

# Construcción en etapas y mejoramiento de fango para el diseño de un dique sumergido

WILLIAM F. VAN IMPE (\*); R. DANIEL VERASTEGUI F (\*\*); PATRICK MENGÉ (\*\*); MARK VAN DEN BROECK (\*\*)

**RESUMEN** Dentro del marco de actividades para la recuperación de terrenos en la cercanía del puerto de Amberes, se tiene planificada la construcción de un dique parcialmente sumergido cimentado sobre un depósito de fango proveniente de trabajos de dragado. El depósito de fango se encuentra a 18 m debajo del nivel de agua. La baja resistencia inicial del fango, junto con la gran magnitud de sobrecarga debido al dique de 27 m de altura, presentan un problema excepcional en el diseño. En el análisis se ha puesto en práctica una construcción en etapas. Sin embargo, a consecuencia de eso, el tiempo de construcción se ha incrementado excesivamente. Por consiguiente, se ha puesto en práctica además la técnica Deep Soil Mixing con objeto de mejorar la estabilidad y reducir el tiempo de construcción. Un programa de investigación en laboratorio, en el que se han utilizado varios cementos, ha comprobado que el cemento con escorias de horno alto se comporta muy bien con este tipo de material.

## STAGED CONSTRUCTION AND DEEP SOIL MIXING OF AN UNDERWATER DAM FOUNDED ON SOFT SOIL

**ABSTRACT** Land reclamation activities going on in the harbour of Antwerp have led to the planning of construction of a sand embankment on the top of a dredged sludge pond. The sediments surface is about 18 m below the water level. The considerably low initial shear strength of the sludge, together with the magnitude of the surcharge imposed by the 27 m high embankment, presents unusual engineering problems. A staged construction philosophy has been implemented in the design. However, staged construction alone led to an unfeasible construction schedule. due to the consolidation characteristics of the sediments. For that reason, partial improvement by Deep Soil Mixing techniques has been also considered in order to improve the stability and to reduce the total construction time. From a laboratory research programme in which several cementing agents for improvement were tried out, it seems that the blast furnace slag cements perform very well on this kind of material.

**Palabras clave:** Mejora del terreno; Terraplenes; Suelos blandos.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el interés en el proyecto y construcción de obras sobre suelos de capacidad portante insuficiente se acrecienta, principalmente en los Países Bajos donde por lo general la estratigrafía del terreno está formada por estratos superficiales de arcillas muy blandas o suelos orgánicos, ambos de origen cuaternario.

La construcción y proyecto de estructuras geotécnicas sobre suelos blandos es un gran reto para el ingeniero geotécnico. Algunas consideraciones especiales deben tomarse en cuenta para asegurar la estabilidad.

Dentro del marco de actividades para la recuperación de terrenos en la cercanía del puerto de Amberes se tiene pla-

nificada la construcción de un dique parcialmente sumergido cimentado sobre un depósito de fango proveniente de trabajos de dragado.

La figura 1 ilustra un esquema de la geometría y dimensiones del dique. Se puede apreciar que la altura total alcanza los 27 m, de los cuales cerca de 20 m se encuentran debajo del nivel de agua. La masa del dique está compuesta de arena reforzada (parcialmente) con geotextiles para proveer extra seguridad y para proteger los taludes contra la acción erosiva de las olas.

La consistencia del fango permanece blanda incluso después de intentos de consolidarlo por medio de una serie de drenes horizontales conectados a una bomba de vacío para succionar el agua de los poros.

En vista de las condiciones del suelo de cimentación se ha decidido poner en práctica una construcción en etapas. Sin embargo, de acuerdo a estimaciones preliminares la construcción se vería excesivamente prolongada (más de 10 años) lo que resulta poco práctico. Por lo que, además, se ha decidido llevar a cabo trabajos de mejoramiento parcial del fango (con cemento) en las zonas más solicitadas; lo que acelerará el ritmo de construcción y brindará mayor seguridad.

(\*) Presidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Director del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Profesor a tiempo completo en la Universidad de Gante. Bélgica.

(\*\*) Asistente de investigación, Laboratorio de Mecánica de Suelos, Universidad de Gante, Bélgica.

(\*\*\*) Dredging International and Hydro Soil Services NV.

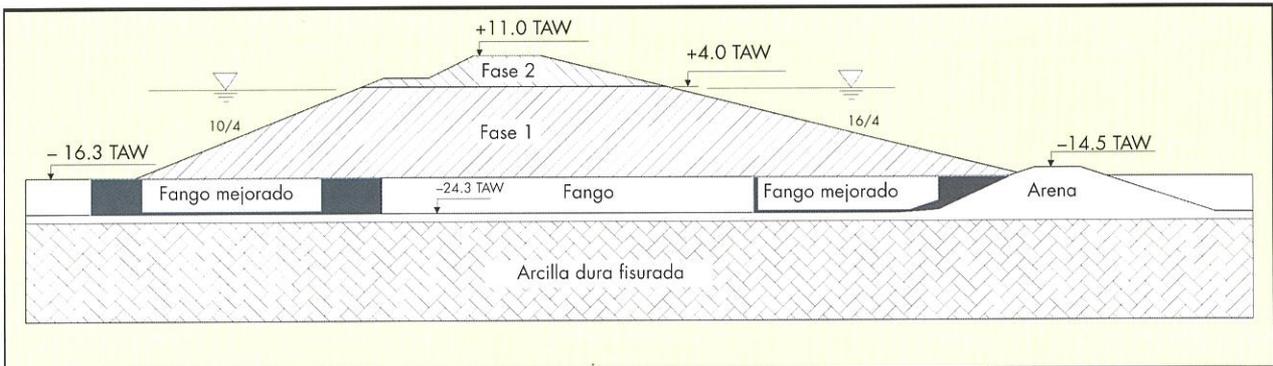


FIGURA 1. Esquema general del dique y del suelo de fundación.

El presente artículo tiene como objetivo revisar algunos conceptos fundamentales y requerimientos básicos empleados para el diseño y análisis del dique en cuestión. Además, se ilustran algunos resultados de un proyecto de investigación destinado a estudiar el mejoramiento de fangos de dragado para la recuperación de terrenos.

## 2. PRINCIPIO DE LA CONSTRUCCIÓN EN FASES

Citando la definición propuesta por Ladd (1991), la construcción por etapas es una técnica que hace uso de un ritmo

controlado de carga de tal modo que se permite la disipación del exceso de presión de poros en el suelo de cimentación. Así, la resistencia no drenada se incrementa gradualmente, aumentando a su vez el factor de seguridad.

