

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**ENSAYOS DE COLUMNA DE CONSOLIDACIÓN DE SEDIMENTOS FINOS
DEL RÍO DE LA PLATA**

Mónica Fossati¹, Thiago Leão², Francisco Pedocchi¹, Ismael Piedra-Cueva¹

(1) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Uruguay

(2) Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Brasil

mfossati@fing.edu.uy, thiagofleao@gmail.com, kiko@fing.edu.uy, ismaelp@fing.edu.uy

RESUMEN:

Se han realizado estudios de laboratorio del proceso de consolidación de barros cohesivos del Río de la Plata. El proceso de consolidación se refiere al reacomodo físico de las partículas que forman el barro depositado en la zona superior del suelo por el peso propio y a la consecuente eliminación del agua intersticial, lo que genera una variación del volumen de poros del suelo. El estudio y conocimiento de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata, es de interés por diversas aplicaciones vinculadas a la navegación, la actividad pesquera, biodiversidad y gestión del cuerpo de agua. En este trabajo se presentan las características y los resultados obtenidos en los ensayos de columna de sedimentación-consolidación realizados utilizando barros extraídos en diversos lugares del Río de la Plata. Este ensayo es simple desde el punto de vista técnico, económico en cuanto a su implementación y esencial en cuanto a la información que brinda. El objetivo de estos ensayos es estudiar el fenómeno de consolidación de barros sumergidos en condiciones ideales. En los ensayos realizados se determinó la curva de consolidación o compactación de las diversas muestras ensayadas, es decir, la variación de la altura del depósito a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos permiten conocer la dinámica de consolidación y su variación en función de ciertas características como la composición del material, la salinidad de la muestra y la concentración inicial. Se determinaron formulaciones específicas a partir de las mediciones realizadas que permiten ajustar un modelo unidimensional de consolidación.

ABSTRACT:

Laboratory consolidation experiments with mud of the Río de la Plata have been performed. The consolidation process in this context refers to the rearrangement of the deposited sediment particles and the drainage of interstitial water, which results on the reduction of the pore volume. Understanding the Río de la Plata fine sediment dynamics is relevant for several applications related to navigation, fisheries, biodiversity and environmental water body management. The main characteristics of the experiments and the results obtained with bottom mud extracted at different locations in the Río de la Plata are presented in this article. During experiments performed in a settling column, the water-sediment interface was tracked and a settling obtained. These results improved our understanding of the consolidation process for the studied muds. The influence of salinity, initial concentration, and the sediment composition were studied. Finally, specific formulations that can be used for the adjustment of a 1D consolidation model were determined based on the laboratory measurements.

PALABRAS CLAVES:

Consolidación de sedimentos cohesivos, columnas de sedimentación-consolidación, Río de la Plata

INTRODUCCIÓN

La consolidación de los barros formados a partir de la sedimentación de sedimentos cohesivos es uno de los procesos que comprenden la dinámica de los sedimentos cohesivos en cuerpos de agua estuarinos como el Río de la Plata. Los sedimentos finos presentan propiedades cohesivas debido a la acción de fuerzas electroestáticas entre las partículas.

Las partículas de sedimento cohesivo en suspensión están sujetas a procesos de transporte asociados al flujo y a procesos de intercambio con el material de fondo, erosión y deposición. Las partículas finas en suspensión caen bajo la combinación de la fuerza gravitacional y fuerzas viscosas. El material depositado en el fondo está sujeto al proceso de consolidación a través del cual el suelo adquiere su fortaleza y su consecuente resistencia a la posterior erosión. El proceso de consolidación se refiere al reacomodo físico de las partículas que forman el barro depositado en la zona superior del suelo por el peso propio y a la consecuente eliminación del agua intersticial, lo que genera una variación del volumen de poros del suelo. Otros procesos químicos o biológicos incluso vinculados a la actividad de microorganismos bentónicos que ocurren en el sedimento de fondo afectan el proceso de consolidación. Cuando se trata de mezclas en suspensión de baja concentración, la consolidación por peso propio, debido a la gravedad, comienza en las capas inferiores y avanza hacia la superficie del depósito (Been and Sills, 1981). Avanzado el proceso de consolidación las partículas sólidas forman una estructura cuyo proceso de deformación puede describirse con los parámetros tradicionales de la mecánica del suelo.

Debido a que los procesos de deposición y consolidación generalmente ocurren en la dirección vertical, con un movimiento descendente del sedimento y ascendente del agua, forzado principalmente por la gravedad, habitualmente se estudian estos procesos en condiciones unidimensionales en laboratorio utilizando columnas de consolidación (Been and Sills, 1981; Migniot, 1989). El proceso de consolidación 1D por peso propio de un barro puede aproximarse por la ecuación diferencial de Gibson que vincula las propiedades del suelo, tensión efectiva y permeabilidad, con la evolución temporal de la relación de vacíos. A medida que la consolidación aumenta la presión de poros disminuye y aumenta la tensión efectiva. Se ha observado en las etapas iniciales del proceso de consolidación domina el flujo de agua de poros y la estructura del barro (depósito) es muy débil mientras que en las etapas finales del proceso la tensión efectiva comienza a ser más importante y el flujo por los poros despreciable (Merckelbach and Kranenburg, 2004).

