

# Visualización del mecanismo de ruptura del penetrómetro mini T-bar

Marcos Orozco Calderón & Pierre Foray  
*Laboratoire 3S-R, Grenoble, Francia*  
Alain Puech  
*FUGRO-France, Nanterre, Francia*



## RESUMEN:

Se presenta el mecanismo de falla en un suelo de aguas profundas durante la penetración de un mini T-bar. Se realizaron ensayos experimentales de visualización a fin aplicar el método de correlación de imágenes. La forma del mecanismo de falla se determinó a partir de los vectores de desplazamiento calculados con el método de correlación de imágenes numéricas. Se presentan las dificultades experimentales encontradas, así como las técnicas desarrolladas para poner a punto el cambio de textura de superficies de suelos arcillosos saturados.

## ABSTRACT:

This paper presents the mechanism of failure in a deep-sea soil during penetration of a mini T-bar. Experimental studies were conducted to display the mechanism using the digital image correlation. The shape of the failure mechanism is determined from the displacement vectors calculated by the method of digital image correlation. The paper includes the experimental difficulties encountered, as well as the techniques developed to change the surface texture of saturated clay soils.

## 1 INTRODUCCION

Una campaña de reconocimiento en aguas profundas incluye el estudio, innovación y la adaptación de diferentes técnicas de exploración. Sobre todo que el fondo marino en aguas profundas se encuentra a más de 1000 m de tirante de agua (Equihua-Anguiano 2010).

Dentro de las nuevas técnicas de recuperación de suelo, primeros 40-50 cm del fondo marino, y la determinación de la resistencia no drenada se encuentran la *box-corer* y el penetrómetro mini T-bar. La exploración con un penetrómetro T-bar es similar al de un penetrómetro de tipo CPT, la diferencia es la sonda: una barra horizontal para el T-bar y una punta cónica para el CPT.

La utilización del penetrómetro mini T-bar para la obtención de la resistencia no drenada de suelos blandos de aguas profundas es cada vez más frecuente, un trabajo que muestra su aplicación es Orozco-Calderón et al. (2008a). La utilización in situ y en laboratorio es relativamente fácil a realizar. La combinación del penetrómetro mini T-bar con la *box-corer*, utilizada para la recuperación de suelo no alterado del fondo marino en aguas profundas, permite obtener con mayor detalle la resistencia de la parte superficial del fondo marino; además de realizar ensayos cíclicos para obtener la evolución de la sensibilidad.

Lo anterior toma mayor importancia para un buen diseño de la estabilidad del ducto ante las acciones de corrientes, o bien para dar suficientes elementos que permitan un buen diseño ante posible pandeo horizontal, vertical (o acoplados) de los ductos.

Existen también elementos estructurales que se instalan en el fondo del mar, como por ejemplo

terminaciones de los ductos (PLET's), que son grandes placas de acero que se instalan en la superficie del fondo marino. Para el diseño de la cimentación de este tipo de estructuras se requiere conocer la resistencia no drenada del suelo superficial.

Aunque la interpretación teórica de los resultados del penetrómetro T-bar es simple, en la práctica y sobre todo a poca profundidad de su penetración, el mecanismo de falla teórico no se presenta. Con la aplicación de la correlación de imágenes (DIC) se estudió el mecanismo de falla en la vecindad de un penetrómetro mini T-bar.

Un procedimiento para la realización de ensayos de mini T-bar a poca profundidad de penetración lo presenta Puech et al. (2010).

## 2 ASPECTOS PRACTICOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL PENETROMETRO T-BAR

El interés de estudiar los penetrómetros de tipo flujo de deformación (*full-flow*), se debe a que en las especificaciones actuales para los trabajos de reconocimiento de los suelos *offshore* se indica su utilización. Actualmente se utiliza un penetrómetro mini T-bar de aproximadamente 10 mm de diámetro y 65 mm de longitud, Figura 1.

Para la recuperación de suelos superficiales de aguas profundas la *box-corer* representa una buena opción, puesto que permite recuperar un bloque de suelo de 60 cm × 60 cm × 60 cm. Una vez que el bloque de suelo se encuentra en cubierta del barco de exploración, se instala al sistema del penetrómetro mini T-bar para

realizar ensayos de penetración y así caracterizar la resistencia no drenada.

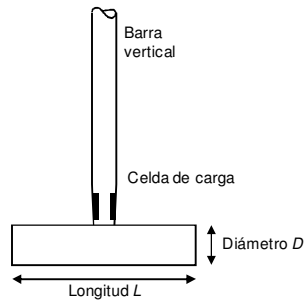


Figura 2. Penetrómetro tipo T-bar o full-flow.

### 3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DEL PENETROMETRO T-BAR

La solución teórica utilizada para la interpretación de la resistencia no drenada es simple. Randolph y Houlsby (1984) utilizaron la teoría de la Plasticidad para obtener la carga máxima de un cilindro que se encuentra al interior de un suelo y que es sometido a una traslación lateral. Las dos soluciones (inferior y superior) toman en cuenta la rugosidad de la barra horizontal del penetrómetro, a través del concepto de adherencia ( $\alpha = \alpha s_u$ ). La Figura 2 muestra las redes de las líneas características para los casos de superficie lisa ( $\alpha = 0$ ) y rugosa ( $\alpha = 1$ ). Se puede observar que para la superficie rugosa la red de líneas características es más grande que para la superficie lisa, por lo tanto la fuerza límite es mayor.