Para facilitar la comprensión del comportamiento del suelo de cimentación, la figura 2 ilustra una trayectoria de esfuerzos típica bajo estas condiciones.

Se observa que la carga total (debida a la construcción del terraplén) ilustrada por el punto G es mucho mayor que la capacidad portante del suelo blando al inicio; si la cons-

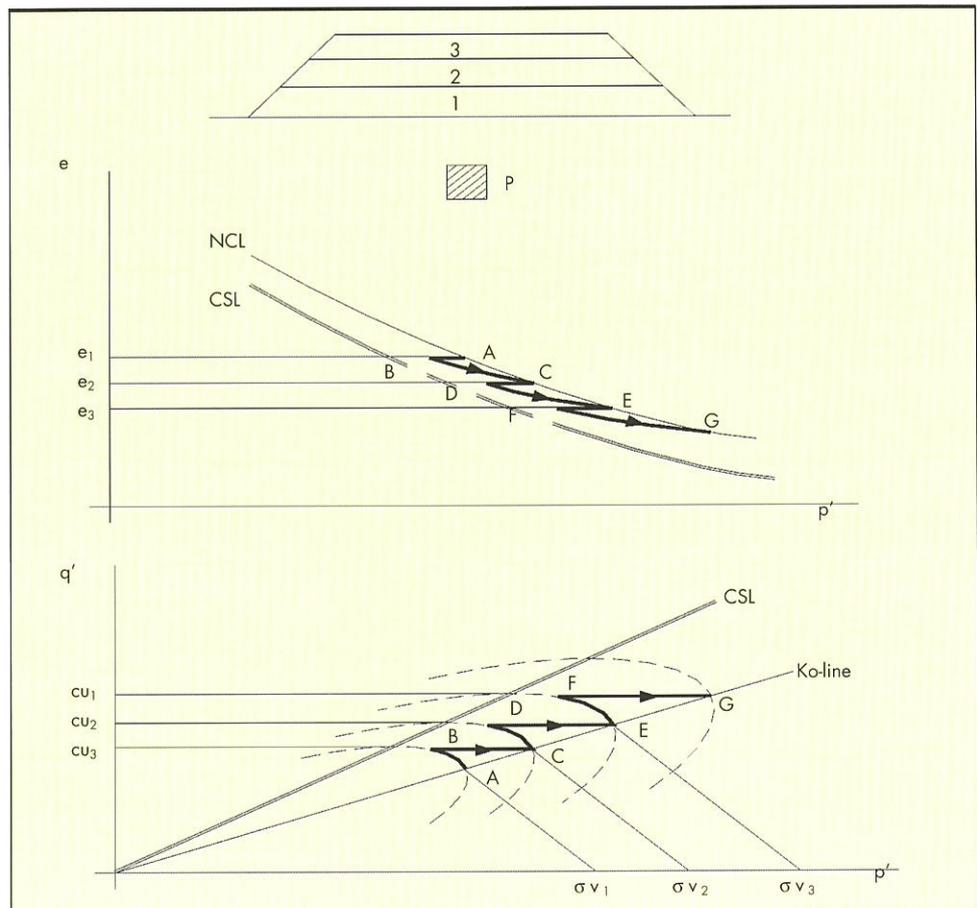


FIGURA 2. Comportamiento del suelo de fundación sujeto a carga en etapas.

	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4
Componente	Historia de esfuerzos y resistencia inicial	Factor de seguridad para la fase	Historia de esfuerz. y resistencia $t=t_N$	Factor de seguridad para la fase N
Determinación de las variables del estado inicial	✓			
Determinación de la resistencia no drenada inicial, $c_{u0}$	✓			
Determinación de parámetros de consolidación			✓	
Modelación de la consolidación			✓	
Análisis de estabilidad		✓		✓

TABLA 1. Metodología para el análisis de estabilidad (Ladd, 1991).

trucción fuera a ejecutarse en una fase únicamente, la estabilidad de la estructura peligraría.

Si se utilizara la técnica de construcción en etapas, el riesgo de falla podría ser considerablemente disminuido; sin embargo, la construcción se prolongaría por algún tiempo. Esa es, probablemente, la mayor desventaja de esta técnica cuando se la emplea sola, sin algún otro método de mejoramiento (i.e. drenes verticales, mejoramiento con cal y/o cemento, etc.).

Tres fases han sido ilustradas en la figura 2. La trayectoria de esfuerzos efectivos para la primera fase de carga es AB. La construcción es detenida antes de alcanzar la línea del estado crítico; se puede apreciar que la resistencia no drenada disponible hasta ese momento es  $c_{u1}$ . Si se permite la disipación del exceso de presión de poros en el suelo, el estado de esfuerzos se desplaza desde el punto B hacia C. La consolidación producirá naturalmente una baja en el índice de poros y a medida que el suelo se densifica, la resistencia no drenada incrementará gradualmente.

Se puede ver que en este punto la resistencia no drenada disponible es  $c_{u2}$  ( $>c_{u1}$ ); entonces, el suelo de fundación está preparado para recibir la segunda fase de carga.

De la misma manera, la construcción se detiene antes de alcanzar la línea del estado crítico (CD) y se introduce un nuevo período de consolidación (DE). Así, la construcción del terraplén puede ser completada sin incurrir en problemas de inestabilidad.

### 3. METODOLOGÍA

El trabajo de Ladd et al. (que data de la década de los '70) establece acertadamente la metodología para el análisis de estabilidad durante la construcción por etapas (tabla 1).

Cuatro pasos se describen. El paso 1 se refiere a la caracterización geotécnica del terreno. El paso 2 consiste en la evaluación de la estabilidad de la fase 1 sobre la base de información obtenida en el paso 1.

Los análisis de estabilidad posteriores (paso 4) requieren la evaluación del ritmo de consolidación (paso 3) para predecir el incremento de la resistencia no drenada. Por lo general estas predicciones tienen un impacto enorme sobre la factibilidad del proyecto, el tiempo de construcción y el costo naturalmente.

Una evaluación rigurosa de las propiedades de consolidación es siempre recomendable de acuerdo con la magnitud e importancia de la obra.

## 4. ANÁLISIS DE LA CONSTRUCCIÓN EN FASES

En el análisis de estabilidad de terraplenes (sobre suelo blando) construidos en fases, las condiciones a corto plazo son las más críticas.

### 4.1 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

La disponibilidad de ordenadores y un conocimiento más avanzado de la mecánica de los problemas de estabilidad han traído consigo cambios considerables en los aspectos computacionales del análisis de estabilidad en la última década.