La ecuación global de Gibson puede resolverse con condiciones de borde apropiadas pero necesita de relaciones constitutivas para la permeabilidad y tensión efectiva del suelo (Winterwerp, 2004), o determinaciones del coeficiente de consolidación. A falta de relaciones generales, realizar mediciones de laboratorio en columnas de sedimentación-consolidación para determinar estas relaciones constitutivas para el barro es una práctica ampliamente utilizada (Merckelbach et al. 2001) y diversas instalaciones se describen en la bibliografía específica del tema (Been and Sills, 1981; Migniot, 1989; Torfs et al., 1996; Merckelbach et al. 2001; Samadi-Boroujeni et al. 2005). La versión más básica del ensayo consiste en medir visualmente la variación temporal de la interface que se forma entre la suspensión y el material depositado. Los dispositivos más complejos incluyen equipamiento para la determinación del perfil de densidades con equipos de rayos X y de la presión de poros con transductores de presión para determinar la evolución temporal del proceso de consolidación (Merckelbach et al. 2001).

Hacia fines del 2010 se comenzaron a realizar ensayos básicos de consolidación utilizando columnas de sedimentación-consolidación en las instalaciones del IMFIA para estudiar las características de la consolidación de los barros del Río de la Plata y de la costa uruguaya.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología utilizada y los resultados obtenidos, así como también un análisis de los resultados, en los ensayos de columna de sedimentación-consolidación para diversas muestras de sedimento cohesivo del Río de la Plata. Este ensayo es

simple desde el punto de vista técnico, económico en cuanto a su implementación y esencial en cuanto a la información que brinda. El objetivo de estos ensayos es estudiar el fenómeno de consolidación de barros sumergidos en condiciones ideales. En los ensayos realizados se determinó la curva de consolidación o compactación de las diversas muestras ensayadas, es decir, la variación de la altura del depósito a lo largo del tiempo. En particular, se definieron tres objetivos específicos para ser estudiados con las series de ensayos realizados: estudiar la influencia de la concentración inicial del depósito, la influencia de la composición sedimentológica y la influencia de variaciones de salinidad, en las curvas de consolidación para el sedimento del Río de la Plata,

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del equipamiento de laboratorio

Para realizar los ensayos de consolidación se construyó en el laboratorio un dispositivo formado por 3 columnas de 2 metros de altura de PVC (transparente) y 88 mm de diámetro. El dispositivo consiste de una base de hierro donde se apoya cada columna y una parte superior donde se enganchan las mismas de forma de permanecer verticales. Se adosaron a las columnas cintas métricas para realizar las mediciones. La metodología general del ensayo consiste en verter una cantidad determinada de una muestra de barro en suspensión bien mezclada y medir la variación temporal de la interfase que se forma entre el “agua” y la mezcla de sedimento. Una vez diseñado y construido el dispositivo se realizó un ensayo de prueba. El mismo sirvió para ajustar la metodología práctica a utilizar en las series de ensayos realizadas posteriormente.

La metodología general de los ensayos se describe a continuación. En primer lugar se prepara la mezcla de barro en suspensión para una concentración dada y un volumen dado, que equivale en todos los casos ensayados a 1 m de altura inicial de la columna. Se extrae una muestra de suspensión para chequear la concentración inicial introducida y luego la mezcla se ingresa por la parte superior al tubo. Una vez se visualiza claramente la interfase superior se comienza la medición de la altura de la misma (visual). Durante los primeros instantes se realizan mediciones con mayor frecuencia y a medida que los procesos se vuelven más lentos las mediciones se realizan más esporádicamente. El tiempo total del ensayo depende de cuántas etapas del proceso se quiera estudiar. Debido a la fuerte cohesión de las muestras se utilizaron diversas metodologías para la determinación de la densidad de sedimento húmedo y de la concentración en suspensión, siendo el procedimiento de peso y secado la más apta.

Muestras de barro utilizadas

En el marco del proyecto FREPLATA (FREPLATA, 2011) el Servicio de Hidrografía, Oceanografía y Meteorología de la Armada del Uruguay (SOHMA) realizó dos campañas oceanográficas en todo el Río de la Plata. Durante la misma se extrajeron muestras de sedimento de fondo adicionales a las establecidas en el proyecto para ser utilizadas en los ensayos de columna de sedimentación-consolidación. El barro obtenido en las campañas del proyecto fue caracterizado por el SHN (Servicio Hidrográfico Argentino), y por tanto se cuenta con información granulométrica detallada de cada una de las muestras. La información de las campañas revela que básicamente en la zona interior e intermedia del Río de la Plata se encuentran sedimentos predominantemente limosos con bajo porcentaje de arcilla con algo de contenido de arena. En la zona intermedia hacia el frente y zona exterior hay un cambio gradual en la composición del material con un aumento de la cohesividad con porcentajes de arcilla mayores. En función de la disponibilidad de cada muestra de barro y de la información granulométrica se seleccionaron muestras de diversa composición que corresponden a diversas zonas del Río de la Plata. En total se utilizaron muestras de 5 estaciones diferentes, una perteneciente a la zona interior del Río de la Plata, otra correspondiente a la zona intermedia y las otras tres de la zona exterior. Estas últimas son las muestras que contienen mayor porcentaje de arcilla aunque todas las estaciones presentan cierto porcentaje de dicho material.