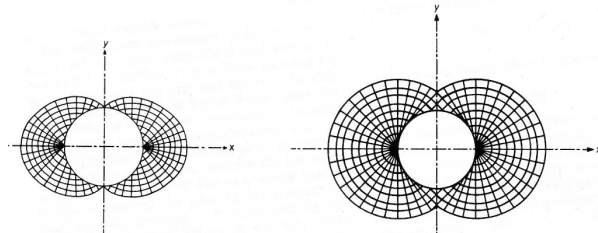


Figura 2. Redes de curvas características para una superficie lisa (a) y rugosa (b), Randolph y Houlsby (1984).

La ecuación de la carga límite está en función del factor adimensional  $N$ :

$$\frac{F_v}{2r s_u} = N \quad (1)$$

donde:  $F_v$  = fuerza de contacto por unidad de longitud;  $r$  = radio de la barra horizontal; y  $s_u$  = resistencia al esfuerzo cortante no drenada del suelo.

La expresión para  $N$  es:

$$N = \pi + 2\Delta + 2 \cos \Delta + 4 \left[ \cos \left( \frac{\Delta}{2} \right) + \sin \left( \frac{\Delta}{2} \right) \right] \quad (2)$$

donde:  $\Delta = \arcsen \alpha$

Se ha observado experimentalmente que el mecanismo de ruptura no se desarrolla completamente cuando el penetrómetro se encuentra cercano a la superficie del suelo (Orozco-Calderón 2009, Puech et al. 2010). De ahí que se requiera estudiar este fenómeno.

### 4 ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Se presenta parte del trabajo experimental realizado para la aplicación del método de correlación de imágenes numéricas, a fin de obtener la visualización del mecanismo de falla del suelo cercano al penetrómetro mini T-bar. Se presentan las dificultades experimentales encontradas, así como las técnicas desarrolladas para poner a punto la parte experimental para la correlación de imágenes. La cinemática de ruptura fue observada a diferentes profundidades de penetración, el método DIC también puede aplicarse en la etapa de extracción así como también la aplicación de ciclos penetración-extracción.

Orozco-Calderón (2009) presenta un extenso trabajo experimental para el estudio de diferentes variables que afectan los resultados de la resistencia no drenada obtenida con el penetrómetro mini T-bar, entre las cuales se encuentran: rugosidad de la superficie de la sonda, velocidad de penetración, presencia de agua en la superficie del suelo, resistencia del suelo, profundidad del ensayo, entre otras.

#### 4.1 Mini penetrómetros T-bar utilizados

Los mini penetrómetros estándar que se utilizan en la práctica tienen una superficie intermedia entre lisa y rugosa, de ahí que el valor del factor  $N$  igual a 10.5 para obtener la resistencia no drenada  $s_u$ .

Para el estudio experimental se tomó como referencia las dimensiones de un penetrómetro utilizado en la práctica (T-bar RF), con una relación diámetro/longitud ( $D/L$ ) de 6.25, asegurando un mecanismo de deformación plana.

Se construyeron dos penetrómetros T-bar para estudiar los principales aspectos físicos. El primero en acero inoxidable para asegurar una superficie lisa ( $\alpha = 0$ ), y el segundo en aluminio recubierto con papel lija número P240 (tamaño de grano de  $58.5 \mu\text{m}$ ), asegurando una superficie rugosa ( $\alpha = 1$ ). Las dimensiones de ambos mini-penetrómetros son similares al de referencia, como se indica en la Tabla 1. En la Figura 3 se muestran ambos penetrómetros.

Tabla 1. Características de los penetrómetros mini T-bar del laboratorio 3S-R y el de referencia T-bar RF

Tipo T-bar	Diámetro $D$ , mm	Longitud $L$ , mm	Diámetro de la barra, mm	Tipo de superficie
T-bar RF	12	75	11.3	...
T-bar I	12	75.3	10	Lisa
T-bar A	12.4	76.8	10	Rugosa

#### 4.2 Sistema de aplicación de cargas y adquisición de datos

En un actuador electromecánico SKF-CAR32 se instaló el penetrómetro T-bar. La penetración en el suelo se realiza a velocidad constante y la entrada o salida del eje del actuador se realiza con un control. Una celda de carga de tipo S de 500 N de capacidad se utilizó para medir la fuerza de penetración/extracción. Se utilizó un sensor Scaime con un cable de 1270 mm de longitud para medir los desplazamientos verticales, eventualmente se utilizó un LVDT de  $\pm 65$  mm. El ensamble del equipo se muestra en la Figura 4.



Figura 3. Penetrómetros mini T-bar del laboratorio 3S-R, con superficie lisa y rugosa (a), papel lija utilizado para obtener una superficie rugosa (b).

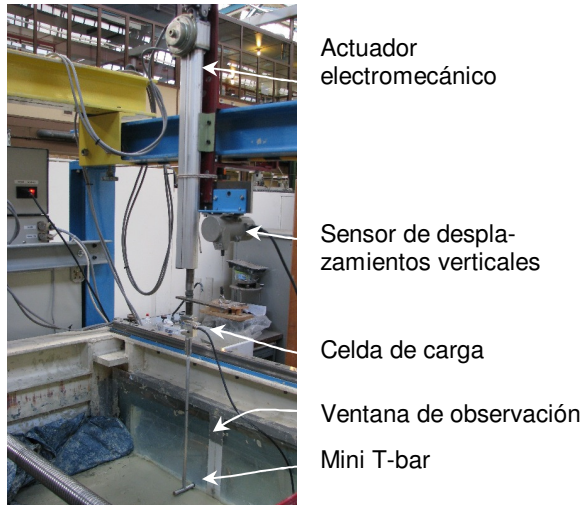


Figura 4. Sistema para la penetración del mini T-bar.

Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos instalada en una computadora para registrar las principales variables de los ensayos, principalmente la fuerza sobre el penetrómetro, desplazamiento vertical y el tiempo.

