

# TECNICAS ESPECIALES CON EL EMPLEO DE LODOS SEPIOLITICOS EN LA EJECUCION DE PILOTES DE GRAN DIAMETRO

Por MANUEL FERNANDEZ MELENO

Ingeniero Industrial  
Compañía Sevillana de Electricidad

JESUS L. PRESA SANTOS

Dr. Ingeniero de Caminos  
Director Técnico de KRONSA - AGROMAN

ADOLFO ERASO ROMERO

Licenciado en Ciencias Químicas  
Asesor de Dirección de KRONSA - AGROMAN

En el presente artículo los autores dan a conocer el procedimiento seguido durante la ejecución del pilotaje realizado en la central térmica de la bahía de Algeciras, en la cimentación de los tajos denominados Chimenea y Calderas.

## 1. Preámbulo.

Nuestro objeto es exponer el procedimiento seguido durante la ejecución del pilotaje de diámetro nominal  $\phi$  1 250 mm., realizado en la Central Térmica de la Bahía de Algeciras para la Compañía Sevillana de Electricidad, en la cimentación de los tajos denominados Chimenea y Calderas.

El número de pilotes ejecutados asciende a 61, con una longitud media por unidad de 18 m. y una carga prevista por pilote de 400 toneladas. La armadura de cada uno de ellos estaba compuesta por 25 redondos de acero normal de  $\phi$  25 mm. con espiral de  $\phi$  10 milímetros cada 10 cm.

En definitiva, se trataba de pilotes de gran diámetro (el diámetro real de perforación es de 1 325 mm.); saliéndose, por consiguiente, de las normas y dimensiones más comunes del pilotaje *in situ*.

### A) Características del terreno.

Inicialmente hay un estrato de 15 a 16 m. de espesor en la zona en cuestión, compuesto fundamentalmente por arcillas, fangos y limos orgánicos en los que se intercalan por indentación lentejones de arenas sueltas.

Inmediatamente debajo aparece el terreno firme, constituido por un flysh de edad oligocena, compuesto por finas alternancias de margas y arcillas de tono gris verdoso oscuro, entre

las que vienen algunas veces intercalados filetes de areniscas y calizas. Sobre este firme están empotrados los pilotes de gran diámetro, así como toda la cimentación de la térmica.

La circunstancia de que el nivel del terreno se hallara directamente influenciado por el mar constituyó la primera dificultad, ya que para salvar la marisma inicialmente existente hubo que llevar a cabo un relleno de tierras de 2,50 metros de espesor antes de comenzar ningún trabajo.

Los análisis de las muestras de agua, tomadas del nivel freático del estrato de fangos, presentan las siguientes características químicas:

Contenido en Cl' .....	5 674 mgr./l.
» » SO <sup>4</sup> .....	1 207 »
» » Ca'' .....	440 »
» » Mg'' .....	376 »
Dureza total en grados franceses .....	267
pH .....	8

y sus características organolépticas son: olor desagradable, turbidez por transparencia y color oscuro.

Durante la ejecución de los pilotes normales *in situ*, también programados en el plan general de la cimentación, ha podido observarse que la transmisibilidad del agua en el estrato de fangos es pequeña, lo que no evita, sin embargo, que las paredes del vaciado de los pilotes se caigan al poco tiempo si no se las reviste del correspondiente entubado metálico.

## B) Técnicas usuales de ejecución.

Los procedimientos que fueron utilizados para otros pilotes de menor diámetro, ejecutados también en esta obra, fueron los usuales por vaciado, protegidos por tubería de revestimiento mientras se extraía el detritus con la correspondiente cuchara o hélice.

Dicha hinca se efectuó de la siguiente manera:

- Por gravedad, mediante una cuchara de golpeo.
- Mediante una entubadora hidráulica rotativa.
- Por vibración, utilizando un martillo "vibrohincador" de potencia adecuada.

Cada una de ellas adaptada al diámetro de los pilotes.

Con los procedimientos descritos anteriormente se pudo llegar a conseguir diámetros máximos del orden de 1 000 m./m.; sin embargo, al pretender realizar los pilotes de  $\phi$  1 350 m./m., debido a que serían necesarios procedimientos de entubación muy costosos se consideró más económico y más racional para esta obra el procedimiento de perforación con el empleo de lodos.

## 2. Proceso de ejecución.

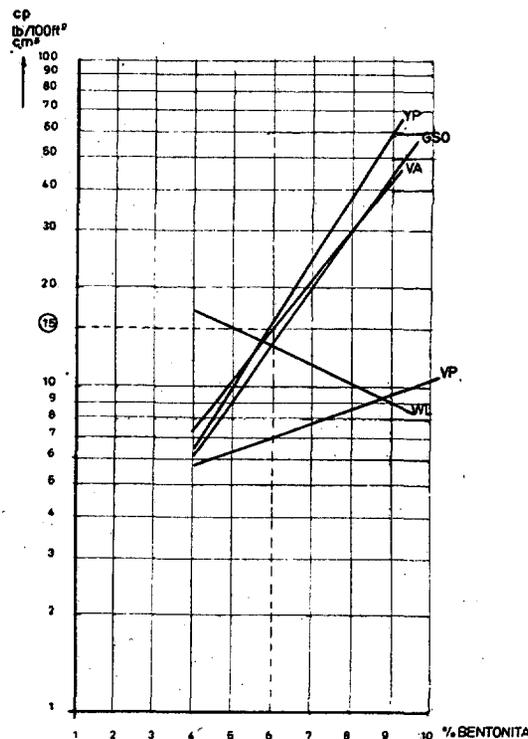
La técnica de los lodos alcanza en las perforaciones petrolíferas tal elevado grado de especialización, a través de sus cuarenta años de vida, que ha permitido la perforación de pozos hasta 8 000 m. de profundidad; dicha técnica, por las economías que reporta, está introduciéndose a pasos agigantados en obras de ingeniería civil.