Ensayos Realizados

Tres series de ensayos fueron planificados y realizados para responder a los objetivos específicos definidos. En cada serie se ensayan muestras en los tres tubos. La primera serie se realizó entre los días 16/02 y 11/03 (denominada e1), la segunda serie entre el 15/03 y el 28/08 (denominada e2) y la tercera serie entre el 19/09 y el 11/11 (denominada e3); todas en el 2011. Las características de las tres series de ensayos realizados (9 casos en total) se presentan en la Tabla 1. Se observa la altura inicial en los ensayos no es exactamente igual a 1 m debido a los errores de manipulación del ensayo. No obstante, se considera este parámetro del ensayo es invariante en las series analizadas. En la primera serie de ensayos se determinó la curva de consolidación de un mismo material, el correspondiente a la estación #22, para tres concentraciones iniciales diferentes (casos e1t1, e1t2 y e1t3). En la segunda serie de ensayos se determinó la curva de consolidación de tres muestras de barro de distintas estaciones, las estaciones #2, #10 y #26, que se diferencian en los porcentajes de limo y arcilla principalmente. El resto de los parámetros se mantuvieron fijos, como la concentración inicial y salinidad. Esta es la serie de ensayos que se mantuvieron por más tiempo en funcionamiento, más de 5 meses. En la tercera serie de ensayos se definieron ensayos con salinidad variable, igual a 18 ppm, valor característico de la zona central del Río de la Plata de donde se extrajo el barro de las estaciones #22 y #20 utilizado en este ensayo. Además se realizó en esta serie de ensayos, el ensayo de la estación #20 con agua dulce (sin salinidad) para poder comparar los resultados.

Tabla 1.- Características de los ensayos de consolidación en columna realizados.

Ensayo	Concentración Inicial - C0 [g/l]	Altura Inicial - H0 [m]	Duración [días]	Muestra de Barro	Composición Material				Salinidad mezcla [g/l]
					% Arena	% Limo	% Arcilla	%Arcilla / %Limo	
e1t1	98	1.011	23	#22	1	68	31	0.45	0
e1t2	91	0.944	21	#22	1	68	31	0.45	0
e1t3	62	0.933	22	#22	1	68	31	0.45	0
e2t1	100	1.003	162	#2	19	71	9	0.13	0
e2t2	100	0.973	162	#26	0	66	33	0.50	0
e2t3	100	1.032	162	#10	1	86	14	0.16	0
e3t1	100	0.957	53	#20	0	56	44	0.77	0
e3t2	100	0.966	53	#20	0	56	44	0.77	18
e3t3	100	0.962	51	#22	1	68	31	0.45	18

Análisis de resultados

Una vez realizados los ensayos, la información recolectada en los mismos fue procesada, determinando las curvas de evolución temporal de la altura de la interfase. Estas curvas se denominan curvas de asentamiento o curvas de consolidación. Estas curvas se chequearon y compararon con curvas de otros barros medidas en otros laboratorios y presentadas en la bibliografía. Además, se realizó una comparación de las curvas y sus principales características obtenidas en los diversos ensayos. En particular, se estudió la influencia de la concentración inicial, composición del sedimento y salinidad de la muestra en la evolución de la consolidación. Además del análisis descriptivo y cualitativo mencionado anteriormente se realizó para los ensayos con mayor calidad (e1t1, e2t2, e3t3) el ajuste de las curvas de asentamiento según las 4 etapas características del proceso de consolidación (Samadi-Boroujeni et al. 2005). Por último, utilizando la información del ensayo con material cohesivo de mayor duración, el ensayo denominado e2t2, se determinaron las funciones constitutivas de dicho material a partir del cálculo de la permeabilidad y de la tensión efectiva utilizando la metodología propuesta por Merckelbach and Kranenburg (2004).

RESULTADOS OBTENIDOS

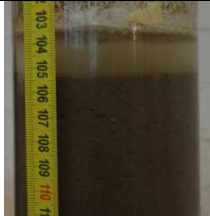
Resultados generales

En la Tabla 2 se presentan las principales características observadas durante los ensayos realizados, principalmente durante los primeros instantes, donde teóricamente se observarían dos interfases, por un lado una interfase superior formada por la caída del sedimento en suspensión de la zona superior de comportamiento descendente y por otro lado la formación de una interfase inferior por la generación del depósito desde abajo hacia arriba de comportamiento ascendente. Es

importante aclarar que en ninguno de los ensayos realizados fue posible observar el proceso de formación del depósito con un aumento de la interfase; solamente se observó una interfase superior descendente. El depósito fue determinado entonces a partir de la altura de la interfase superior (o del asentamiento de la zona inferior denominada “depósito”). Se observaron diferencias importantes entre los diferentes ensayos, en lo que se refiere a la visualización de la interfase superior, a su nitidez y a la rapidez de descenso.