#### 4.3 Tanque donde se instala el suelo

El tanque de la VisuCuve se utilizó para instalar los diferentes suelos de este estudio. Sus ventanas laterales

permiten visualizar la penetración del T-bar y a través de ella tomar imágenes digitales para la aplicación del método DIC. Las dimensiones del tanque son: 2.0 m de longitud, 0.90 m de ancho y 1.0 de profundidad (Orozco-Calderón et al. 2008b y Orozco-Calderón 2009).

#### 4.4 Características del suelo utilizado

El suelo utilizado para la visualización del mecanismo de ruptura corresponde a una arcilla típica de aguas profundas (BHM14). Las propiedades índice se indican en la Tabla 2, el límite líquido se obtuvo con cono (30°/80 g).

Tabla 2. Características del suelo arcilloso de aguas profundas.

Suelo	w, %	w <sub>L</sub> , %	PI, %	I <sub>L</sub>	Observaciones
BHM14	160-176	167	102	0.9-1.1	Formación <sup>1</sup>

<sup>1</sup>suelo formado a partir de muestras intactas.

#### 4.5 Preparación de la superficie del suelo para la aplicación de la correlación de imágenes

Los principios básicos del método de correlación de imágenes digitales se presentan en otro trabajo de esta reunión (Orozco-Calderón et al. 2010).

El suelo natural de aguas profundas BHM14 se utilizó para observar y determinar el mecanismo de falla del suelo cercano al penetrómetro. El suelo se instaló en una caja de madera, con plástico en su interior para evitar que el suelo perdiera agua (Fig. 5). El color natural del suelo es café oscuro, cuyo contraste no favorece la aplicación de la correlación de imágenes.



Figura 5. Arcilla natural BHM14 de aguas profundas (a) instalada en un cajón de madera (b) para visualización de mecanismos de falla.

A la superficie del suelo se le realizó un tratamiento de su textura, esta tarea que no fue sencilla. El personal del laboratorio 3S-R tiene mucha experiencia para el tratamiento de superficies de muestras de roca, que en general se encuentran secas y lisas. Las diferencias importantes entre el suelo arcilloso y la roca son la presencia de agua, puesto que el suelo está saturado, y la deformabilidad. Antes de este estudio en el laboratorio 3S-R no existían antecedentes para la aplicación de la

técnica DIC en suelos arcillosos saturados y la aplicación de cargas cíclicas.

Encontrar una solución para la preparación de la superficie no fue simple. Se realizaron diversas pruebas para cambiar la textura, como: la proyección de pintura blanca (Fig. 6a), aplicación de caolín en polvo (Fig. 6b); cuyo estado inicial parecía satisfactorio pero su saturación lo volvía poco aceptable. Otra técnica fue de pulverizar la superficie con partículas finas que contrastasen con el café oscuro del suelo, utilizando arena de Fontainebleau y pequeños trozos de poliestireno (Fig. 6c). La simulación del movimiento del suelo mostró que estas soluciones no eran adecuadas.

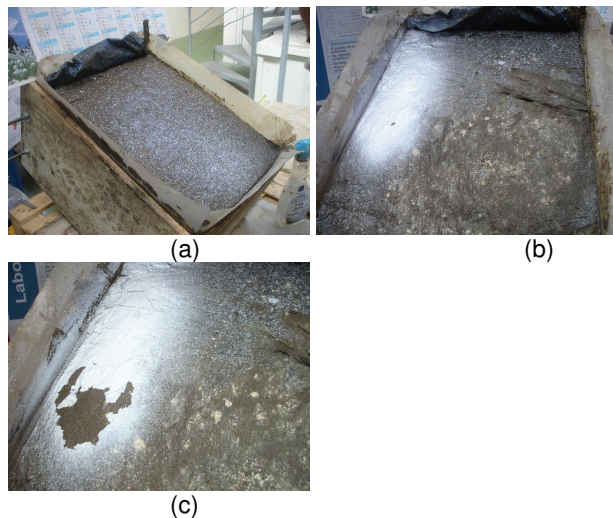


Figura 6. Cambio de textura de la superficie del suelo natural de aguas profundas, utilizando pintura blanca (a), con caolín en polvo (b), con arena fina y pequeños trozos de poliestireno (c).

Finalmente, la solución más aceptable fue de pintar toda la superficie de blanco, utilizando spray, y después realizar un salpicado de pintura negra. La experiencia de Nguyen (2009) fue valiosa en esta etapa. La textura final de la superficie se muestra en la Figura 7.

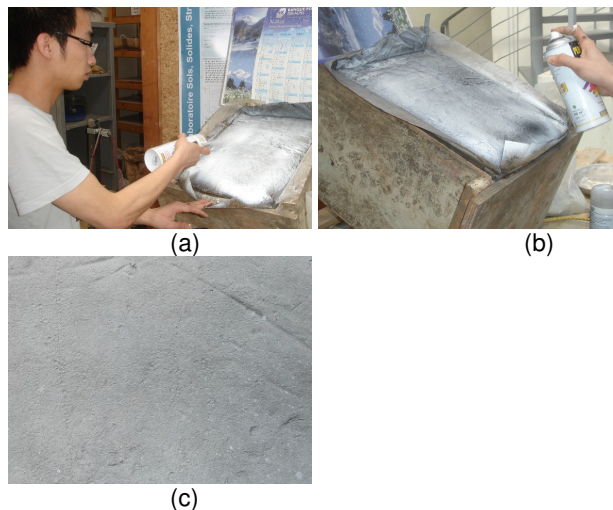


Figura 7. Cambio de textura de la superficie del suelo natural de aguas profundas, utilizando pintura blanca (a), salpicando con pintura negra (b) y textura final (c).

