzo cortante. Tan pronto como la estructura del suelo se debilita, el lodo empieza a fluir presentando un comportamiento viscoso. En este estado mecánico las deformaciones responden a la tasa de deformación. El estrés de corte al cual esta estructura del suelo empieza a deformarse (o a fluir) es normalmente conocido como el límite de elasticidad ("yield stress"). Normalmente el límite de elasticidad  $\tau_y$  y la viscosidad dinámica  $\mu_\infty$ , pueden ser obtenidas para diferentes muestras de lodo de las curvas de flujo medidas. Se requieren dos parámetros adicionales para reconstruir la curva de flujo completo: el estrés de Bingham  $\tau_B$  y la viscosidad inicial diferencial  $\mu_0$ . Como se puede observar en la figura No. 5, a un valor dado de densidad no necesariamente corresponde un único valor de fluencia. Esto implica que la relación entre densidad y parámetros reológicos debe ser cuidadosamente estudiada con el fin de evaluar el mejor conjunto de parámetros requeridos para caracterizar la profundidad náutica.

Debido a la complejidad del lodo fluido, los valores del estrés de corte presentan una relación no lineal con la densidad  $\rho$ . Esto puede ser explicado por el comportamiento tixotrópico<sup>19</sup> (deformación, historia y tiempo de dependencia) que se ilustra en la figura No. 6. Por lo tanto el muestreo y los procedimientos de medición, seguidos por el procesamiento de datos y la interpretación de las mediciones deben ser estandarizados con el propósito de reconocer protocolos prácticos (Claeys, S. et al., 2005).

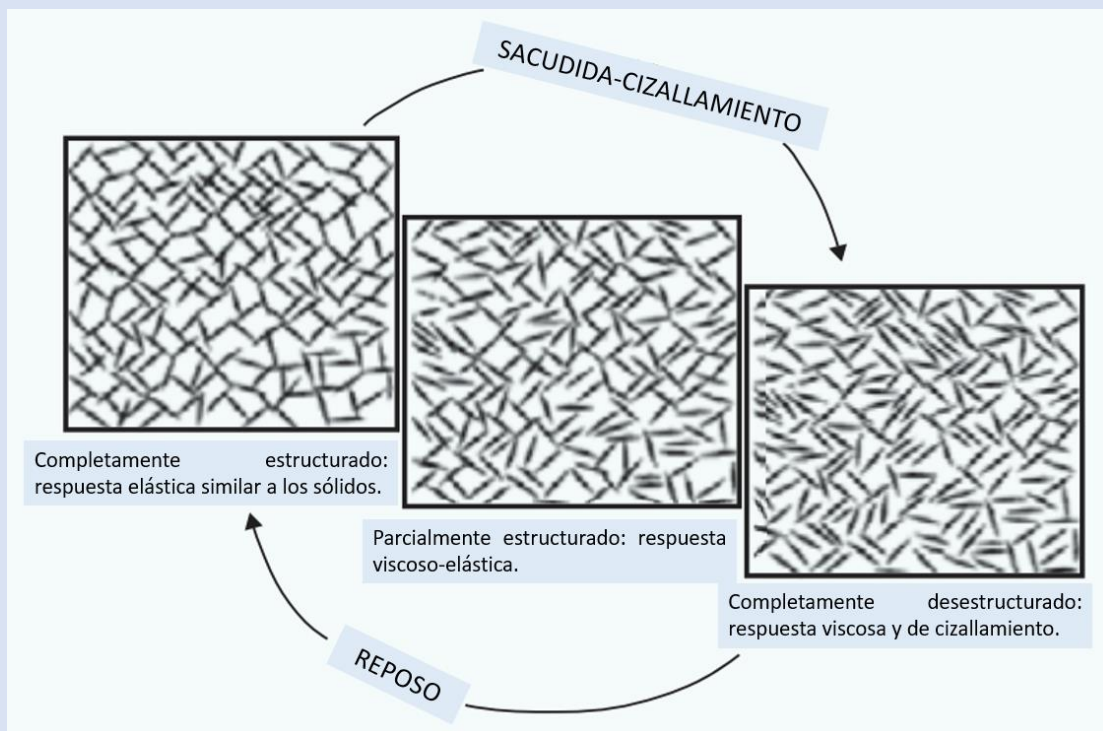


Figura 6 Ruptura de la estructura tixotrópica. (Barnes, H. A., 1997).