El problema concreto, que describimos en el presente artículo, se refiere a la búsqueda del lodo adecuado para ejecución de la obra.

### A) Búsqueda del lodo adecuado.

Los lodos se fabrican dispersando arcillas naturales en agua, de las que la más utilizada es la bentonita, que posee una elevada concentración del componente mineralógico montmorillonita, de la familia de las micas.

Los parámetros reológicos de resultados de la dispersión del producto comercial de bentonita, Clarsol FB2, pueden verse en la figura 1, que ha sido ejecutada siguiendo la norma del American Petroleum Institute.



### LEYENDA

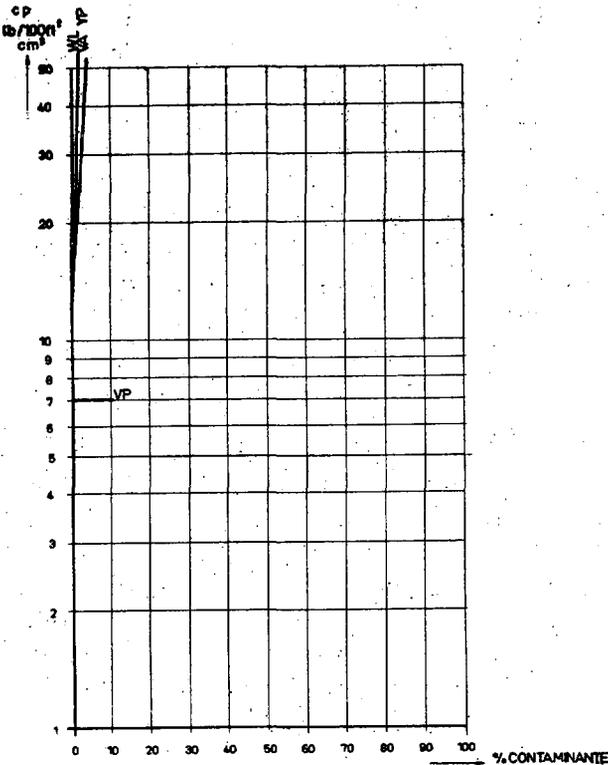
VA = viscosidad aparente  
 YP = "yield point"  
 GSO = gel inicial  
 WL = pérdida de agua

Fig. 1. — Características reológicas de la bentonita, Clarsol FB2, en agua dulce.

En ella puede observarse que, para una mezcla en peso del 6 por 100 de bentonita comercial, se alcanzan los 15 centipoises de viscosidad aparente, viniendo los demás parámetros con el siguiente valor:

Viscosidad aparente .....	15 cp.
Viscosidad plástica .....	7 cp.
"Yield point" .....	16 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Gel inicial .....	13 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Pérdida de agua .....	13 cm. <sup>3</sup>

Haciendo intervenir el agua del terreno de la Central Térmica para ver el efecto contaminante que produce, cuyos resultados vienen



**LEYENDA**

- VA = viscosidad aparente
- VP = " " plastica
- YP = 'yield point'
- WL = pérdida de agua

Fig. 2.—Influencia del agua de la térmica como contaminante sobre un lodo de bentonita (Clarsol FB2) al 6 % en agua dulce.

expresados en la figura 2, puede observarse que hay un efecto muy importante de contaminación en el lodo del que resulta un fuerte espesamiento, apreciable en los grandes aumentos de la viscosidad aparente y el *yield point* y una floculación total con separación de fases de la que resultan altos valores en la pérdida de agua del lodo.

Protegiendo el lodo de bentonita a base de un dispersante químico de la familia de los lignosulfatos de hierro y cromo, encontramos la correspondiente variación en los parámetros reológicos, que viene dada en la figura 3, en la que se ha partido de un lodo al 7 por 100 de bentonita, ya que el lignosulfonato de hierro y cromo posee también propiedades fluidificantes.

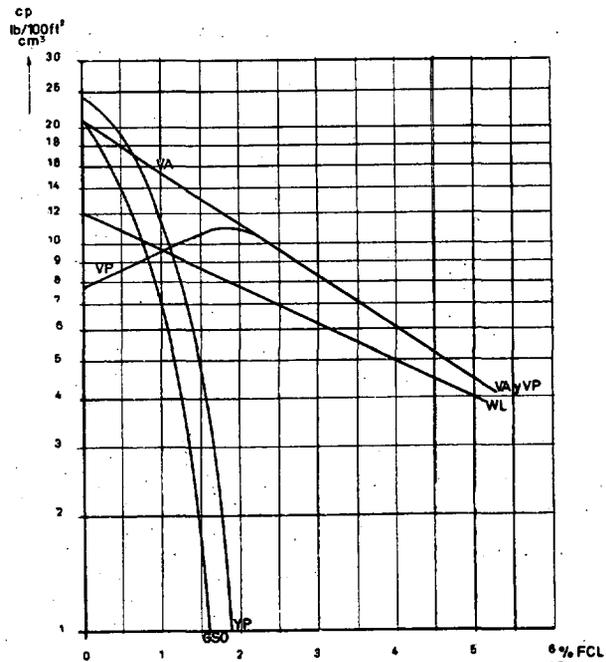
En dicha figura puede verse que se forma un buen lodo cuando la concentración de lignosulfonato llega al 1 por 100.