#### 4.6 Instalación del suelo en el tanque para la visualización del mecanismo de falla

El suelo instalado en el cajón de madera, con su superficie tratada para la correlación de imágenes, fue instalado dentro del tanque. Inicialmente fue colocado inclinado para evitar la deformación del suelo, y lo más cercano al vidrio de la ventana. Al momento de la verticalidad del cajón, el suelo se deformó. Una vez que el suelo hizo contacto con el vidrio se observaron varias fracturas en la pintura (Fig. 8).

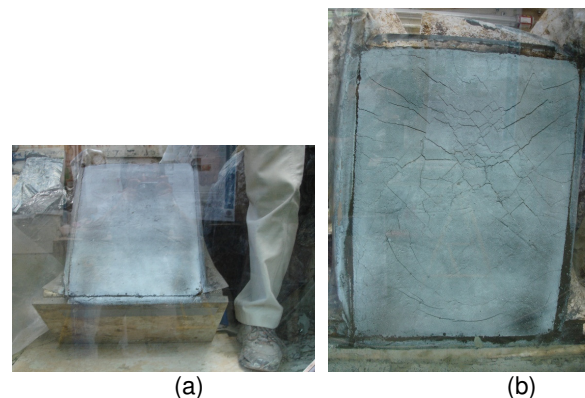


Figura 8. Instalación del bloque de suelo al interior del tanque (a), superficie del bloque de suelo al contacto con el vidrio (b).

Con las condiciones de la superficie de la Figura 8b se realizó un ensayo de penetración del mini T-bar, junto con un análisis de correlación de imágenes. De los resultados preliminares del método DIC se observó que la textura es la adecuada, sin embargo las partes de pintura de la superficie se mueve como cuerpos rígidos. La solución a este problema fue de fracturar la totalidad de la superficie de pintura.

#### 4.7 Equipo utilizado para la toma de imágenes digitales

La Figura 9 indica los diferentes elementos utilizados en el estudio. El modelo de suelo y el penetrómetro (1) fueron instalados en el tanque de la VisuCuve (2), la aplicación de las solicitaciones se realizó con un gato electromecánico (3) controlado a través de un sistema de adquisición y control (4), la fuerza sobre el penetrómetro y el desplazamiento vertical se registraron durante el ensaye. Para obtener una buena iluminación durante la adquisición de imágenes se utilizaron dos paneles (5), para la toma de imágenes se utilizó una cámara fotográfica de alta resolución Nikon D3 (6), el mecanismo de penetración fue observado a través de una ventana (7). El tratamiento de las imágenes de este

experimento se realizó con el software 7D (Vacher et al. 1999). Las imágenes se tomaron perpendiculares a la ventana de observación, obteniendo resultados de las deformaciones en 2D.

## 5 PROGRAMA DE PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA LA APLICACIÓN DEL METODO DIC

En el bloque de suelo preparado para la correlación de imágenes se realizaron tres ensayos de penetración de mini T-bar. La tabla 3 resume los tres ensayos, la profundidad de exploración y el tipo de ensayo; penetración-extracción o en ciclos. La velocidad de penetración-extracción de los ensayos fue en promedio de 20 mm/s. En la Figura 10 se indica la posición de cada ensayo.



(a)



(b)

Figura 9. Equipo utilizado para la adquisición de imágenes digitales durante el ensayo de la penetración de un T-bar en un suelo de aguas profundas.

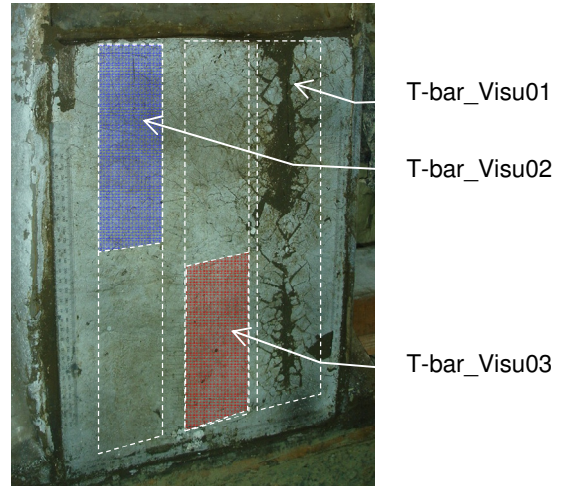


Figura 10. Posición de los ensayos de penetración mini T-bar para la visualización del mecanismo de falla.

En el primer ensayo (T-bar\_Visu01) se aplicaron seis series de ciclos de penetración-extracción en dos profundidades (Fig. 11). Para la mayoría de las series se tomaron imágenes numéricas, sin embargo la calidad del análisis no fue adecuado para interpretar las superficies de ruptura cercanos a la sonda del penetrómetro.

Para el segundo ensayo (T-bar\_Visu02) la pintura de la superficie del suelo fue agrietada, de esta manera se mejoró la interpretación de los resultados. En este ensayo solamente se aplicó un ciclo de penetración-extracción, hasta una profundidad máxima de 270 mm, es decir de  $z/D = 19.8$  (Fig. 11).

Para el tercer ensayo de mini T-bar (T-bar\_Visu03) nueve series de ciclos de penetración extracción (en dos profundidades) fueron aplicados. La profundidad máxima fue 400 mm.

Es importante aclarar que durante los ensayos señalados la barra horizontal del mini penetrómetro se mantuvo en contacto con el vidrio de la ventana de observación, existiendo fricción que aumenta el valor de la resistencia a la penetración  $Q_T$ . Ante esto, se realizaron ensayos similares en el bloque de suelo alejados de la ventana, los detalles se incluyen en el trabajo de Orozco-Calderón (2009).

Tabla 3. Ensayos de mini T-bar realizados para la visualización del mecanismo de falla.