## 5. Instrumentación “in-situ”

### 5.1. Penetrómetros en cono de caída libre

La física de un penetrómetro en cono de caída libre está basada en el registro de la aceleración/desaceleración de penetrómetros con el fin de obtener la información de la resistencia del cono de penetración. Usando un procedimiento de calibración, las propiedades reológicas del lodo en un sitio específico pueden ser relacionadas con la resistencia de cono. En

<sup>19</sup> Un fluido tixotrópico es un fluido que tarda un tiempo finito en alcanzar una viscosidad de equilibrio cuando hay un cambio instantáneo en el ritmo de cizallamiento. Sin embargo, no existe una definición universal; el término a veces se aplica a los fluidos pseudoplásticos que no muestran una relación viscosidad/tiempo.

este sentido los perfiles de la columna de agua-lodo pueden ser graficados usando este tipo de instrumento.

La ventaja de este tipo de equipos es que el posicionamiento vertical del penetrómetro puede ser obtenido de los registros del acelerómetro. En general un acelerómetro es mucho más preciso en la indicación de la profundidad que los sensores de presión estándar.

## 5.2. Perfiladores de diapasones

Los perfiladores de diapasones están basados en los registros de las amplitudes que son activados por vibraciones mecánicas a diferentes frecuencias. Esos registros pueden ser usados para obtener la información de la fluencia y la viscosidad del lodo. Para este propósito es necesario un procedimiento de calibración precisa que requiere mediciones de un laboratorio reológico. Los perfiladores de diapasón pueden brindar suficientes propiedades de propiedad reológica en las áreas de baja concentración de sedimentos.

## 5.3. Equipos de arrastre

El nivel de la profundidad a la que debe estar el equipo arrastrado se define por la discontinuidad de la viscosidad entre el lodo consolidado y el lodo fluido. Las grandes fuerzas viscosas en el lodo consolidado y el peso significativo de los cables que van atados al equipo arrastrado, aseguran que el cable mismo se mantenga al nivel de la interfaz entre el lodo fluido y el lodo consolidado, a menos que se exceda una velocidad de arrastre crítica (velocidad límite) y el equipo arrastrado empiece a flotar en el agua sobre la capa de lodo fluido. En el caso del equipo Rheocable las mediciones continuas de los valores de la resistividad eléctrica son empleadas para verificar en qué lugar el cable está sobre el lecho o flotando sobre él. El nivel de profundidad del equipo arrastrado se define por un sensor de presión sobre el lecho que se encarga de medir la presión hidrostática (Druyts, M. & Brabers, P., 2012). Ver figura 7D.