La estabilidad global se expresa por medio del factor de seguridad (FS), que se calcula a través de métodos de equilibrio límite (EL) o métodos de reducción de resistencia (RR).

Un gran número de métodos EL han sido propuestos (i.e. Janbu, Fellenius, Bishop, Morgenstern) y verificados en la literatura.

Más recientemente una redefinición del FS ha ganado mucha aceptación, especialmente en el campo computacional: "El FS es el factor por el cual la resistencia al corte debe ser reducida".

Tal definición ha sido la base para el desarrollo de una nueva técnica, la llamada Reducción de Resistencia que ha sido introducida de manera sencilla en programas de elementos finitos y diferencias finitas (i.e. PLAXIS, FLAC).

Una de las ventajas de la nueva técnica es que la superficie potencial de falla no está predefinida sino que es localizada automáticamente. Una limitación es la hipótesis implícita que el factor de reducción es uniforme (factor global) incluso cuando más de un tipo de suelo entra en el análisis.

Las figuras 3 y 4 ilustran los resultados de un análisis comparativo sencillo entre métodos EL y RR. El método EL ha sido introducido por medio de soluciones de conocimiento general (Bishop et al., 1960; Taylor, 1937) y el método RR ha sido introducido a través del programa de elementos finitos PLAXIS. Varios cálculos han sido efectuados para distintos taludes en combinación con un rango amplio de parámetros mecánicos.

Se puede observar que los factores de seguridad basados en métodos de reducción de resistencia concuerdan, o bien, se aproximan bastante a aquellos basados en el método clásico de equilibrio límite.

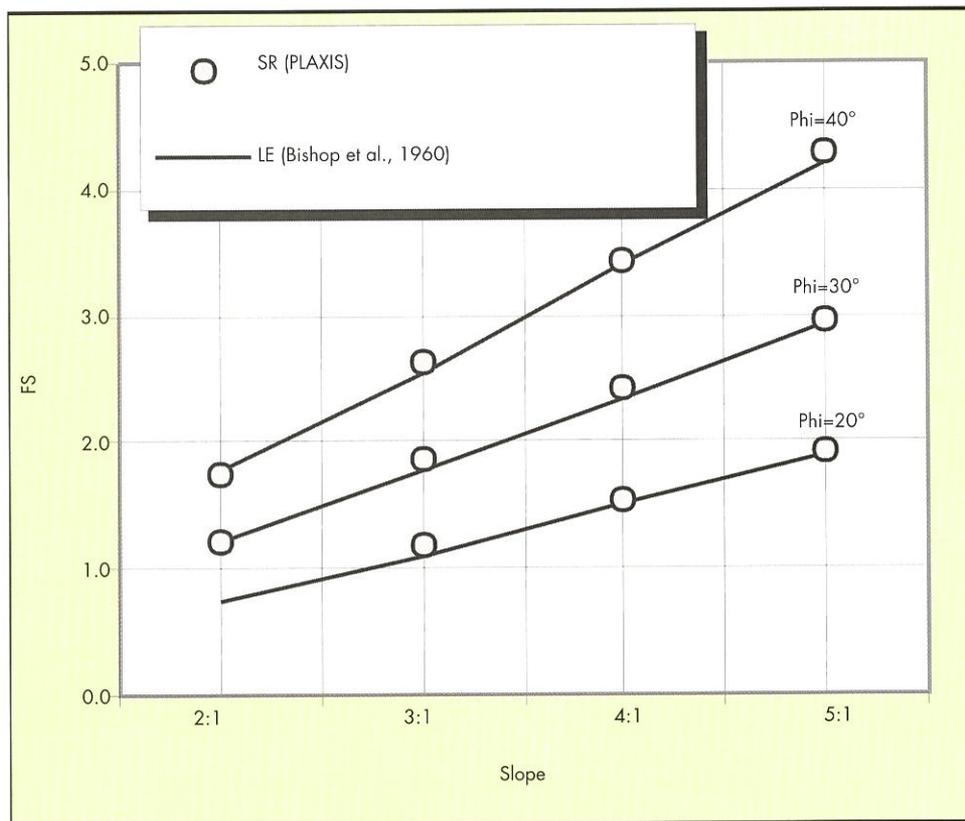


FIGURA 3. Método de reducción de resistencia vs. equilibrio límite: análisis en estado drenado ( $c'=0$ ,  $\gamma>0$ , medio semi-infinito).

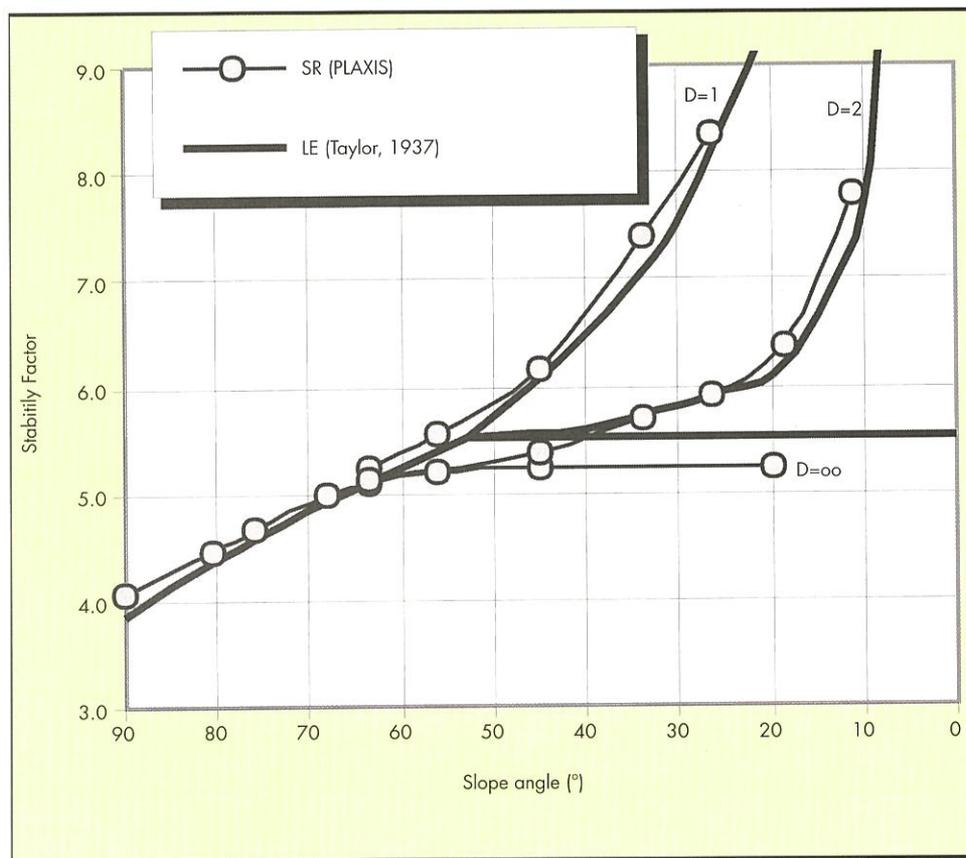


FIGURA 4. Método de reducción de la resistencia vs. equilibrio límite: análisis en estado no drenado.