Sus características reológicas para dicha concentración son:

- Viscosidad aparente ..... 15 cp.
- Viscosidad plástica ..... 9,5 cp.
- "Yield point" ..... 11,5 lb./100 ft.<sup>2</sup>
- Gel inicial ..... 7 lb./100 ft.<sup>2</sup>
- Pérdida de agua ..... 9,5 cm.<sup>3</sup>

Una vez preparado dicho lodo así protegido, lo enfrentamos con el agua del terreno para ver el efecto de contaminación producido.

Los resultados de dicha acción vienen expresados en la figura 4, en la que puede verse que hasta un 20 por 100 el lodo así tratado se conserva todavía al estado disperso, ya que no hay aumento apreciable en la pérdida de agua, aunque los restantes parámetros hayan descendido considerablemente de valor. A partir del



**LEYENDA**

- VA = viscosidad aparente
- VP = " " plastica
- YP = 'yield point'
- GSO = gel inicial
- WL = pérdida de agua

Fig. 3.—Variación de los parámetros reológicos de la bentonita (Clarsol FB2) al 7 % en agua dulce por adición de dispersante (lignosulfonato de hierro y cromo).

20 por 100 se produce la floculación, debaratándose el lodo, en el que se evidencia la separación de fases. Es interesante observar que la variación sufrida en la viscosidad aparente es semejante a la que se observa sobre el *yield point* y muy diferente a la operada sobre la

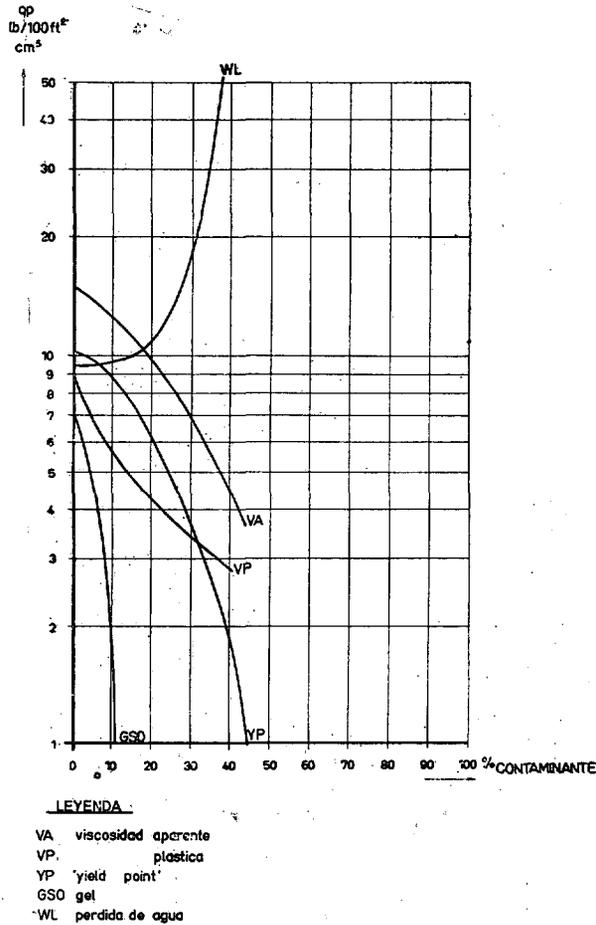


Fig. 4. — Variación de los parámetros reológicos de un lodo a base de bentonita (Clarsol FB7) al 7 % y dispersante (FCL) al 1 % en agua dulce por adición de agua del subsuelo de la Térmica.

viscosidad plástica, lo que discrimina que el tipo de contaminación es de índole química y, por consiguiente afecta a la naturaleza íntima de la estructura coloidal del lodo.

Vista la inoperancia de los lodos bentoníticos frente al agua existente en el terreno de la Central Térmica, se recurrió al ensayo de arcillas naturales resistentes a las sales, es decir, a las sepiolitas, pertenecientes a la familia de los asbestos.

Los ensayos efectuados según las normas, a base del producto comercial de sepiolita, denominado Clarsol FB7, vienen expresados en la figura 5, en la que pueden verse los parámetros obtenidos por dispersiones de sepiolita en agua dulce a diferentes concentraciones.

En ella se observa que los 15 centipoises de viscosidad aparente se consiguen para una concentración del 6,8 por 100 de sepiolita; los restantes parámetros reológicos arrojan, para dicha concentración, los siguientes valores:

Viscosidad aparente .....	15	cp.
Viscosidad plástica .....	5	cp.
"Yield point" .....	20	lb./100 ft. <sup>2</sup>
Gel inicial .....	8,8	lb./100 ft. <sup>2</sup>
Tixotropía .....	5,3	lb./100 ft. <sup>2</sup>
Pérdida de agua .....	61	cm. <sup>3</sup>

Atendiendo a los comentarios anteriormente realizados al hablar sobre las contaminaciones