Tabla 2.- Descripción cualitativa de los resultados obtenidos en los ensayos.

Ensayo	Observaciones	Apariencia inicial	Altura Final/Inicial (%)	Apariencia final
e1t1	Inmediatamente después del vertido se comenzó a visualizar la interfase y fue posible medir la altura de la misma. Se observa claramente el descenso de la misma con cierta rapidez durante las primeras horas. La zona de suspensión mantiene un nivel de turbidez que disminuye gradualmente a lo largo de los días del ensayo desapareciendo hacia el final.	 t=20minutos	23.3	 t=22 días
e1t2	Comportamiento y apariencia muy similares al caso e1t1 debido a las (casi) iguales características del ensayo.		25	
e1t3	No se visualizó una interfase clara que permitiera registrar mediciones hasta casi una hora después del vertido. En los primeros instantes se observó un gradiente en la capa superior de concentración. Una vez visualizada la interfase fue posible medir su evolución temporal. La turbidez en la zona en suspensión se mantuvo varios días con una disminución gradual durante el ensayo.	 t=27minutos	16	 t=23 días
e2t1	El descenso inicial fue muy rápido. Inmediatamente después del vertido se visualiza un gradiente en la turbidez en casi toda la columna pero no es posible identificar una interfase clara. Por la rapidez del descenso la caída ya había sido considerable al tomar la primera medida. La columna de agua permanece con sedimento fino en suspensión que decanta suavemente posteriormente y se observan posteriormente dos capas de sedimento bien diferenciadas en el depósito, resultado de la decantación posterior de los materiales más finos arcillosos, lo que incluso genera que en algunos instantes haya un aumento leve de la altura total del depósito.	 t=10minutos	13	 t=162 días
e2t2	Realizado el vertido no se observó un descenso rápido de la interfase ni un gradiente de turbidez. A los pocos minutos se diferencia una interfase clara que puede medirse con una suspensión superior con muy poco contenido de sedimento. El descenso observado es lento y en bloque. Durante el desarrollo se continúa observando una interfase bien clara con una columna de agua casi sin sedimento en la parte superior y un depósito denso y homogéneo.	 t=8minutos	27.6	 t=162 días
e2t3	Comportamiento y apariencia muy similares al caso e2t1.		14	
e3t1	Una vez realizado el vertido no fue posible visualizar la interfase inmediatamente. La misma comenzó a visualizarse luego de más de 30 minutos y el descenso inicial fue lento. A la hora la interfase es clara con muy poca suspensión de sedimento en la zona superior a la misma.	 t=25minutos	29	 t=53 días

e3t2	Una vez realizado el vertido se observó rápidamente de forma clara la interfase entre la zona inferior de mayor turbidez (depósito) y la zona superior de menor turbidez (suspensión). Parecería incluso observarse los flocs que se forman. El descenso observado es claro y rápido inicialmente con muy poco gradiente de turbidez, es decir, con una clara interfase.	 t=20minutos	29.6	 t=53 días
e3t3	Luego del vertido se visualiza rápidamente una interfase que puede medirse sin dificultades. El proceso inicial de sedimentación es muy rápido con una muy clara interfase con poco sedimento en suspensión en la parte superior. Comportamiento muy similar al observado para en el ensayo e3t2.	 t=20minutos	23.2	 t=51 días

En la Figura 1 se presentan superpuestas las curvas de consolidación (evolución temporal de la interfase medida) para todos los ensayos realizados. El color es característico de la serie para ayudar en la visualización. Las curvas obtenidas en estos ensayos muestran comportamiento similar al presentado en la bibliografía (Migniot 1989, Been and Sills 1981, Merckelbach and Kranenburg 2004, Samadi-Boroujeni et al, 2005). Se observa en primer lugar dos grupos de curvas que se diferencian claramente en su comportamiento, las curvas de los ensayos e2t1 y e2t3 realizados con material de composición predominante limo, y el resto de las curvas realizadas con materiales donde la proporción de arcillas es mayor. Dichas curvas reflejan el comportamiento observado durante la realización del ensayo; en estos casos no se visualiza la interfase en la zona superior sino que se comienza a visualizar ya cuando el depósito es de altura similar a la final, y el asentamiento es muy lento durante el resto del ensayo. El resto de los ensayos muestran curvas de asentamiento con la forma clásica observada en la consolidación de barros cohesivos. Es de destacar que la curva obtenida para el ensayo e3t1 presenta ciervas variaciones en el comportamiento respecto a los otros casos. Se considera este ensayo debe ser reiterado y no se incluyen los resultados para los análisis que se presentan posteriormente.