**4.2. MODELACIÓN DE LA CONSOLIDACIÓN**

A pesar de que en la práctica muchos hacen uso de tablas o ábacos (por lo general basados en la teoría de Terzaghi), su utilización en este tipo de problemas podría ocasionar estimaciones muy optimistas especialmente en depósitos de suelo estratificado o suelos muy blandos.

Estos casos requieren de un análisis especial que tome en cuenta factores adicionales (i.e. funciones no lineales para describir los parámetros de consolidación, incremento uniforme de carga, condiciones de borde menos restrictivas, etc).

Dos tipos generales de teorías de consolidación pueden ser identificados: la teoría clásica (de acuerdo a Terzaghi) y la teoría a deformaciones finitas (Gibson, 1967). La segunda es la más general.

**4.2.1. Teoría clásica de consolidación**

La derivación de la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la consolidación puede hallarse en cada texto de mecánica de suelos. Ej:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{d(q)}{dt} \tag{1}$$

Donde  $c_v$  es el coeficiente de consolidación,  $u$  es el exceso de presión de poros,  $z$  es la coordenada Euleriana,  $t$  es el tiempo y  $q=q(t)$  describe la variación del esfuerzo total en función del tiempo. La solución de la ecuación diferencial lineal (1) permite predecir el exceso de presión de poros para cualquier instante de tiempo.

Una rutina de solución, SSSCON-FD (Verástegui, 2001), ha sido desarrollada en el programa para análisis matemático *Maple 6* ©. El programa está basado en el método de diferencias finitas en combinación con la técnica numérica Crank-Nicholson (diferencias finitas de segundo orden) que asegura estabilidad en el analysis. Finalmente la ecuación (1) puede replantearse como:

$$\frac{c_v \cdot \Delta t}{2} \cdot \left[ (\delta^2 u^j)_{i,t+1} + (\delta^2 u^j)_{i,t} \right] = (u_{i,t+1} - u_{i,t}) - (q_{t+1} - q_t)$$

Donde

$$(\delta^2 u^j)_{i,t} = \frac{1}{\Delta h^2} \cdot (u_{i-1,t}^j - 2u_{i,t}^j + u_{i+1,t}^j) \tag{2}$$

El programa permite el análisis de consolidación en un medio estratificado con condiciones de borde permeables, impermeables y parcialmente permeables. El empleo de la función  $q=q(t)$  provee mayor flexibilidad en el análisis de construcción en etapas.

La figura 5 ilustra un ejemplo de análisis de consolidación en el cual se tienen 2 etapas de carga aplicadas gradualmente.

**4.2.2. Teoría de consolidación a deformación finita**

La teoría de consolidación a deformación finita (Gibson, 1967) se constituye en la más general ya que el efecto de la gravedad y deformaciones (que a su vez producen cambios en los parámetros de consolidación) son tomados en consideración.

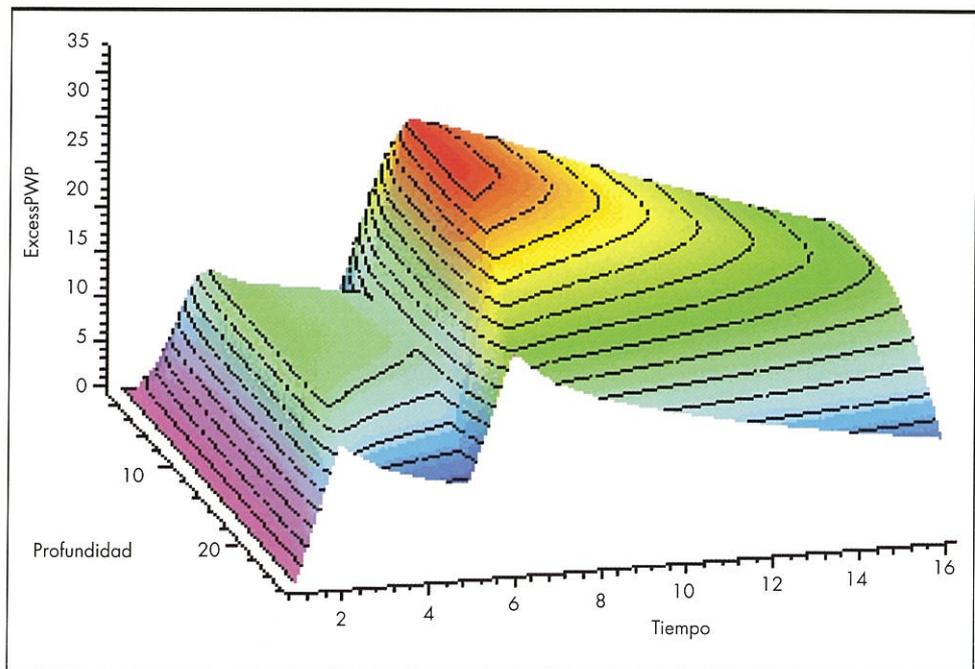
En esta teoría el fenómeno de la consolidación está gobernado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ g(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] - b(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

donde

$$g(e) = - \frac{k(e)}{\gamma_w \cdot (1+e)} \cdot \frac{d\sigma'}{de} \tag{4}$$

$$b(e) = \left( \frac{G_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \frac{d}{de} \left( \frac{k(e)}{1+e} \right) \tag{5}$$