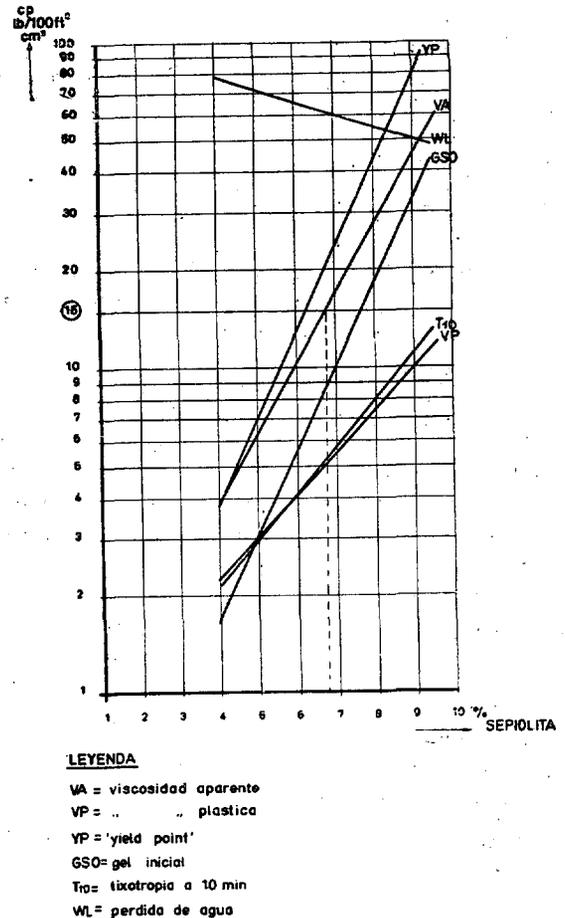


Fig. 5. — Características reológicas de la sepiolita Clarsol FB7 en agua dulce.

sufridas por los lodos de bentonita, puede parecer paradójico que una pérdida de agua tan alta pertenezca a un verdadero lodo que posea un buen carácter peptizante. Ello es debido a que la microestructura de la sepiolita responde a un hábito filiforme, mientras que la bentonita presenta el aspecto de plaquitas; por ello, para viscosidades semejantes, la pérdida de agua frente al filtro prensa es menor, ya que las plaquitas estructurales de la bentonita se solapan unas sobre otras presentando un mayor valor sellante que las acículas de la sepiolita en el referido ensayo A.P.I.

Como en altas aguas libres va asociada también una costra espesa (cake) en la pared del

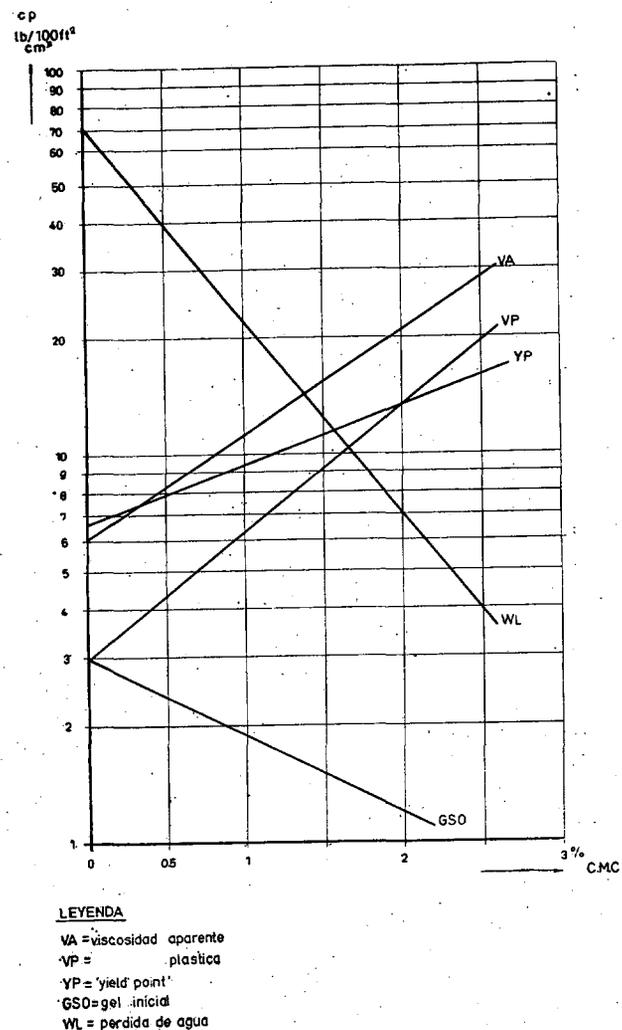


Fig. 6. — Influencia sobre los parámetros reológicos de un lodo a base de sepiolita (Clarsol FB7) al 5% en agua dulce mediante la adición de colóide orgánico C.M.C. (Solugel TDH).

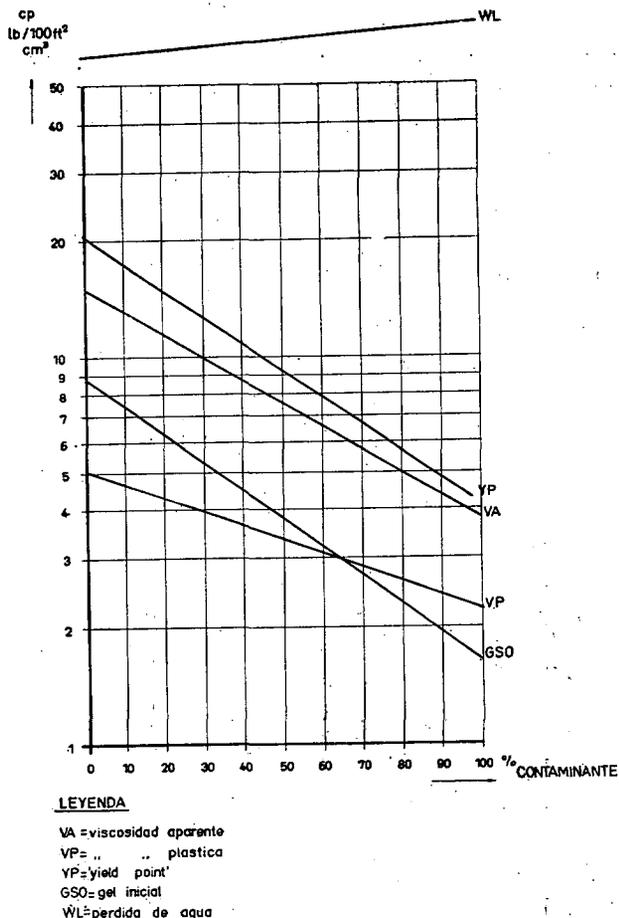


Fig. 7. — Variación de los parámetros reológicos de la sepiolita (Clarsol FB7) al 6,8% en agua dulce por adición de agua del subsuelo de la Térmica.