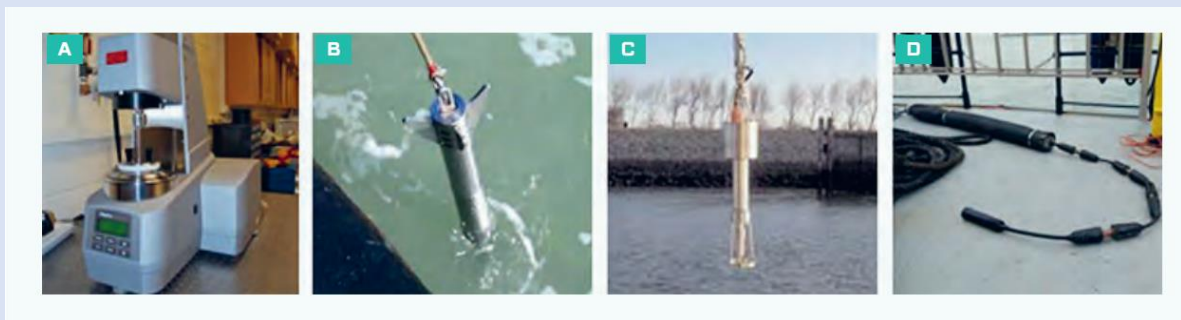
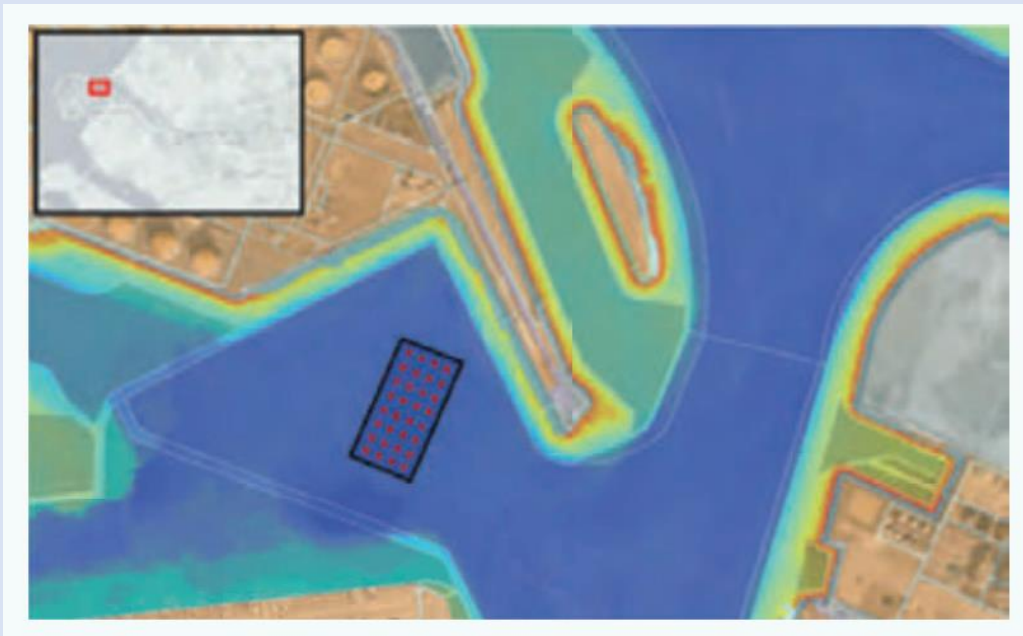


Figura 7 Fotos que muestran métodos basados en la reología incluido un reómetro de laboratorio (Anton Paar) [A], cono de caída libre (Graviprobe) [B], perfilador de diapasón (Rheotune) [C] y equipo de arrastre (Rheocable) [D].

## 6. Comparación de la densidad y el monitoreo basado en reología

Con el fin de comparar la densidad y el monitoreo basado en reología se empleó el método de dragado con inyección de agua en el muelle petrolero No. 8 del puerto de Rotterdam (ver figura No. 8).



*Figura 8 Ubicación del experimento en el muelle petrolero No. 8. El pozo excavado tenía unas dimensiones de 500 x 200 metros.*

El Dragado con Inyección de Agua (DIA) [Water Injection Dredging – WID] fue empleado para licuar las capas superiores de sedimento alrededor de un pozo cavado en el lecho del río de tal manera que el lodo fluyera hacia el interior de este (dimensiones del pozo de 500 x 200 m). El pozo colectó la capa de lodo fluido en un espesor de 1,5 m del área que le rodeaba. Se emplearon los equipos “Graviprobe” y “DensX” para monitorear el comportamiento de la capa de lodo fluido en el pozo durante un período de dos meses. Los resultados del monitoreo son presentados en la figura No. 9.