**FIGURA 5.** Modelación de la disipación del exceso de presión de poros en un caso con 2 fases de carga (SSCON-FD).

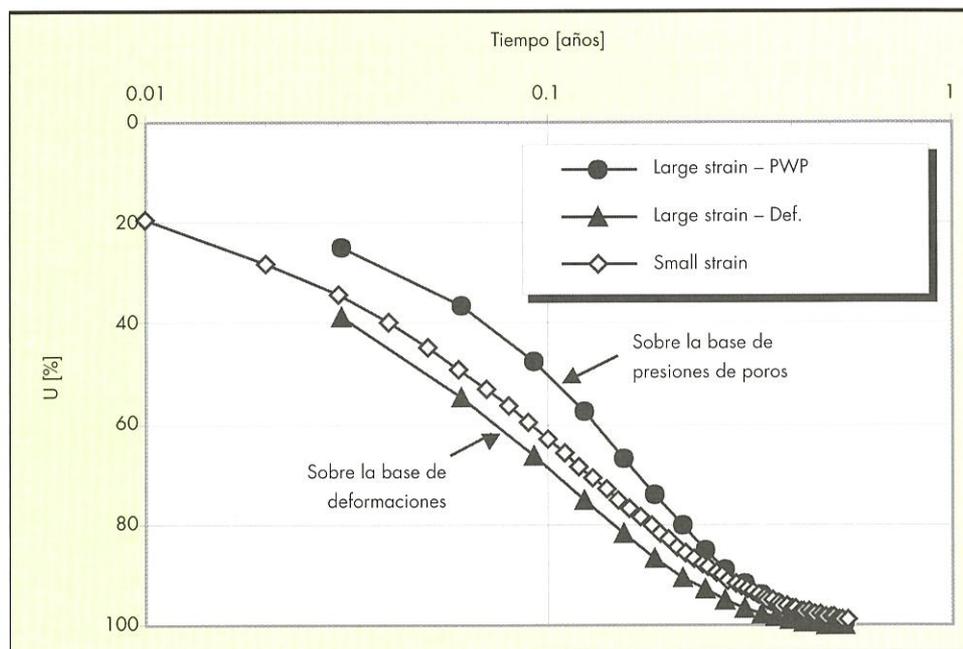


FIGURA 6. Evaluación del grado de consolidación por ambos métodos [Large strain (deformaciones finitas)-FISCC vs. Small strain (teoría clásica)-SSCON-FD].

$e$  = índice de poros;  $k(e)$  = función de conductividad hidráulica;  $z$  = coordenada simplificada.

La función  $g(e)$  juega el rol de coeficiente de consolidación,  $g=cv/(1+e)^2$ , y la función  $b(e)$  introduce el efecto de la gravedad en el análisis. Las ecuaciones 3, 4 y 5 junto con condiciones de borde apropiadas y ecuaciones constitutivas del material [i.e.  $k=k(e)$  &  $s=s(e)$ ] establecen un sistema del cual se puede obtener una solución numérica.

Varias soluciones han sido propuestas en la literatura, así como también programas (i.e. FISCC & CBFISCC-Van Impe P., 1999).

**4.2.3. Comparación**

La figura 6 compara los resultados del análisis de la consolidación por ambos métodos para un caso ficticio utilizando los parámetros del fango en cuestión. Se puede observar que la teoría clásica (Terzaghi) estima un ritmo de asentamiento más lento que la teoría a deformaciones finitas. Asimismo, se puede apreciar que la teoría clásica sobreestima el ritmo de la disipación de presión de poros, lo que en algún caso podría ocasionar predicciones del factor de seguridad demasiado optimistas para problemas de construcción en etapas.

La teoría de consolidación a deformaciones finitas brinda, sin lugar a duda, una aproximación más fiable. Sin embargo, la teoría clásica, gracias a su simplicidad, podría aún servir como referencia para estimaciones groseras que más tarde deberán ser refinadas para un diseño final.

Es poco práctico establecer un límite de deformación que determine un rango aceptable para la utilización de la teoría clásica y la teoría a deformaciones finitas ya que las propiedades intrínsecas de cada material juegan también un papel muy importante. Experiencia y buen juicio son verdaderamente indispensables.

**4.3. RESISTENCIA NO DRENADA AL CORTE**

La ejecución de un diseño de construcción en etapas supone (por lo general) la evaluación de la estabilidad de los

taludes en condiciones no drenadas. Por lo tanto, la caracterización de la resistencia no drenada al corte del suelo de cimentación tanto al inicio como después de la consolidación es la base fundamental de un diseño satisfactorio.

Datos recopilados por Ladd et al. (1974) de una serie extensa de pruebas de laboratorio basados en el concepto del comportamiento normalizado, que el mismo autor introdujo, muestran que la resistencia al corte  $c_u$  en arcillas reconstituidas puede predecirse de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = S \cdot OCR^m \tag{6}$$

donde  $S$  y  $m$  son constantes que dependen del material y que a su vez varían en un rango de valores no muy disperso (figura 7). Entonces, la ecuación 6 se constituye en la base para la evaluación de  $c_u$  en problemas de construcción en etapas.

La suposición tradicional que afirma que  $c_u$  se determina únicamente por medio del contenido de humedad (o bien del índice de poros) ha sido refutada repetidas veces con mediciones de anisotropía de la resistencia al corte en depositos naturales de arcilla.

Pruebas de laboratorio en las que se reproducen las condiciones de anisotropía de esfuerzos revelan efectivamente que la resistencia al corte derivada de ensayos de compresión (TC en la figura 7) es por lo general mayor que la resistencia derivada de ensayos de corte directo simple (DSS) y esta a su vez mayor que la resistencia derivada de ensayos de extensión (TE).

El comportamiento de arcillas sometidas a corte puede ser anisotrópico debido a anisotropía en la estructura del suelo (i.e. estratificación) o a la anisotropía del estado de esfuerzos (i.e.  $s'h/s'v > 1$ ). En la práctica ambas juegan un papel determinante. La trascendencia de la anisotropía de la resistencia no drenada en el análisis de estabilidad de taludes es puesta en claro en la figura 8.