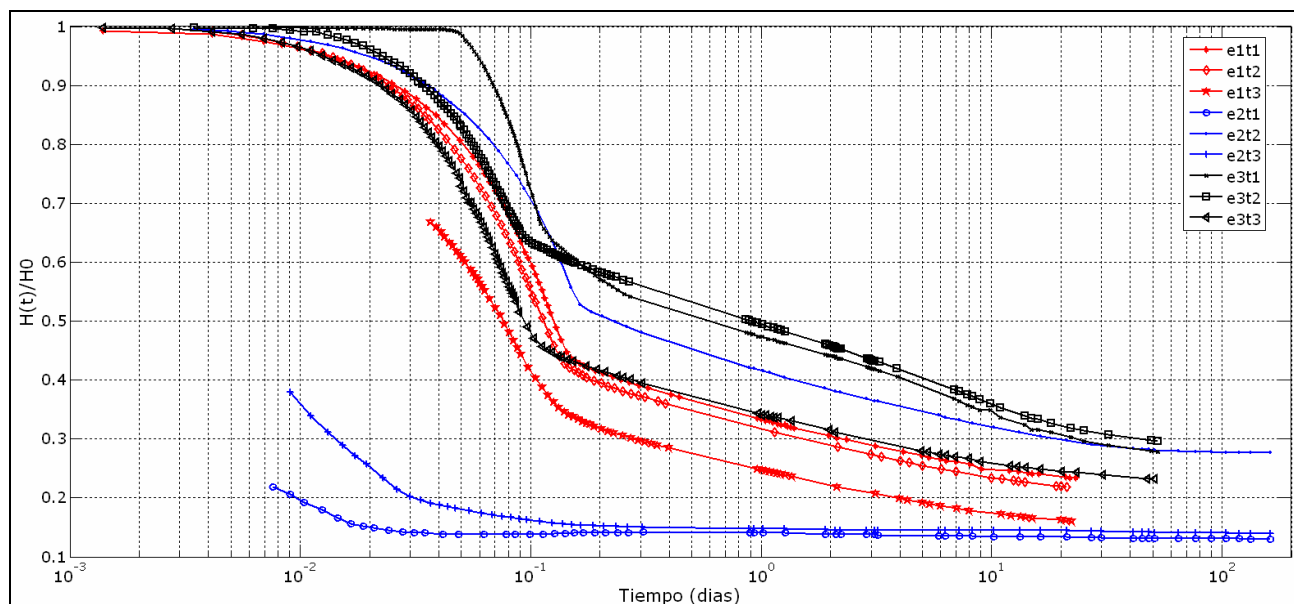


Figura 1.- Evolución temporal de la interfase suspensión depósito para todos los ensayos realizados.

Determinación parámetros curvas de consolidación

La curva de asentamiento de la interfase medida en los ensayos es uno de los parámetros que muestran más claramente el proceso de sedimentación y consolidación del barro. Graficando en eje logarítmico temporal se han reconocido cuatro etapas en el proceso (Samadi-Boroujeni et al, 2005).

Una primera etapa inicial corta en duración donde ocurre la aglomeración de sedimentos en flocs, una segunda etapa donde ocurre la sedimentación, una tercera etapa de sedimentación “hindered” (obstruida), y una cuarta etapa de consolidación propiamente dicha. En cada una de las etapas la curva de asentamiento puede describirse como una función logarítmica de la forma $H(t)/H_0=a.\log t+b$. Durante la tercera etapa definida como sedimentación “hindered” el asentamiento del depósito ocurre por la eliminación del agua de poros y coincide con la primera etapa de consolidación definida por Merckelbach and Kranenburg (2004).

Por la mayor longitud del ensayo, mayor proporción de arcilla en la muestra y la buena calidad en los datos medidos, se seleccionó el ensayo e2t2 para estudiar en detalle la curva de asentamiento obtenida. En primer lugar se identificaron las etapas mencionadas anteriormente según la evolución de la curva y se ajustaron los parámetros para cada una. Los altos valores de los factores de correlación (mayores a 0.94) obtenidos en cada etapa certifican la calidad del ajuste y la representación logarítmica del proceso. En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos y en la Tabla 3 los principales parámetros del ajuste (cuadro izquierdo). Se observa para este caso la primera etapa se desarrolló en menos de una hora, la segunda en casi dos horas, la tercera durante casi 30 días y la cuarta durante los últimos 4 meses del ensayo. El parámetro a indica indirectamente la rapidez de cada etapa en cuanto al descenso de la interfase, sin indicar directamente una velocidad de descenso ya que la misma varía en cada etapa. Se observa en la etapa 2 se obtiene el valor mayor, y en la etapa 4 de consolidación el menor valor. En la Tabla 3 también se presentan los parámetros de ajuste de la función logarítmica para los ensayos e1t1 y e3t3; estos parámetros fueron determinados con el objetivo de evaluar la influencia de determinadas variables en el proceso de consolidación y se analizarán en las próximas secciones.