Ensayo No.	Profundidad de ensayo, $z/D$	Tipo de ensayo
T-bar_Visu01	8 – 17	Ciclos penetración-extracción
	25 – 33	Ciclos penetración-extracción
T-bar_Visu02	0 – 20	Penetración-extracción
T-bar_Visu03	8 – 17	Ciclos penetración-extracción
	25 – 33	Ciclos penetración-extracción

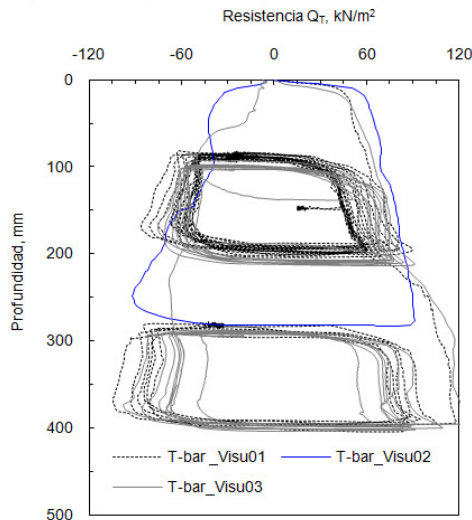


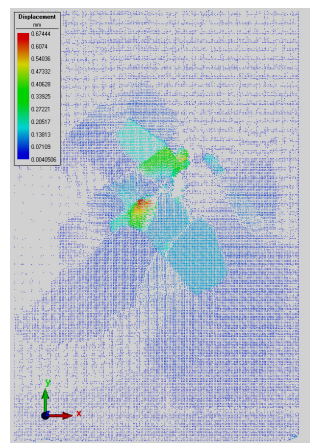
Figura 11. Serie de ciclos aplicados en los ensayos de penetración del min T-bar en un suelo arcilloso de aguas profundas. Ensayos Visu01, Visu02 y Visu03.

## 6 SUPERFICIES DE FALLA A PARTIR DE LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES

Las imágenes tomadas durante los diferentes ensayos se analizaron con el programa de correlación de imágenes 7D.

### 6.1 Análisis preliminar para la aplicación de la DIC

Puesto que existía una incertidumbre sobre el comportamiento de la textura de la superficie del suelo, se realizó un primer ensayo preliminar T-bar\_Visu01. Los resultados del método DIC fueron satisfactorios. La pintura sobre el suelo estuvo bien adaptada para el tratamiento de imágenes, sin embargo durante el ensayo T-bar la pintura se fracturó en pedazos que se comportaron como cuerpos rígidos (Fig. 12a). El círculo y flecha indican la posición de la barra horizontal y la dirección del movimiento, respectivamente. Los vectores de desplazamientos calculados entre dos imágenes a la profundidad de penetración de 270 mm ( $z/D = 23$ ) se muestran en la Figura 12b, donde se puede observar el movimiento de los trozos de pintura sobre la superficie del suelo que hace difícil la interpretación del mecanismo de falla del suelo.



(a)

(b)

Figura 12. Ensayo preliminar de mini T-bar para la aplicación de la correlación de imágenes numéricas. Posición y dirección del movimiento del penetrómetro (a) y vectores de desplazamientos entre dos imágenes a una profundidad de  $z/D = 23$ .

### 6.2 Visualización del mecanismo de falla a una profundidad de $z/D = 2.2$ , T-bar\_Visu02.

El procedimiento que se utiliza para obtener la resistencia no drenada a partir del T-bar es de penetrar de manera continua la sonda y, una vez que llega a la profundidad requerida, extraerla. La velocidad de penetración, de 20 mm/s, se mantiene constante en ambos sentidos.

En este trabajo se presentan los resultados del análisis de correlación de imágenes para una profundidad de exploración  $z/D = 2.2$ , durante la penetración del mini T-bar (Fig. 13a). La profundidad representa un poco más de dos veces el diámetro de la barra horizontal del T-bar e igual 27 mm.

El par de fotos analizadas se muestra la posición inicial y final del penetrómetro, ambas superpuestas para observar el desplazamiento relativo. Para estos ensayos la posición de la superficie del suelo se encuentra a -20 mm de la escala.

Las curvas de isovalores corresponden a la norma de los vectores ( $d$ ) incrementales, de los desplazamientos horizontales ( $d_x$ ) y verticales ( $d_y$ ), del campo próximo a la barra horizontal del penetrómetro (Fig. 13b). El cálculo de los vectores fue realizado para todo el tamaño de la fotografía. Se incluyen varias curvas, sin embargo se considera que las más importantes corresponden a 0.5 mm y 1.0 mm, puesto que representan el 7% y 15% de los desplazamientos normalizados de  $d$  con respecto al desplazamiento del penetrómetro  $d_z$ . Para el caso de los suelos arcillosos normalmente consolidados de aguas profundas, el pico del esfuerzo desviador  $q$  en ensayos triaxiales no drenados se encuentra alrededor del 7% de la deformación axial  $\epsilon_1$ . Se considera entonces que las curvas mencionadas son representativas de la zona plástica cercana al penetrómetro mini T-bar.

Del análisis de la correlación de imágenes se ha observado que el mecanismo de falla es de tipo *flow* a partir de la profundidad  $z/D > 1$  (Orozco-Calderón 2009). El mecanismo no es totalmente del tipo *full-flow* (Fig. 2), ya que una zanja permanece detrás de la barra horizontal. La Figura 13c muestra los vectores de desplazamientos rotando de tipo *flow* y orientados hacia la zanja.