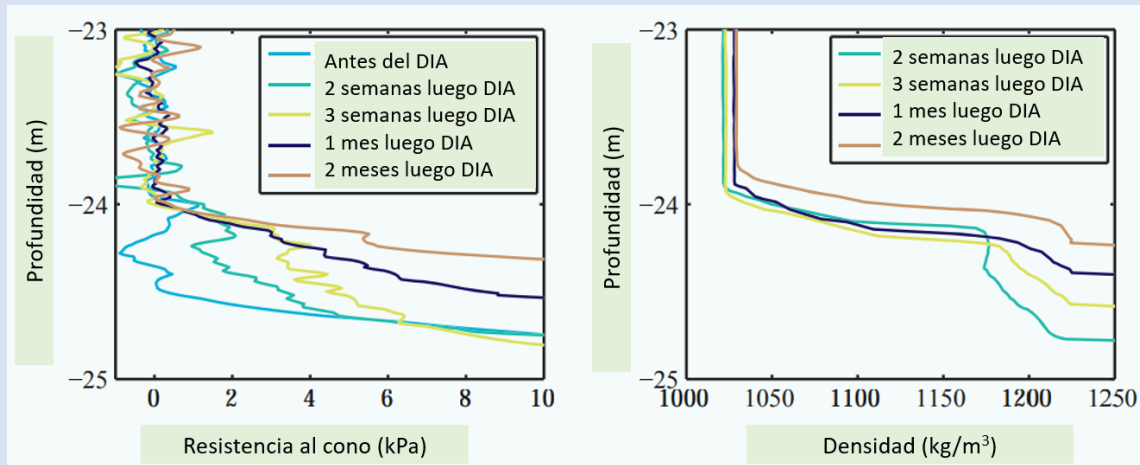


Figura 9 Evolución del lodo fluido en el tiempo, lo cual es medido por el Graviprobe (a la izquierda) y el DensX (a la derecha).

Los registros del Graviprobe se presentan como las medidas de cono de resistencia en función de la profundidad. El perfil en color cian (azul claro) representa las mediciones en el pozo realizado antes de que se realizara el movimiento del lodo fluido dentro del pozo por inyección de agua. Los perfiles trazados en color verde claro, amarillo, azul oscuro y marrón muestran la evolución de la resistencia del lodo fluido en función de la profundidad luego de dos semanas, tres semanas, un mes y dos meses de haberse aplicado la inyección de agua. Los mismos colores son usados para mostrar los perfiles de densidad que fueron medidos con el equipo DensX. De las mediciones se puede concluir que la densidad del lodo fluido se presenta más rápido que su resistencia.

La figura No. 10 presenta la comparación de los levantamientos con los equipos Rheocable y Graviprobe los cuales fueron desarrollados luego del DIA en el muelle petrolero No. 8 del puerto de Rotterdam. Los resultados dan una buena concordancia con respecto a la profundidad navegable que es dada por los diferentes métodos. Las mediciones de la ecosonda de alta frecuencia (200 kHz) se incluyen e la gráfica para su comparación.