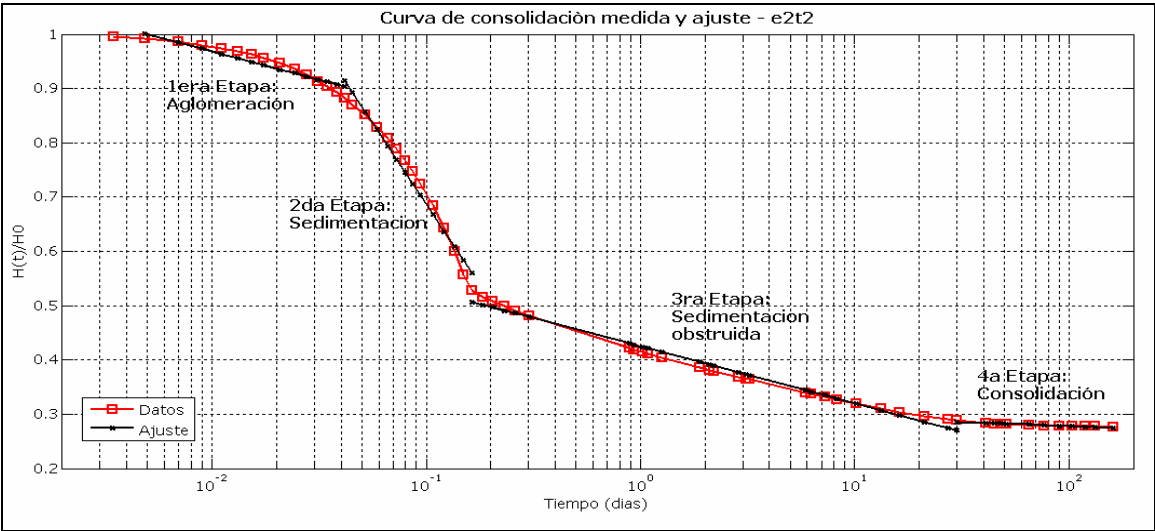


Figura 2.- Curva de consolidación medida y ajuste de las diversas etapas para el ensayo e2t2.

Tabla 3.- Parámetros de ajuste de las diversas etapas del proceso de consolidación para los ensayos e2t2 (cuadro izquierdo), e1t1 (cuadro central) y e3t3 (cuadro derecho).

e2t2:					e1t1:					e3t3:				
Etapa	a	b	Tiempo etapa (hs)	R2	Etapa	a	b	Tiempo etapa (hs)	R2	Etapa	a	b	Tiempo etapa (hs)	R2
1	-0.105	0.759	0.9	0.941	1	-0.113	0.716	1.0	0.899	1	-0.086	0.780	0.5	0.915
2	-0.597	0.090	2.9	0.984	2	-0.775	-0.186	2.6	0.992	2	-0.688	-0.181	2.3	0.989
3	-0.105	0.425	716.3	0.991	3	-0.102	0.339	212.8	0.995	3	-0.098	0.349	285.3	0.996
4	-0.015	0.308	3165.5	0.937	4	-0.041	0.290	340.5	0.991	4	-0.036	0.293	936.5	0.997

Influencia de la concentración inicial de la mezcla

Comparando los resultados obtenidos en los ensayos de la primera serie (e1t1, e1t2 y e1t3) es posible analizar el efecto de la concentración inicial sobre el proceso de consolidación. Como se mencionó anteriormente, durante el ensayo se observaron diferencias en el comportamiento. En los primeros la interfase se forma a los pocos minutos del vertido y claramente es posible observar

como se da la decantación de las partículas y el descenso de la columna. Con poca concentración no se diferencia una interfase clara sino que se observa un gradiente en la turbidez que refleja la sedimentación pero no hay saturación de la interfase.

A grandes rasgos se observa una mayor velocidad de sedimentación-consolidación en las primeras etapas para concentraciones menores. Este resultado ya ha sido identificado en otros estudios similares (Migniot, 1989). A modo de ejemplo el descenso del depósito a una hora de iniciado el ensayo fue de 16,7 cm para el ensayo e1t1, 18,8 cm para el e1t2 y 32,6 cm para el e1t3. Este comportamiento se observa en la Figura 1, comparando las 3 curvas de consolidación correspondientes al ensayo e1, donde se observa un adelanto del punto de inflexión indicativo del inicio de la primera etapa de consolidación. En la misma se observa también que el comportamiento general que muestran las curvas es el mismo en los tres casos.

Influencia de la composición del barro

En la Figura 3 se presentan las curvas de consolidación obtenidas para los cuatro ensayos válidos con igual concentración inicial pero con diferente composición de material, expresado según el factor R definido como el % arcilla sobre el porcentaje de limo de la muestra de barro utilizada.

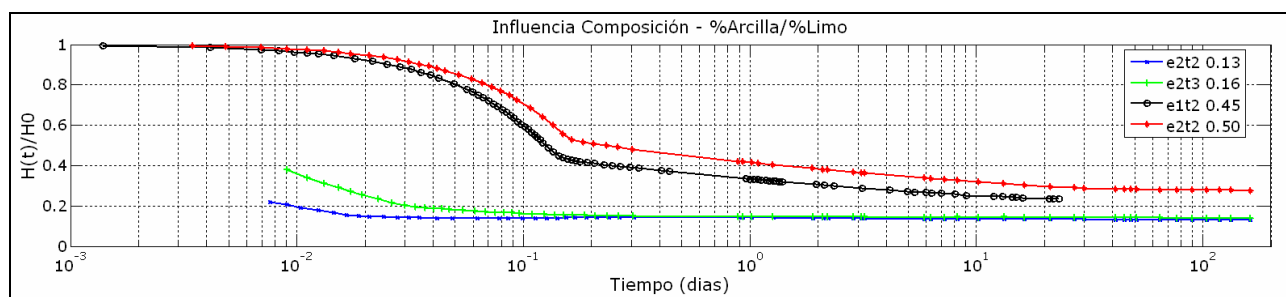


Figura 3.- Curvas de consolidación para las distintas composiciones de sedimento ensayadas.