### 6.3 Visualización del mecanismo de falla a una profundidad de $z/D = 26.2$ , T-bar\_Visu03.

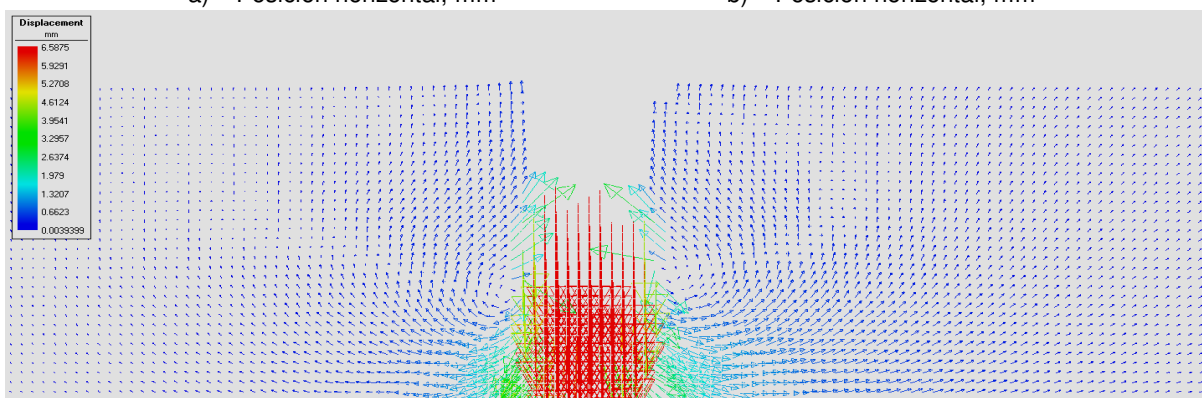
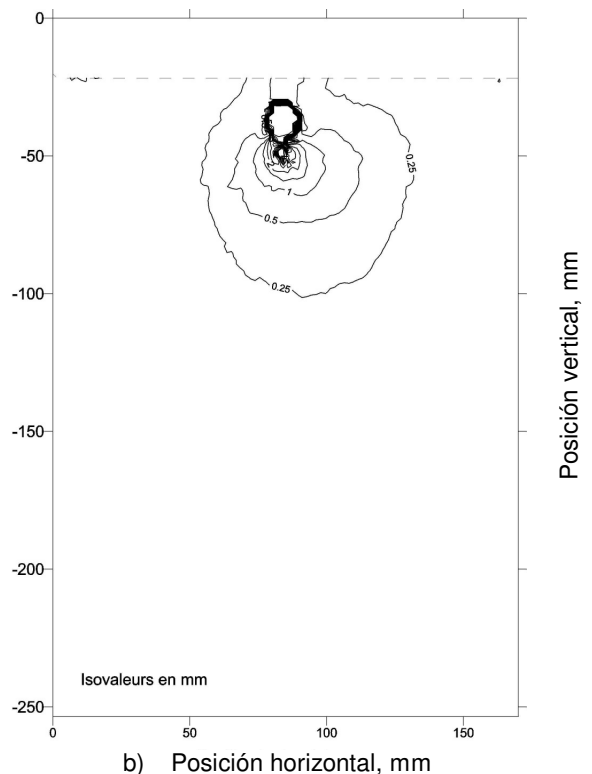
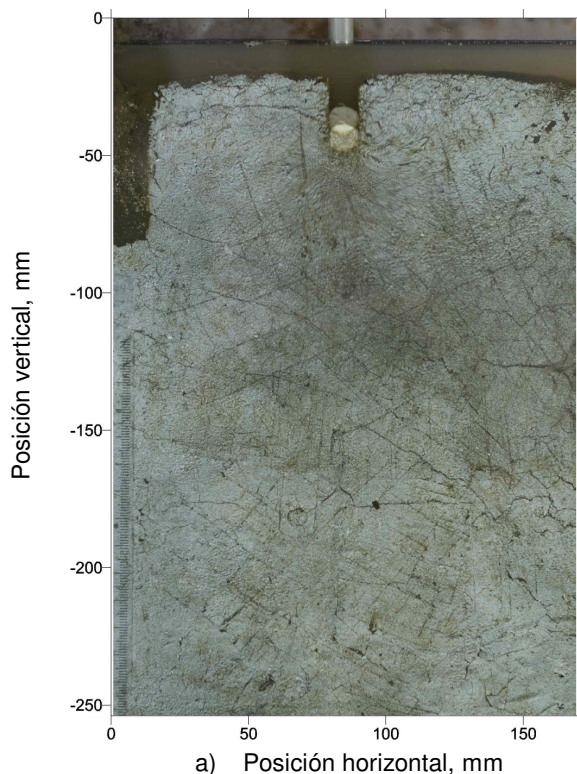
El ensayo T-bar\_Visu03 fue realizado a una distancia de  $6D$  del ensayo T-bar\_Visu02, por lo que se considera que no existe influencia del suelo remodelado sobre los resultados.

Para este ensayo se realizaron dos ciclos de penetración-extracción en dos profundidades (Tabla 3), las mayores profundidades corresponden a  $z/D = 25-33$ . Si bien estos valores representan profundidades importantes respecto al diámetro de la barra, la máxima profundidad corresponde en general al espesor promedio del suelo recuperado con la *box-corer*. En la práctica representa el espesor del fondo marino más importante para el diseño de ductos, por ejemplo.

A partir de la superposición de imágenes consecutivas se puede observar el flujo del suelo alrededor del cilindro (Fig. 14a), representando un mecanismo de tipo *full-flow*. A diferencia de penetraciones cerca de la superficie, detrás de la barra horizontal no se forma una zanja pero si se mantiene espacio en forma de cuña.