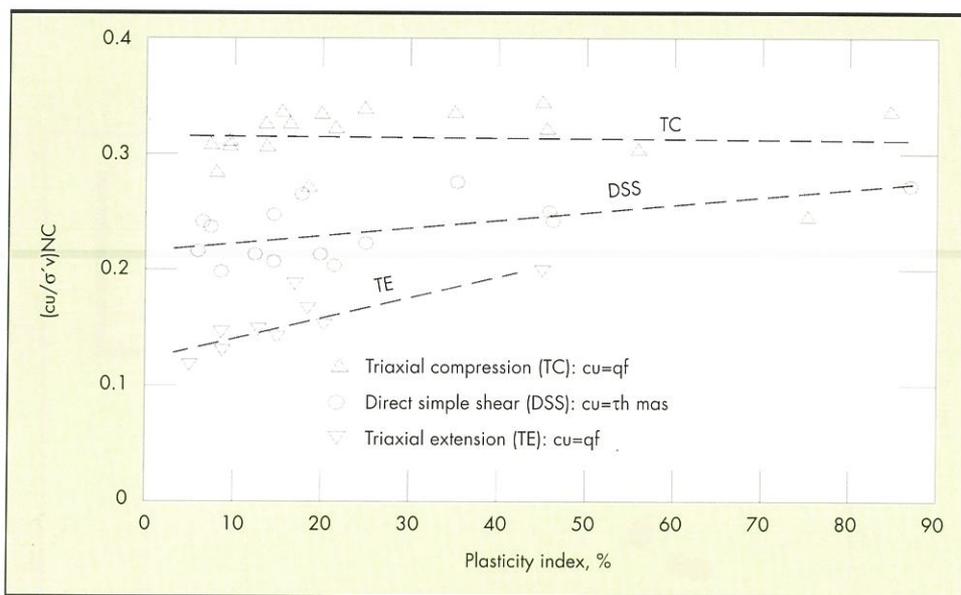


FIGURA 7. Anisotropía de la resistencia no drenada derivada de ensayos de corte sobre muestras consolidadas anisotrópicamente. (Jamiolkowski et al., 1985).

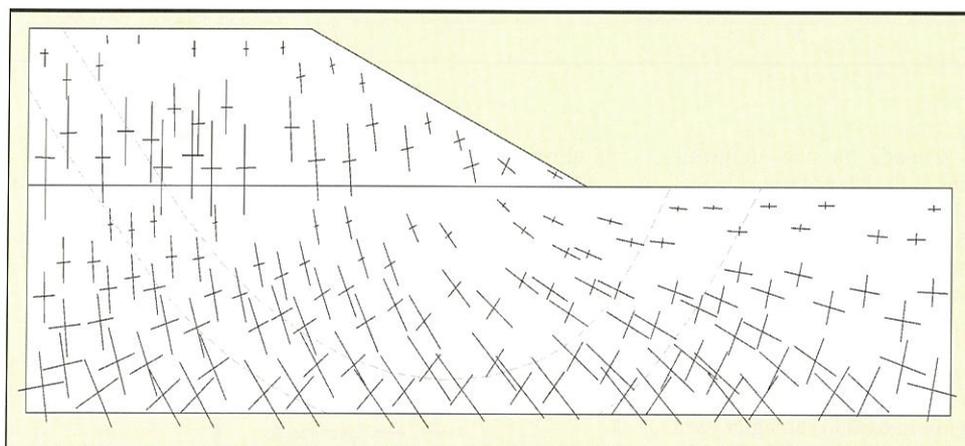


FIGURA 8. Orientación de esfuerzos principales debajo de un terraplén fundado en suelo blando.

Se puede apreciar que la orientación del esfuerzo efectivo principal mayor en el suelo de fundación varía de vertical (compresión) a horizontal (extensión) a lo largo de la zona potencial de falla (limitada por líneas segmentadas). Este hecho, junto con la figura 7, pone en evidencia que la resistencia movilizada a lo largo de la superficie potencial de falla no es uniforme, como es asumida por lo general en métodos simplificados.

Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado en el momento de escoger parámetros de resistencia para el diseño. La práctica muy común de utilizar la resistencia no drenada derivada de ensayos de compresión, únicamente, podría producir resultados muy optimistas especialmente para arcillas de baja plasticidad.

### 5. MEJORAMIENTO DE FANGOS DE DRAGADO CON ADICIÓN DE CEMENTO

Con objeto de incrementar los parámetros mecánicos del fango de dragado, se ha decidido poner en práctica un método de mejoramiento con adición de cemento. Para este fin, se ha procedido con un proyecto de investigación en

laboratorio destinado a seleccionar un determinado tipo de cemento que desempeñe óptimamente.

#### 5.1. PROPIEDADES DEL FANGO NO MEJORADO

Algunas de las características físicas del fango han sido recopiladas en la tabla 2.

Indice	Valor
Contenido de humedad	115 %
Contenido orgánico	6 %
Contenido de cal	13.9 %
Límite líquido	124.4
Índice de plasticidad	77.7
Densidad	1.4 g/ml

TABLA 2. Propiedades físicas del fango de dragado.

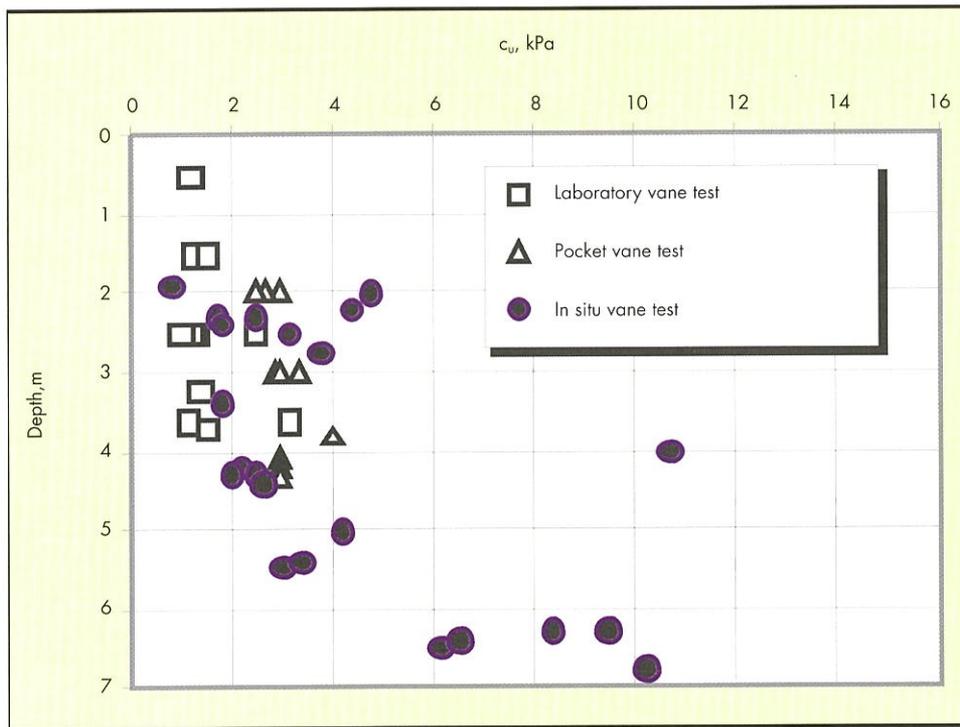


FIGURA 9. Resistencia no drenada del fango de dragado en el sitio de fundación.

Asimismo, la resistencia no drenada ha sido determinada mediante ensayos de campo y de laboratorio. Los resultados se ilustran en la figura 9.