pozo, en las zonas donde existan altas permeabilidades se emplean frecuentemente aditivos de la familia de las carboximetilcelulosas (CMC), que son fundamentalmente reductores de la pérdida de agua, produciendo al mismo tiempo elevación en los valores de los restantes parámetros reológicos, salvo los geles.

En la figura 6 puede, cuantitativamente, verse dicho efecto sobre un lodo inicial de sepiolita al 5 por 100 en agua dulce, constatándose que cuando se alcanza la concentración del 1 por 100 del producto comercial de carboximetilcelulosa, Solucel TDH, el lodo presenta excelentes características reológicas:

Viscosidad aparente .....	12 cp.
Viscosidad plástica .....	6,4 cp.
"Yield point" .....	9,5 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Gel inicial .....	1,9 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Pérdida de agua .....	22 cm. <sup>3</sup>

Haciendo actuar el agua del terreno de la central sobre el lodo tipo a base de sepiolita al 6,8 por 100, encontramos los resultados expresados en la figura 7, de la que puede inter-

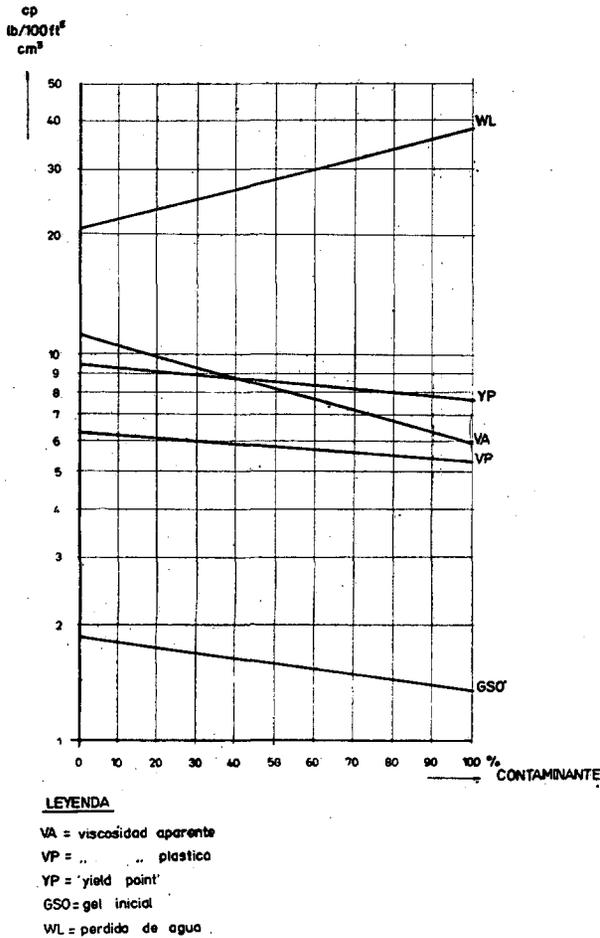


Fig. 8. — Variación de los parámetros reológicos de un lodo a base de sepiolita (Clarsol FB7) al 5 %, y CMC (Sogel TDH) al 1 % en agua dulce, por adición de agua del subsuelo de la Térmica.

pretarse clarísimamente que no se observa contaminación alguna, pues no existen aumentos importantes en la pérdida de agua y los restantes parámetros reológicos descienden normalmente por un efecto exclusivo de dilución. En otras palabras, el lodo se comporta tal y como si le añadiéramos agua dulce.

Un efecto exactamente paralelo puede observarse en la figura 8, en la que hemos adicionado agua de la térmica sobre un lodo base al 5 por 100 de sepiolita y 1 por 100 de CMC.

El resultado es también pura y simplemente el motivado por una dilución.

Convencidos de que el lodo a base de sepiolita, con o sin CMC, es el que se debe utilizar, como el hormigonado de los pilotes se efectúa por desplazamiento, es decir, bajo el lodo, de abajo arriba, mediante la trompa tubular especial, operación en la que el lodo es desplazado del pilote por el hormigón en su camino ascensional en el mismo, es evidente que existirá una cierta zona de contacto lodo-