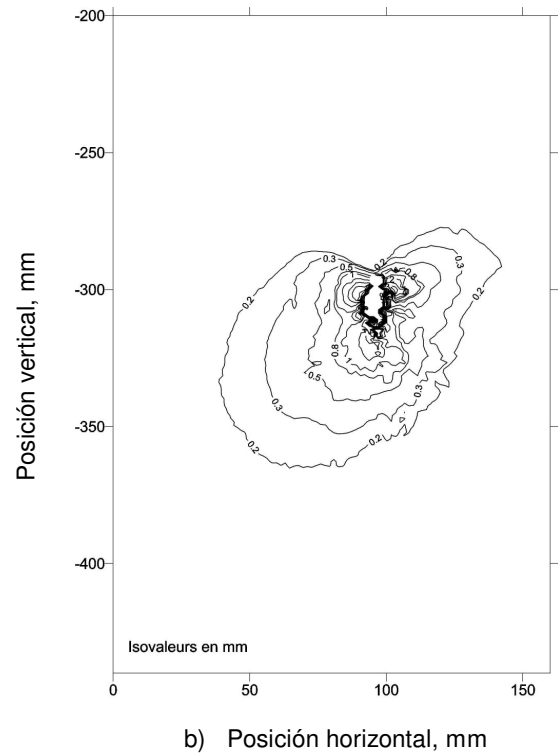
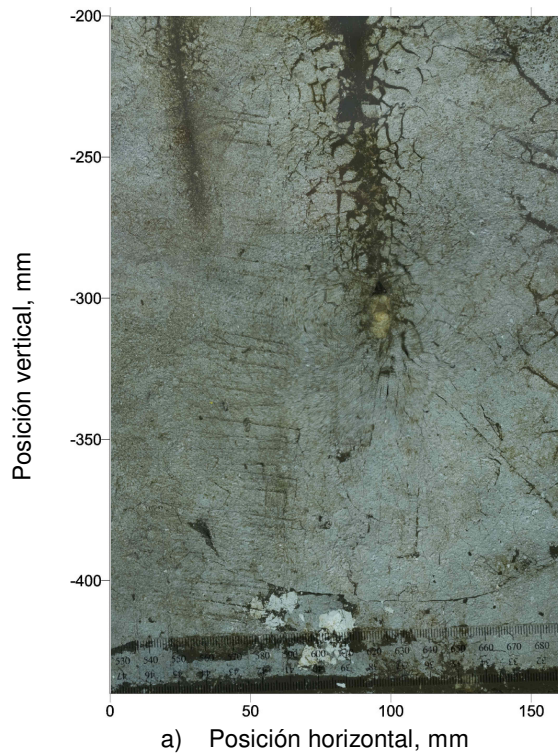
De las curvas de isovalores de desplazamientos (Fig. 14b) se observa que existe frente a la barra una zona de desplazamientos de tipo radiales, mismos que también fueron observados en el ensayo T-bar\_Visu02. El tamaño de las curvas de isovalores es similar al del ensayo T-bar\_Visu02, principalmente a la curva de 1.0 mm de desplazamiento. La forma y tamaño de estas curvas se mantienen para las profundidades observadas durante este ensayo ( $z/D = 25 - 33$ ).

El mecanismo de ruptura observado a través de los vectores de desplazamientos (Fig. 14c) es de tipo *full-flow*, con movimientos de tipo radiales. Con la aplicación del método de correlación de imágenes se pudo observar que el mecanismo es de tipo mixto, así mismo se pudieron calcular los vectores de desplazamiento y la amplitud de la zona plastificada.



100mm x 60 mm (c)

Figura 13. Resultados de la aplicación de la correlación de imágenes digitales DIC para las fotografías tomadas durante la penetración del mini T-bar\_Visu02 a la profundidad de  $z/D = 2.2$ . Superposición de las dos imágenes analizadas, de referencia y a correlacionar (a), curvas de isovalores de los vectores de desplazamientos en mm (b), y vectores de desplazamientos (c).