Se puede apreciar que la resistencia no drenada promedio en el depósito de fango de cerca de 8m varía principalmente entre  $c_u = 2$  y  $c_u = 4$  kPa.

### 5.2. MEJORAMIENTO EN LABORATORIO

La dosificación de cemento en la mezcla fue fijada a  $275\text{kg/m}^3$  (275 kg de cemento por cada metro cúbico de fango). El cemento fue previamente mezclado con agua para formar un slurry con un índice agua/cemento = 0.8. A continuación, la mezcla fango-slurry de cemento fue llevada a cabo en una mezcladora de masa por un período de 4 minutos aproximadamente. Finalmente, el producto fue trasladado y muy ligeramente compactado en moldes cilíndricos, tubos de PVC ( $f=5.7\text{cm}$ ,  $H=11.5\text{cm}$ ) previamente seccionados longitudinalmente para facilitar la extracción de las muestras una vez endurecidas.

Las moldes con fango mejorado fueron sellados con un film de parafina y luego almacenados en un ambiente húmedo con temperatura constante  $T=10^\circ\text{C}$ . Además, con objeto de prevenir pérdidas de humedad, las muestras fueron sumergidas en contenedores llenos de agua.

Se han utilizado (inicialmente) 4 tipos de cemento. Cemento A y B son cementos con escorias de horno alto (III/A) con distintas resistencias (32.5 y 42.5 respectivamente). Cemento C es un cemento comercial especial para obras geotécnicas. Cemento D es un cemento rápido, utilizado por lo general en obras offshore.

### 5.3. PROPIEDADES DEL FANGO MEJORADO

Seis tiempos de curado fueron seleccionados para la ejecución de ensayos de corte (i.e. 7, 14, 28, 56, 84 y 120 días).

El ensayo de compresión no confinada es tal vez la prueba de uso más común para la estimación de la resis-

tencia al corte de suelo mejorado. A pesar de sus limitaciones, el ensayo es de gran aceptación gracias a su sencillez y corta duración.

Los resultados de las pruebas para cada tipo de cemento y tiempo de curado han sido resumidos en la figura 10.

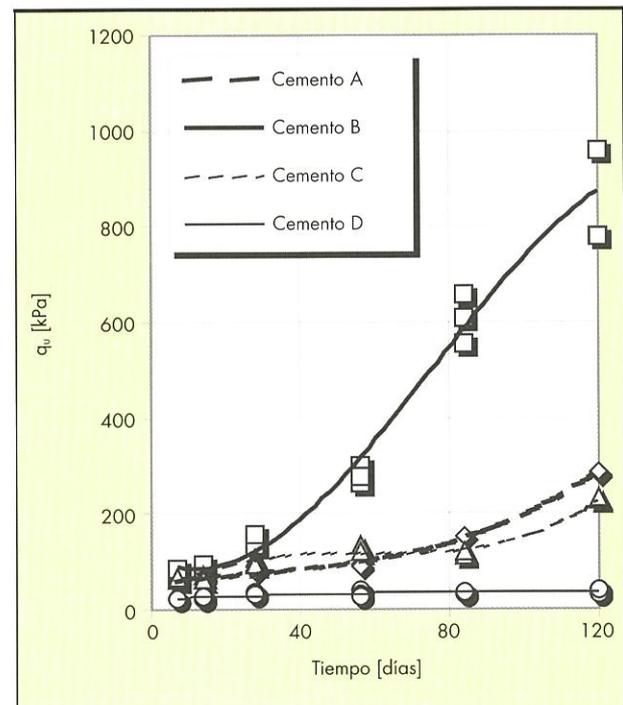
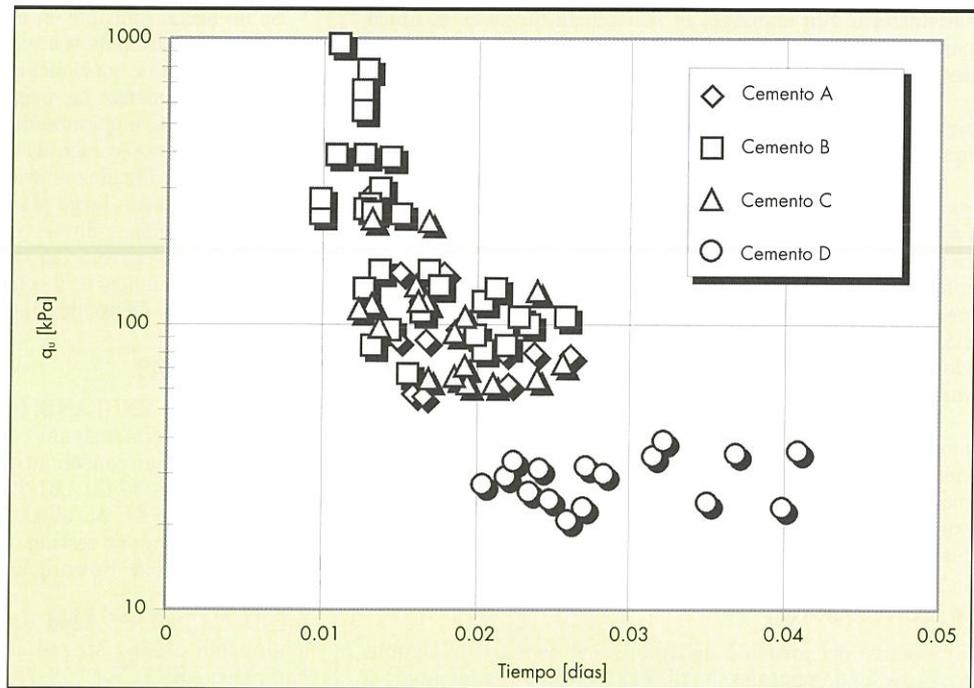


FIGURA 10. Resistencia a la compresión no confinada vs. tiempo de cura.