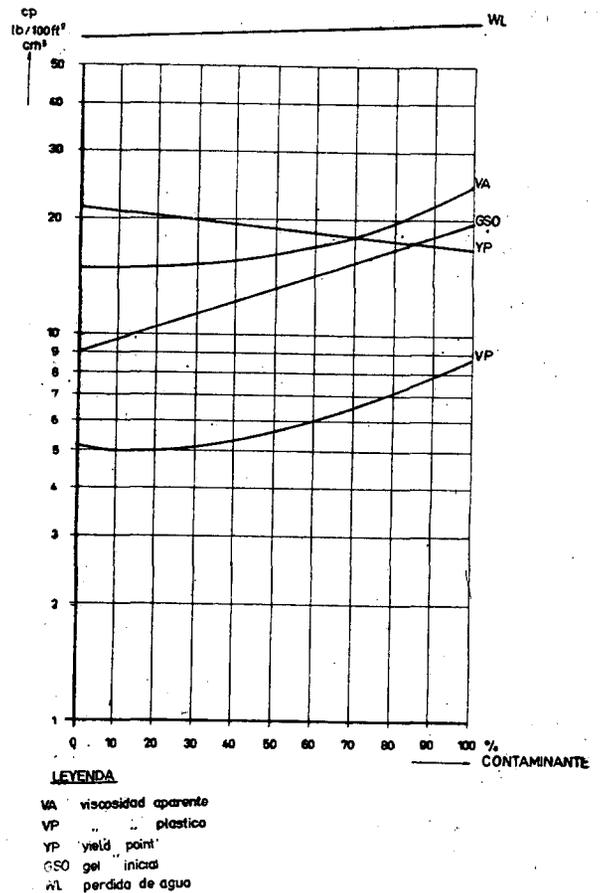


Fig. 9. — Variación de los parámetros reológicos de la sepiolita (Clarsol FB7) al 6,8 % en agua dulce, por adición de lechada de cemento de 400 Kg./m.<sup>3</sup> de dosificación.

hormigón en la que conviene comprobar si existe contaminación.

Utilizando el lodo menos protegido, es decir, el de sepiolita al 6,8 por 100 en agua dulce,

presentamos en la figura 9 la acción de lechada de cemento como contaminante. En ella pueden observarse las siguientes variaciones en los parámetros reológicos: la viscosidad aparente aumenta ligeramente, haciéndolo también la viscosidad plástica con el mismo hábito; el *yield point* disminuye. Esto ya de por sí indica claramente que existe en el lodo una contaminación de tipo físico, tal y como la que

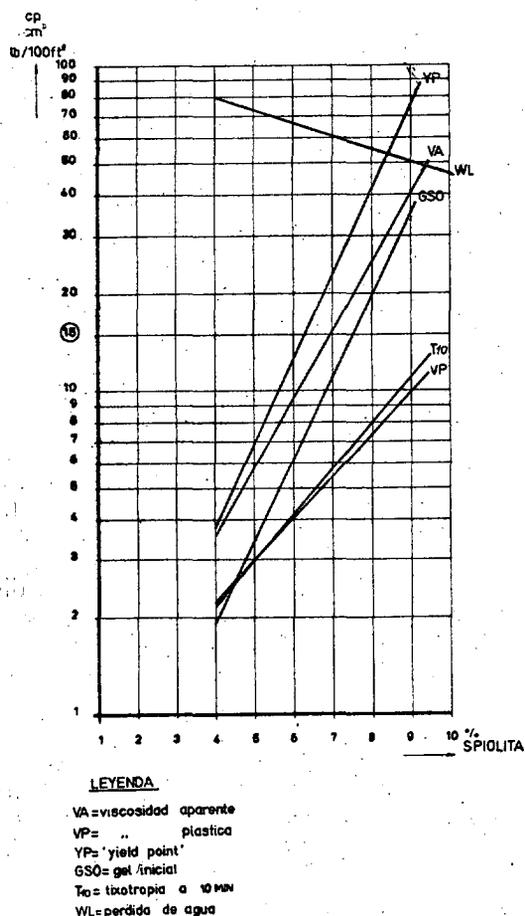


Fig. 10. — Características reológicas de la sepiolita Clar-sol FB7 en el agua del subsuelo de la Térmica.

resultaría al añadir sólidos inertes al lodo. La pérdida de agua sufre tan sólo un ligerísimo aumento, motivado, como es lógico, por la dilución resultante del agua constitutiva de la lechada de cemento. El aumento del gel es también una consecuencia natural del espesamiento del lodo. Resumiendo, no existe contaminación

química, sino física y, por consiguiente, combatible mediante medios también físicos, conservando el lodo sus características de tal, sin existir, por consiguiente, separación de fases o floculación alguna.

Únicamente se evidencia en el procedimiento operatorio de ejecución de los pilotes la necesidad de instalar, en el depósito de lodos de superficie, paneles de separación para lograr la decantación en el mismo de los sólidos inertes incorporados al lodo y poder reciclar éste para ser utilizado en la excavación de sucesivos pilotes. También es altamente recomendable hormigonar el pilote hasta una cota más alta de la prevista, que deberá ser picada luego a la hora de encepar para encontrar el hormigón sano, ya que la interfase donde se produce la mezcla ni es hormigón ni es lodo.

Para comprobar definitivamente que el agua de formación no produce contaminación alguna de los lodos de sepiolita hemos efectuado la dispersión de ésta en dicha agua. Los resultados expresados en la figura 10 nos muestran que los 15 centipoises de viscosidad aparente se alcanzan cuando la cantidad de sepiolita dispersa llega al valor de 6,9 por 100. Los restantes parámetros reológicos son, para dicha concentración:

Viscosidad aparente .....	15 cp.
Viscosidad plástica .....	5,4 cp.
"Yield point" .....	22,5 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Gel inicial .....	11 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Tixotropía .....	5,7 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Pérdida de agua .....	60 cm. <sup>3</sup>

como se ve, semejantes a los de la figura 5.

De la misma manera, en la figura 11 hemos actuado de manera paralela a la figura 6, salvo que, como en la figura 10, hemos dispersado también la sepiolita en agua de la térmica en vez de agua dulce.