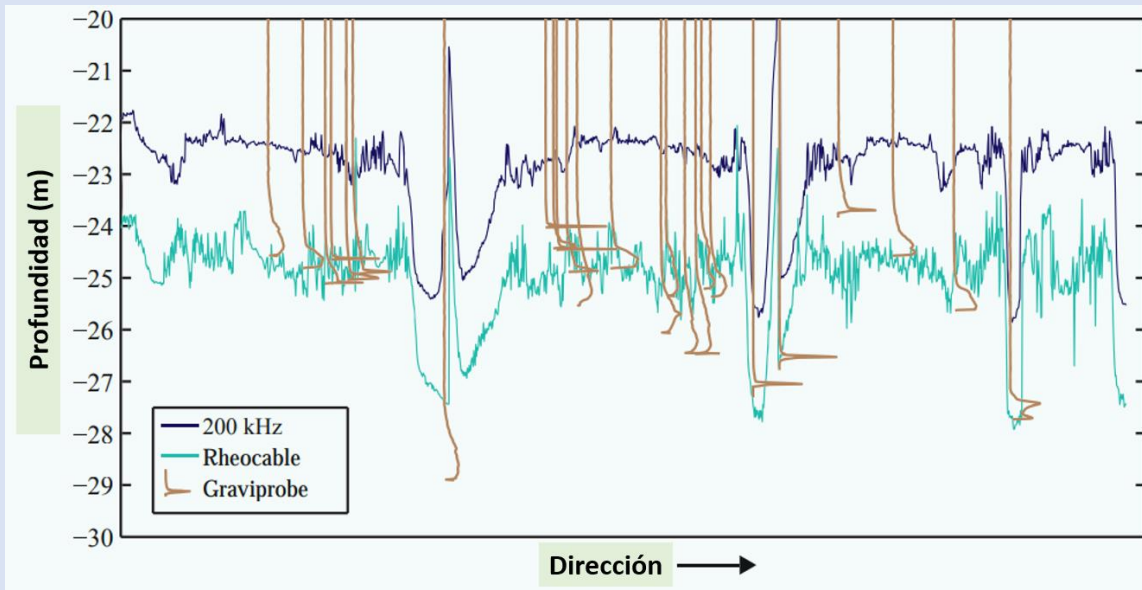


Figura 10 Correlación de la señal de alta frecuencia de la ecosonda (210 kHz), mediciones del equipo Rheocable y mediciones del Graviprobe en el Octavo muelle petrolero, Rotterdam.

## 7. El camino por seguir

La navegación segura requiere un nuevo criterio confiable y universalmente aceptado para la definición de la profundidad náutica. Hasta ahora este criterio estaba relacionado con la densidad de la capa de lodo fluido. Algunos pasos ya se han dado hacia la nueva definición, por ejemplo, en el puerto de Emden donde se considera el límite de elasticidad (“yield stress”) como el parámetro para determinar el fondo náutico.

Ya hace varias décadas, se reconoció la importancia de mejorar los parámetros empleados en la definición de la profundidad náutica. En esa época los experimentos reológicos “*in situ*” eran prácticamente imposibles. Esto forzó a la comunidad a adoptar una parametrización alternativa basada en la densidad. Con el paso de los años ha habido todo un nuevo conjunto de equipos puestos en el mercado que pretende estudiar las propiedades reológicas de la capa de lodo fluido (p.e. Graviprobe, Rheotune, Rheocable). Estos instrumentos están actualmente siendo probados en diferentes puertos y aún queda por ser investigado si los parámetros derivados de los resultados experimentales son compatibles unos con otros. Son necesarios métodos más avanzados como los métodos acústicos 3D con el fin de mapear las capas de lodo fluido.

Estas son algunas preguntas abiertas:

1. ¿Cómo relacionar las mediciones acústicas con las propiedades reológicas del lodo fluido?

2. ¿Pueden los puntos de medición reológica ser usados para calibrar mapas acústicos?

La medición de los parámetros reológicos y en particular el límite de la elasticidad ("yield stress"), requieren de un protocolo bien pensado y universalmente aceptado, en la medida que esos parámetros son fuertemente histórico-dependientes y llevan a efectos tixotrópicos.

3. ¿Cuál sería un protocolo aceptado para la medición de parámetros reológicos?

La medición de parámetros reológicos "*in situ*" tiene que ser comparado con muestras analizadas en laboratorio para propósitos de calibración. Se debe tener cuidado durante el muestreo, almacenamiento y análisis de esas muestras. La composición de las muestras de lodo (en términos de mineralogía, contenido de materia biológica y orgánica) deben ser relacionadas con las propiedades reológicas y el comportamiento tixotrópico del lodo.