Los resultados muestran que sedimentos cohesivos con alta proporción de limos frente a las arcillas sedimentan y consolidan rápidamente alcanzando una altura casi asintótica en el primer día de ensayo. Este comportamiento es muy diferente al que se observa en muestras con valores de R mayores donde se observa la sedimentación inicial es más lenta y la consolidación continúa con el tiempo con una tasa de descenso decreciente. En general, se observa que la altura del depósito para un tiempo de ensayo dado es mayor cuanto mayor sea el valor de R. Por ejemplo, a las 2 horas de iniciado el ensayo, los valores de altura del depósito (concentración del depósito) son: 77% (148 g/l), 66% (130 g/l), 17% (600 g/l) y 14% (727 g/l), para muestras de R decreciente. A 40 días de ensayo los valores (%) de altura de depósito y concentración obtenidos son aproximadamente: 30% (333g/l), 24% (417g/l), 14% (714g/l) y 13% (769g/l), también para R decreciente. Estos resultados muestran que la consolidación de sedimentos cohesivos ocurre más rápidamente para sedimentos con mayor proporción de limo, lo que resulta en depósitos más concentrados para iguales tiempos de consolidación.

Por otra parte, se calcularon los parámetros de ajuste de las etapas de la curva de consolidación para el ensayo e1t1 para comparar con los parámetros determinados para el ensayo e2t2 (Tabla 3). Estos dos ensayos se diferencian solo en la composición de material conteniendo ambos un alto valor proporcional de material arcilloso. La comparación con los parámetros determinados para el ensayo e2t2 muestra valores muy similares del parámetro a de las etapas 1 y 3 entre ambos ensayos, con una mayor diferencia en el parámetro para la etapa 2, con mayor rapidez en el proceso para menor proporción de arcillas. Se observa además que la duración de las etapas 1 y 2 es muy similar, lo que se observa también claramente en las curvas. Respecto a la etapa 3 en el ensayo e1t1 se identificó una duración de casi 9 días mientras que para el caso e2t2 de casi 30 días, lo que podría deberse a la diferencia en la composición de material.

Influencia de la salinidad de la mezcla

En los ensayos realizados (e1t1 y e3t3) se midió la curva de consolidación utilizando la misma concentración inicial y la misma altura de agua inicial pero variando la cantidad de sal de la muestra, buscando representar el efecto de la misma en el proceso de consolidación. Durante la realización de los ensayos se visualizaron diferencias cualitativas entre las muestras de agua dulce y con salinidad. Básicamente se observó que en las muestras con salinidad la interfase se observa más claramente y más rápidamente luego del vertido y que la deposición es un poco más rápida inicialmente. Esto mostraría un efecto de salinidad en la etapa de sedimentación de las muestras de sedimento fino.

Además de la comparación de las curvas de consolidación (presentadas en la Figura 1) se ajustaron las curvas de las diversas etapas para el ensayo e3t3 para comparar directamente con los valores determinados para el ensayo sin salinidad e1t1 (Tabla 3, panel derecho). Analizando el parámetro a , parecería habría un enlentecimiento del proceso al considerar la salinidad. No obstante el tiempo de duración de las etapas 1 y 2 es menor para el caso con salinidad lo que indicaría un aceleramiento de los procesos iniciales. En relación a la duración de la etapa 3 (y el tiempo total acumulado en las etapas 1, 2 y 3), se observa que en el ensayo sin salinidad la etapa 4 de consolidación iniciaría aproximadamente a las 9 días de ensayo mientras que para el caso con salinidad a los 12 días, y un enlentecimiento (por tanto mayor duración) de la etapa de sedimentación obstruida o etapa inicial de consolidación. Probablemente la salinidad incentive la formación de flocs acelerando los procesos en suspensión iniciales pero éstos luego en el depósito forman un barro con una estructura más débil y por tanto es necesario mayor tiempo para la evacuación del agua en la etapa inicial de consolidación. Este efecto permanece y se observa que la altura del depósito final al incluir la salinidad es mayor a la altura del depósito al considerar agua dulce.

Determinación de las ecuaciones constitutivas para permeabilidad y tensión efectiva para el caso e2t2.