El paralelismo de comportamiento reológico entre las figuras 6 y 11 es también evidente, como se ve al extraer de esta última los valores correspondientes a un lodo a base de 5

por 100 de sepiolita y 1 por 100 de CMC en agua de la susodicha formación:

Viscosidad aparente .....	10,5 cp.
Viscosidad plástica .....	6 cp.
"Yield point" .....	7,6 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Gel inicial .....	1,9 lb./100 ft. <sup>2</sup>
Pérdida de agua .....	23 cm. <sup>3</sup>

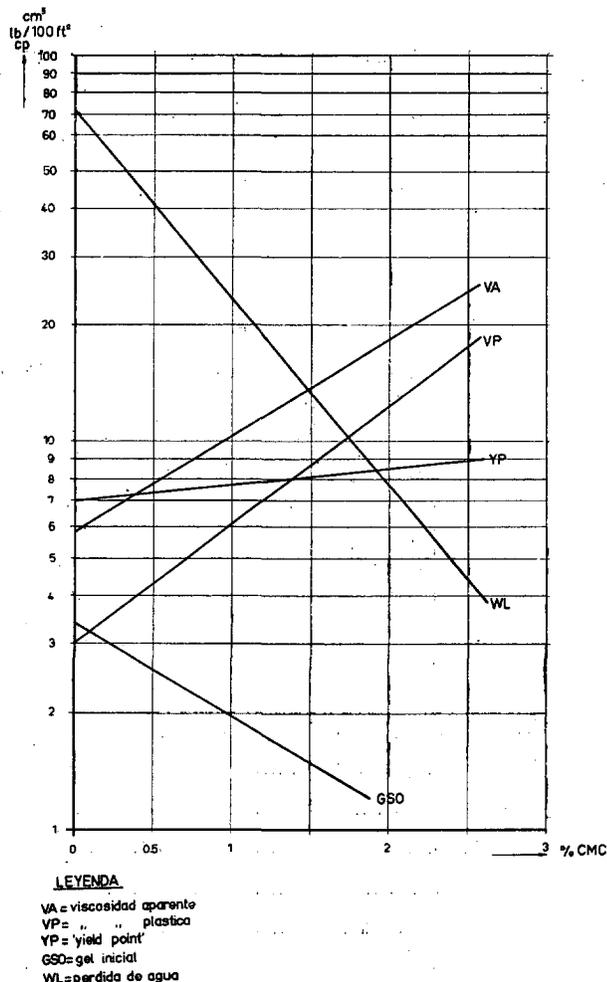


Fig. 11. — Influencia sobre los parámetros reológicos de un lodo a base de sepiolita (Clarsol FB7) al 5 % en agua del subsuelo de la Térmica mediante la adición de coloide orgánico C.M.C. (Solucel TDH).

Es evidente, definitivamente, que en los lodos de sepiolita se encuentra la solución de nuestro problema.

Como la transmisibilidad del terreno es muy baja, estimamos que un lodo de alta pérdida

de agua no producirá perturbaciones debidas a costras espesas en las paredes del pozo, por lo que se decidió utilizar el lodo tipo de sepiolita al 6,8 por 100, capaz de estabilizar zanjas en pared vertical de arena suelta sumergida (caso más desfavorable que el nuestro), teniendo en reserva CMC, a pie de tajo, por si fuera necesario reducir la pérdida de agua de dicho lodo.

### B) Proceso definitivo.

En primer lugar, se ejecutó una balsa de 10 × 12 × 1,5 m. con un volumen, por consiguiente, de 180 m.<sup>3</sup>, necesario para contener el lodo a utilizar en la perforación de hasta tres pilotes simultáneamente, provista de un panel separador en el centro de la misma de un metro de altura con el fin de favorecer la decantación de sólidos nocivos que pudiera arrastrar el lodo. Naturalmente, el retorno del lodo procedente de los pilotes a la balsa se hacía siempre del mismo lado, de manera que la succión para verterlo al siguiente pilote en ejecución fue siempre del lado opuesto al vertido, con relación al panel de decantación.

Las fases de ejecución propiamente dicha consistieron en emboquillar los primeros 4,5 metros del pilote, para lo que se utilizó la cuchara especial de  $\phi$  1 300 mm. de un equipo de perforación a rotación provisto de varillaje telescópico, introduciendo el tubo de manera que la porción del mismo que quedase fuera de la superficie sirviera para guiar el retorno del lodo a la balsa.

A continuación, se llenó el pozo emboquillado de lodo de sepiolita hasta el nivel del terreno, procediendo a perforarlo con la cuchara de diámetro nominal  $\phi$  1 250 mm, de manera que el volumen extraído del mismo era siempre repuesto con lodos, cuyo nivel se conservó siempre a la cota de la superficie del terreno (ver fig. 12).

Una vez finalizada la perforación se procedía a la introducción de la armadura y, a continuación, al hormigonado por desplazamiento de abajo hacia arriba, gracias al embudo es-