4. ¿Cómo puede la composición del lodo ser incorporado a los parámetros reológicos?

Las propiedades del lodo (densidad, viscosidad, fluencia, espesor de la capa de lodo) son dependientes del tiempo debido a los procesos de consolidación en la capa de lodo fluido. Más aún, las capas de lodo son móviles. Se requiere más conocimiento para entender el comportamiento de las capas del lodo fluido en función del tiempo.

5. ¿Cuál es el comportamiento de las capas de lodo con respecto al tiempo y cuál es el enlace entre densidad y parámetros reológicos?

Los parámetros reológicos deben ser incorporados en los modelos computacionales de dinámica de fluidos (Computational Fluid Dynamics – CFD) para predecir las fuerzas que actúan sobre los buques, de acuerdo con las recomendaciones realizadas por Delefortrie, G. & Vantorre, M. (2015).

6. ¿Cómo implementar exitosamente el complejo comportamiento reológico del lodo fluido en modelos CFD?

Luego de contestar las preguntas propuestas anteriormente es necesario conectar todos los interesados en la discusión sobre la aceptación global de un nuevo criterio para determinar la profundidad náutica.

7. ¿Cómo obtener y promover una implementación internacional del nuevo criterio relacionado con la definición de la profundidad náutica?

Todos esos puntos actualmente se encuentran bajo investigación en diferentes grupos de investigación en todo el mundo.

## Referencias

Barnes, H. A. (1997)

Thixotropy – a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 70.

Barth, R., van der Made, C. J. A. W., Bourgonjen, L., van Dijken, J., Vantorre, M. & Verwilligen, J. (2015)

Manoeuvring with negative underkeel clearance: 2nd full scale field test in the Port of Delfzijl. Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction.

Brossard, C., Delouis, A., Galichon, P., Granboulan, J. and Monadier, P. (1990)

Navigability in channels subject to siltation. 22nd International Coastal Engineering Conference.

Claeys, S., De Schutter, J., Vantorre, M. & Van Hoestenbergh, T. (2011)

Rheology as a survey tool: "We are not there yet". *Hydro International* 15(3).

Claeys S., Staelens, P., Vanlede, J. Heredia, M., Van Hoestenbergh, T., Van Oyen, T. & Toorman, E. (2005)

A rheological lab measurement protocol for cohesive sediment. Book of abstracts: 13th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes.

Delefortrie, G., Vantorre, M. & Eloot, K. (2015)

Modelling navigation in muddy areas through captive model tests. *Journal of Marine Science and Technology* 10.

Delefortrie, G. & Vantorre, M. (2015)

Ship manoeuvring behaviour in muddy navigational areas: state of the art. Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction.

[Delefortrie, G \(2008\)](#)

Manoeuvrability of deep drafted vessels in muddy navigation areas. PIANC magazine 133.

[Druyts, M. & Brabers, P. \(2012\)](#)

Nautical depth sounding – the Rheocable survey method. International Hydrographic Review.

[Kirby, R., Parker, W.R., van Oostrum, W.H.A. \(1980\)](#)

Definition of the seabed in navigational routes through mud areas. International Hydrographic Review, Monaco, LVII (1).

[McAnally, W. H., Teeter, A., Schoellhamer, D., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter, E., Shrestha, P., Rodriguez, H., Sheremet, A., & Kirby, R. \(2007\)](#)

Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes, Part 2: Measurement, Modeling, and Management. J. Hydraul. Eng, 133(1).

[Nederlof, L. \(1978\)](#)

“Varen boven slib” in het Rotterdamse haven- en rivieren-gebied. Gementewerken Rotterdam. 98.21-R7332.

[Nederlof, L. \(1979\)](#)

Varen door een waterlaag met meer zwevende slib deeltjes. S. en W - 46ste jaargang, 22, 461464.

[PIANC \(2014\)](#)

Harbour Approach Channels - Design Guidelines, Report 121, PIANC, Brussels.