Se exploró a partir de los resultados obtenidos en el ensayo e2t2 la determinación de los parámetros K_k y K_σ definidos en la metodología propuesta por Merckelbach and Kranenburg (2004) para determinar las funciones constitutivas correspondientes para permeabilidad y tensión efectiva, para el material arcilloso correspondiente (estación de medición #26 ubicada en la zona costera uruguaya, sin contenido de arena). Aplicando la metodología propuesta por dichos autores se determinaron los parámetros y coeficientes que se presentan en la Tabla 4 a partir de los datos de base presentados también en la misma. La metodología propone simplificar las ecuaciones considerando dos etapas en el proceso de consolidación: la etapa inicial donde se desprecia el efecto de la tensión efectiva en el barro y se determina la relación constitutiva para la permeabilidad, y la etapa final de la consolidación donde se considera nulo el flujo de agua y se determinar la relación constitutiva para la tensión efectiva. Se utiliza la nomenclatura definida para los autores a modo de facilitar el entendimiento de los resultados ya que por espacio no se desarrolla el procedimiento en este artículo. Para determinar el ajuste de la ley potencial correspondiente a la etapa inicial de consolidación se utilizaron los datos correspondientes a la etapa 3 definida anteriormente.

Tabla 4.- Datos iniciales y parámetros de las ecuaciones constitutivas del material para permeabilidad y tensión efectiva determinados a partir del ensayo e2t2.

Datos iniciales:			Resultados:	
Altura inicial	h_0 (m)	0.973	Altura reducida (m)	0.2459
Altura final	h_{inf} (m)	0.269	R2 Ajuste ley potencial Etapa Inicial:	0.99
Densidad inicial	ρ_0 (kg/m ³)	1062	<i>D (dimensión fractal)</i>	2.81
Densidad agua poros	ρ_w (kg/m ³)	1000	<i>Parámetro empírico permeabilidad (K_k, m/s)</i>	8.89E-18
Densidad Sólidos	ρ_s (kg/m ³)	2650	<i>Parámetro empírico tensión efectiva (K_σ, N/m²)</i>	3.55E+11

CONCLUSIONES

Los primeros ensayos de columna de consolidación de muestras de sedimento de fondo extraídas en diversas zonas del Río de la Plata han sido realizados en el IMFIA. A pesar de la simplicidad de los ensayos, los resultados obtenidos son muy alentadores y certifican la calidad de los mismos, en la medida que se observan resultados similares y coherentes a los presentados por otros autores para sedimentos cohesivos de otras zonas del mundo. Por otro lado, los distintos casos analizados permiten avanzar en el conocimiento de estos procesos en el Río de la Plata.

Se realizaron diversos ensayos modificando las principales características que influyen en el proceso, concentración inicial de la muestra, composición del sedimento en cuanto a relación del porcentaje material limoso y arcilloso del sedimento y salinidad de la mezcla. Diversos tipos de análisis fueron aplicados a los datos medidos además de un análisis descriptivo y cualitativo. Se realizaron ajustes de las curvas de consolidación obtenidas para tres ensayos seleccionados que permite la caracterización del proceso. Además, se determinaron las relaciones constitutivas para la permeabilidad y la tensión efectiva del material fino del Río de la Plata de la costa uruguaya. Estas relaciones dependientes del material son necesarias para resolver la ecuación diferencial gobernante del proceso de consolidación de barros de Gibson (Merckelbach and Kranenburg, 2004). Resolviendo numéricamente dicha ecuación es posible determinar la evolución de la consolidación del barro depositado en el fondo del Río de la Plata.

A pesar de los buenos resultados obtenidos resulta de interés continuar trabajando con ensayos de consolidación en laboratorio con las columnas ya instaladas con el objetivo de determinar las relaciones constitutivas para otras muestras de barro para complementar la caracterización y estudiar su variabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Been, K. and Sills, G. (1981). Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. *Geotechnique* 31, N° 4, 519-535.

Fossati M., Moreira D., Simionato C., Cayocca F., Tessier C., Sarubbi A. y Re M. (2010). Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: primeros resultados de la modelación numérica. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Uruguay.

FREPLATA (2011). Estudio de la dinámica hidrosedimentológica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos. *Proyecto FREPLATAFFEM, convenio de cooperación N° CZZ 1268.01*.

Huisman M. and van Kesteren W.G.M. 1998. Consolidation theory applied to the capillary suction time (CST) apparatus. *Water Science and Technology* Vol 37 No 6-7 pp 117-124.

Merckelbach L. M., Sills G. C. and Kranenburg C. (2001) Laboratory experiments on consolidation and strength of bottom mud. *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*. W.H. McAnally and A.J. Mehta (Editors). Elsevier Science.

Merckelbach and Kranenburg (2004). Determining effective stress and permeability equations for soft mud from laboratory experiments. *Geotechnique* 54, N°9, 581-591.

Migniot, C. (1989) Tassement et rhéologie des vases. Première partie. Deuxième Partie. *La houille Blanche* N°1 y N°2, 11-28, 95-111, 1989.

Samadi-Boroujeni H., Fathi-Moghaddam, M., Shafaie-Bajestan M., and Mohammad Vali-Samani H. (2005) Modelling of sedimentation and self-weight consolidation of cohesive sediments. Chapter 13 in *Sediment and ecohydraulics: INTERCOH 2005*.

Sills, G. and Elder, D. (1986). The transition from sediment suspension to settling bed. *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies vol 14*.

Torfs, H., Mitchener, H., Huysentruyt, H., Toorman E (1996). Settling and consolidation of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* 29 (1996) 27-45.

Winterwerp, Johan C., and van Kesteren, Walther G.M. (2004). *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment*. Elsevier.