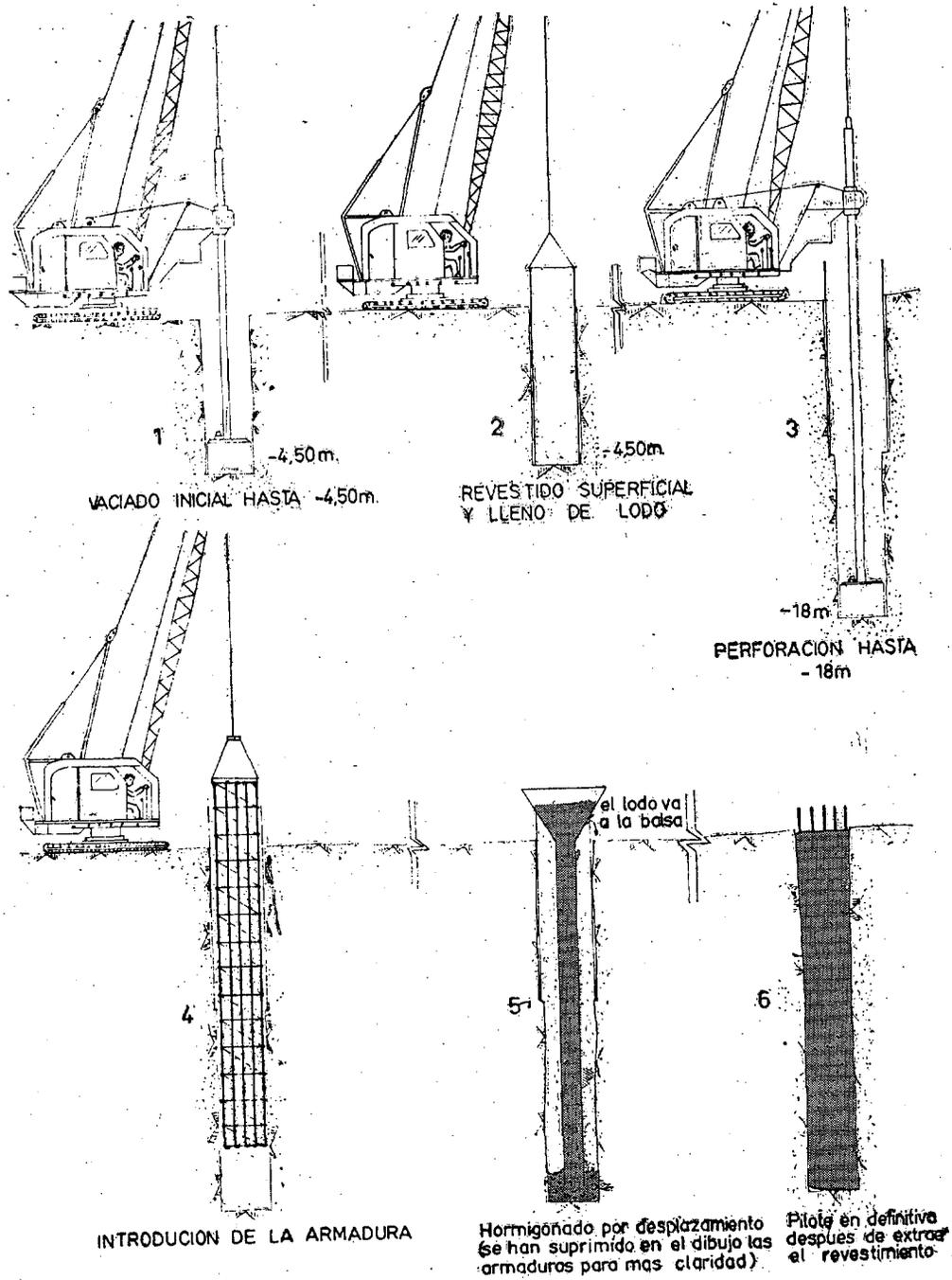


Fig. 12. — Fase de la ejecución de los pilotes de gran diámetro.

pecial con tubería de prolongación por el que se le vierte, de manera que, salvo la primera tongada, ya no se produce contacto alguno entre el hormigón y el lodo.

El hormigón así vertido va desplazando al lodo de sepiolita, que fluye por gravedad hacia la balsa almacén, donde queda listo para ser utilizado en un nuevo pilote.

Las pruebas de estabilidad realizadas sobre el primer pilote excavado mostraron que las paredes del pozo, después de cuarenta y ocho horas, quedaban perfectamente verticales, sin

existir tampoco decantación alguna en su fondo.

Durante la ejecución sistemática de los referidos pilotes de gran diámetro se constató claramente que la contaminación física esperada en el lodo por la acción del hormigón fue de acuerdo con lo previsto, ya que no hizo falta protección alguna sobre el lodo, que se bastó por sí mismo, sin precisar, por consiguiente, en ningún momento la adición de carboximetilcelulosa, lo cual sería beneficioso para mantener una elevada adherencia del hormigón con el acero.

### Bibliografía.

Chaney, P. E.; Oxford, W. F.; Chisholm, F.: *The chemical Treatment of Drilling Fluids Magnet Cove Barium Corporation*. Houston.

A.P.I. RP 13B: *Standard Procedure for Testing Drilling Fluids* by A.P.I. Dallas, 1962.

Chisholm, F.; Kohem, S.: *Measurement of Plastic Flow Properties of Drilling Mud Magnet Cove Barium Corporation*. Houston.

Moore, P.L.: "How to select drilling fluids. *Oil and Gas Journal*, 4 octubre 1965.

Moore, P. L.: "Control of viscosity and filtration rate of drilling". *Oil and Gas Journal*, 8 noviembre 1965.

A.I.D.: *Control of viscosity and gel strength*. Unit 5 IMC Drilling Mud., Houston, 1966.

A.I.D.: *Control of fluid loss and lost circulation*. Unit 6 IMC Drilling Mud., Houston, 1966.

A.I.D.: *Salt contamination and salt-water mud*. Unit 7 IMC Drilling Mud., Houston, 1967.

Kronsa: *Informe geotécnico del sistema de pilotaje de  $\phi$  1325 mm*.

Browning, W. C.; Perrillone, A. C.: *Clay chemistry and drilling fluids*. Milwhite, SPE 540 for AIME. Los Angeles.