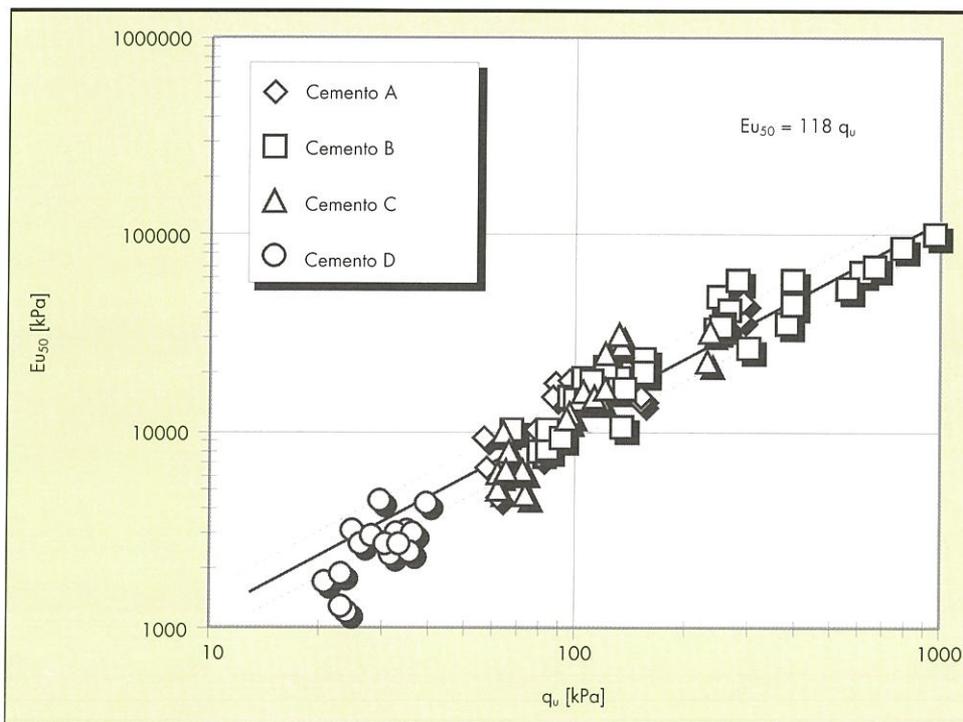
**FIGURA 11.** Resistencia a la compresión vs. Deformación vertical en la falla: Distintos cementos y tiempos de cura.

La resistencia a la compresión uniaxial se incrementa con el tiempo tal como en el caso del hormigón; sin embargo, se observa que el ritmo de incremento no decrece luego de 28 días, al contrario, se acrecienta (a excepción de Cemento D).

El desarrollo de la resistencia del cemento con escorias de horno alto es por lo general más lento que el del cemento portland común, lo que podría explicar el desarrollo retardado de la resistencia en las muestras de fango mejoradas

con cemento A y B. Además, no se debe olvidar que el fango está compuesto principalmente de agua (54% agua + 46% sólidos). Entonces, la cementación de las partículas sólidas (compuestas de 89% finos + 11% arena) que se encuentran muy dispersas en la mezcla requerirá de más tiempo para la formación de una estructura continua.

De la figura 10 se puede concluir que, en este caso, el mejoramiento con cemento con escorias de horno alto es el más



**FIGURA 12.** Módulo de Young  $E_{U50}$  derivado de ensayos de compresión no confinada: Distintos cementos y tiempos de cura.

satisfactorio. Sin embargo, la resistencia  $q_u$  no es el único parámetro que se debe tomar en consideración al momento de evaluar la técnica de mejoramiento.

Las figuras 11 y 12 recopilan datos adicionales de los ensayos concernientes a la ductilidad y deformación de las muestras de fango mejorado.

La figura 11 enseña la relación entre la resistencia a la compresión y la deformación vertical en la falla para cada ensayo. Se puede observar que las muestras más resistentes tienden a fallar a pequeñas deformaciones, mientras que las muestras menos resistentes lo hacen a deformaciones mayores. Es recomendable no pasar por alto este criterio, en función del nivel de deformaciones esperado, en el momento de elegir un método de mejoramiento apropiado para una aplicación en particular.

Finalmente, la figura 12 ilustra la correlación entre el módulo de deformación  $E_{u50}$  (secante a 50% de deformación) y la resistencia a la compresión uniaxial  $q_u$ . Todas las muestras parecen exhibir la misma tendencia lineal. La mayoría de los datos del fango de dragado mejorado están contenidos en el rango  $90 < E_{u50}/q_u < 150$ .

## 6. CONCLUSIONES

El objetivo del presente artículo fue el de discutir algunos aspectos fundamentales del diseño geotécnico de terraplenes sobre suelos blandos en relación a un proyecto de recuperación de terrenos en la cercanía del puerto de Amberes en Bélgica.

Las condiciones de estabilidad a corto plazo son por lo general las más críticas para este tipo de proyectos. El análisis de estabilidad para la primera etapa de construcción se basa en las características iniciales del terreno; sin embargo, el análisis de las etapas subsiguientes requiere de un buen conocimiento del ritmo de consolidación con objeto de predecir acertadamente la resistencia no drenada. Estas predicciones tienen por supuesto un gran impacto en la factibilidad del proyecto, razón por la que se recomienda aquí la mayor precisión.

Se ha hecho hincapié en el efecto de la anisotropía de la resistencia no drenada sobre el análisis de estabilidad de taludes con el fin de concienciar al lector a escoger cuidadosamente los parámetros de resistencia en problemas similares.

En cuanto al mejoramiento del fango de dragado, se ha comprobado que el cemento con escorias de horno alto (entre los cementos utilizados en este proyecto), produce las resistencias más altas a largo plazo, sin embargo, la masa mejorada se hace menos ductil (más frágil). Se ha comprobado también que la correlación entre el módulo de deformación  $E_{u50}$  y la resistencia a la compresión uniaxial es lineal y al parecer independiente del tipo de cemento.

## 7. REFERENCIAS

- GIBSON, R.E., ENGLAND, G.L., HUSSEY, M.J. (1967): The theory of one dimensional consolidation of saturated clay: Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layer. **Geotechnique**, 17 (3), 261-273.
- JAMIOLKOWSKI, M. et al. (1985): New developments in field and laboratory testing. **Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Mech. & Found. Eng.**, San Francisco. Vol. 1, 57-153.
- LADD, C.C. (1991): 22nd Karl Terzaghi Lecture: Stability evaluation during staged construction. **Jour. Geotech. Eng. Div. ASCE**. Vol. 117, No.4, 540-615.
- SCHOFIELD, A., WROTH P. (1968): Critical state soil mechanics. McGraw Hill, London.
- VAN IMPE, P. 1999. Consolidatie van verzadigde, sterk samendrukbare poreuze media. Lab. Soil Mechanics, Ghent University, in dutch.
- VAN IMPE, W.F. 2001. Deep mixing. Lab. Soil Mechanics, Ghent University.
- VAN IMPE, W.F. & VERÁSTEGUI, R.D. 2001. Stability and deformations of an underwater dam founded on soft soil: Deel I t.e.m. VI. Lab. Soil Mechanics, Ghent University, in dutch.
- VERÁSTEGUI R.D. 2001. Geotechnics of staged construction. Lab. Soil Mechanics, Ghent University.