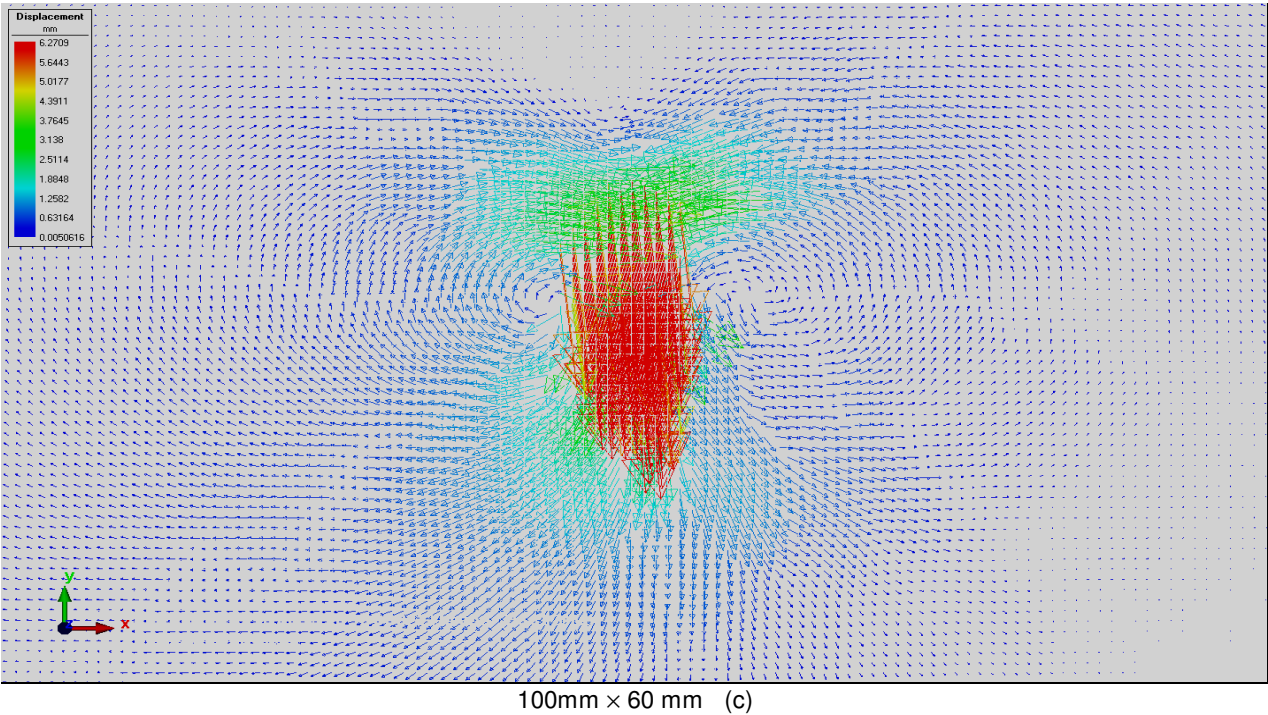


Figura 14. Resultados de la aplicación de la correlación de imágenes digitales DIC para las fotografías tomadas durante la penetración del mini T-bar\_Visu03 a la profundidad de  $z/D = 26.1$ . Superposición de las dos imágenes analizadas, de referencia y a correlacionar (a), curvas de isovalores de los vectores de desplazamientos en mm (b), y vectores de desplazamientos (c).

Orozco-Calderón (2009) presenta el análisis de más de 20 pares de imágenes, entre las profundidades de  $z/D = 0.2$  a  $32.4$ , tanto en penetración como en extracción.

Para el caso del mecanismo de extracción, el mecanismo es también de tipo mixto pero la forma de falla es diferente al caso de penetración. Puech et al. (2010) presentan un análisis de correlación de imágenes en penetración de un mini T-bar.

#### 6.4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los trabajos de laboratorio necesarios para poder utilizar el método de correlación de imágenes (DIC), principalmente para el estudio de la superficie de falla alrededor del mini penetrometro T-bar.

Dentro de los trabajos experimentales se estableció una técnica para el cambio de textura de la superficie de un suelo arcilloso saturado, a fin de tomar imágenes que pudieran analizarse con el método de correlación de imágenes. La técnica proporcionó resultados satisfactorios.

La parte importante fue determinar el mecanismo de ruptura a poca profundidad de penetración del penetrometro T-bar.

Rigurosamente se observaron los campos de desplazamiento, de ellos se puede obtener su tamaño y

calcular las curvas de igual valor. Gracias a los campos de desplazamientos se observó que el mecanismo de falla del mini penetrometro T-bar es de tipo mixto, es decir: parcialmente de tipo *full-flow* y de desplazamientos radiales (similar al de expansión de cavidades).

En este trabajo no se presentan la totalidad de imágenes tomadas durante los ensayos de visualización en el suelo natural inalterado de aguas profundas. Una línea de investigación que queda por abordar es la determinación de la superficie de falla en condiciones remodeladas, esto dará una idea de la evolución de la sensibilidad del suelo con el número de ciclos penetración-extracción.

La aplicación de mini penetrometros T-bar será en el futuro cercano una actividad cotidiana en los laboratorios de mecánica de suelos, principalmente para suelos de aguas profundas (offshore). En otro trabajo se propone un procedimiento para realizar el ensaye de T-bar (Puech et al. 2010)

#### AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio 3S-R de Grenoble y al profesor Vacher, por las facilidades para la utilización del programa 7D. A Steve y Lam por su apoyo para la utilización de DIC.

A Cristina Tshua y Hana Santruckova por su ayuda durante los ensayos. Los comentarios de todos los colegas y amigos durante los experimentos son ampliamente reconocidos.

A la Gerencia de Proyectos de Explotación MSO, STE- PEMEX Exploración y Producción por su apoyo para la realización de este trabajo.

## 7 REFERENCIAS

- Equihua-Anguiano, L.N. (2010). "Factores indispensables para el diseño geotécnico y geofísico de proyectos costa afuera", *Memorias XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Acapulco, Guerrero, México.
- Nguyen, T.L. (2009). Comunicación personal, Laboratorio 3S-R, Grenoble, Francia.
- Orozco-Calderón, M., Foray, P. y Rousseau, C. (2008a). "Equipo para medir la resistencia no drenada de suelos blandos en la VisuCuve", *Memorias XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Aguascalientes, Aguascalientes, México, Vol. 1: 211-218.
- Orozco-Calderón, M., Foray, P. y Rousseau, C. (2008b). "Nuevo equipo para el estudio de la interacción suelo-ducto: VisuCuve", *Memorias XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Aguascalientes, Aguascalientes, México, Vol. 1: 201-210.
- Orozco-Calderón, M. (2009). *Etude de l'interaction cyclique sol-pipe dans les grands fonds marins*, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 470 p.
- Orozco-Calderón, M., Hall, S.A., Nguyen, T.L. y Equihua-Anguiano, L.N. (2010). "Correlación de imágenes digitales y su aplicación a la geomecánica", *Memorias XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Acapulco, Guerrero, México.
- Puech, A., Orozco-Calderón, M. y Foray, P. (2010). "Mini T-bar testing at shallow penetration", *Proceedings International Symposium Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG 2010, Perth, Western Australia*.
- Randolph y Houlsby (1984). "The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil", *Géotechnique*, Vol. 34, No. 4: 613-623.
- Vacher, P., Dumoulin, S., Morestin, F. y Mguil-Touchai, S. (1999). "Bidimensional strain measurement using digital images", *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 213, Part C: 811-817.