



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

USO DE LODOS BENTONITICOS EN LA
CONSTRUCCION DE PILAS COLADAS BAJO
AGUA.

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
Q U E P R E S E N T A :
J O S E L U I S L O P E Z C A R B A J A L



DIRECTOR DE TESIS: M.I. JAIME MARTINEZ MIER

CIUDAD UNIVERSITARIA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: José Luis López
Carbajal

FECHA: Junio 15, 2004

FIRMA: 

A mis padres, por el esfuerzo incansable

A mis hermanos, por el apoyo incondicional

A mi familia, por la confianza

A mis amigos, por la empatía

A mis maestros, por la entrega desinteresada del saber

A la Universidad, por la democrática enseñanza

GRACIAS

“Por la gracia de Dios,
la cual me ha sido dada como hábil constructor,
eché el cimiento; otro edifica sobre él.”

(Corintios I, 3:10)

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN		
1	ASPECTOS GENERALES Y PROPIEDADES DE LOS LODOS BENTONÍTICOS	1
1.1	Definición	1
1.2	Reseña histórica	2
1.3	Funciones de los lodos bentoníticos	3
1.4	Expresiones utilizadas para el cálculo de la estabilidad de perforaciones con lodo	7
1.5	Propiedades de los lodos	9
1.5.1	<u>Viscosidad</u>	9
1.5.1.1	<i>Viscosidad plástica</i>	10
1.5.1.2	<i>Viscosidad Marsh</i>	12
1.5.2	<u>Punto de fluencia</u>	14
1.5.3	<u>Densidad</u>	17
1.5.4	<u>Filtración</u>	19
1.5.5	<u>Contenido de arena</u>	20
1.5.6	<u>Concentración de iones hidrógeno, pH</u>	22
2	ELABORACIÓN Y MANEJO DE LOS LODOS	23
2.1	Dosificación	23
2.2	Mezclado	27
2.3	Reuso y contaminación	28
2.4	Efecto en los lodos	29
2.4.1	<u>Efecto del suelo</u>	29
2.4.2	<u>Efecto de la materia orgánica</u>	30
2.4.3	<u>Efecto del cemento</u>	30
2.4.4	<u>Efecto de la sal</u>	31
2.5	Tiempo de reposo	32
2.6	Aditivos y fibras	33
2.7	Principales problemas y tratamiento	34
3	PROCESO CONSTRUCTIVO DE PILAS COLADAS BAJO AGUA Y USO DE LOS LODOS	35
3.1	Introducción	35
3.2	Pilas coladas bajo agua	35
3.3	Proceso constructivo	36
3.4	Equipo usado	39
3.4.1	<u>Grúas</u>	39
3.4.2	<u>Perforadoras</u>	41
3.4.3	<u>Almejas e hidrofresas</u>	43
3.4.4	<u>Desarenadores</u>	44

3.5	Perforación	45
3.5.1	<u>Sistema de lodos</u>	53
3.5.2	<u>Control de lodos durante la perforación</u>	56
3.5.3	<u>Especificaciones de lodos</u>	57
3.6	Acero y concreto	57
3.6.1	<u>Acero</u>	57
3.6.2	<u>Concreto</u>	59
3.7	Verificación de calidad	61
4	IMPACTO AMBIENTAL	63
4.1	Lodos al final del proceso en obra	63
4.2	Legislación	64
4.3	Transporte y disposición	65
4.4	Polímeros	66
5	CONCLUSIONES	68
	BIBLIOGRAFÍA	72
	ANEXO A. FÍSICOQUÍMICA DE LA BENTONITA	
	ANEXO B. TIPOS DE FLUIDOS	
	ANEXO C. SUPERVISIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE PILAS	

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es el resultado de recopilación de información relacionada con el empleo de lodos bentoníticos en la construcción de pilas coladas en el lugar.

La selección de este tema para su desarrollo como trabajo de investigación surgió debido a que en las publicaciones relacionadas con la perforación para pilas coladas en sitio se trata de una manera superficial el tema de los lodos y cuando el ingeniero constructor requiere de su uso en obra, sólo dispone de información fraccionada que en muchas ocasiones le hace perder eficiencia.

El objetivo de este trabajo es presentar un panorama general, pero suficientemente detallado, de las características de los lodos bentoníticos, su empleo en la construcción de pilas coladas bajo agua, e impacto en el medio ambiente, haciendo especial énfasis en sus propiedades y en la importancia del control de las mismas.

En el desarrollo de la investigación se consultaron libros de texto, especificaciones, tesis, sitios específicos en internet y otras obras.

El Capítulo 1 contiene los aspectos generales relacionados con los lodos, incluyendo una breve reseña histórica de su empleo y las funciones que normalmente desarrollan en una excavación, así como las expresiones utilizadas para el cálculo de la estabilidad de perforaciones ademas con ellos. Se incluyen también las propiedades de los lodos, los factores que los afectan, el motivo de su importancia y los ensayos de laboratorio que se efectúan para la cuantificación de esas propiedades.

En el Capítulo 2 se presentan aspectos de dosificación necesarios para obtener mezclas de lodos adecuadas, así como la contaminación por efecto del suelo, sal y materia orgánica. También se mencionan algunos problemas que se presentan cuando las propiedades de los lodos cambian y su tratamiento recomendado.

En el Capítulo 3 se describe el proceso constructivo de las pilas bajo agua y el equipo usado. En la parte de perforación se trata el uso de los lodos, su sistema físico, el control que debe efectuarse para garantizar un uso eficiente de ellos y especificaciones empleadas.

El Capítulo 4 se refiere al impacto ambiental de los lodos una vez que han sido usados, su manejo y transporte, los sitios de disposición final, la legislación vigente al respecto y el impacto que producen en el medio ambiente.

Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones que se derivan de este trabajo.

Los anexos incluidos al final del trabajo tratan temas que, aunque no forman parte medular del trabajo, contribuyen al mejor entendimiento de los temas tratados. Así, en el Anexo A se trata el tema de las propiedades y clasificación de las arcillas y las propiedades de la bentonita; en el Anexo B se presenta la clasificación de los fluidos; en el Anexo C se presentan aspectos de supervisión que se deben tener en cuenta durante la construcción.

1. ASPECTOS GENERALES Y PROPIEDADES DE LOS LODOS BENTONÍTCOS.

1.1 Definición

Un lodo convencional generalmente está constituido por los siguientes materiales, mezclados en diversas proporciones, de acuerdo con el efecto deseado en las propiedades del flujo:

- un líquido, usualmente agua limpia sin contaminar
- un coloide¹ sólido
- agentes de control
- sólidos no coloidales, añadidos inicialmente o adicionados al lodo durante el proceso de excavación.

En los lodos bentoníticos el coloide sólido empleado es la bentonita, que es un polvo preparado a partir de arcillas naturales que contienen montmorillonita. Se pueden conseguir bentonitas de diferentes grados; las mejores son aquellas que pueden proporcionar las condiciones de flujo requeridas con las menores concentraciones. La selección de una marca o clase de bentonita está gobernada por las condiciones de la obra y siempre se requieren efectuar ensayos para la determinación de su rendimiento, así como para establecer las propiedades del lodo que con ellos se produzca. En el Anexo A se presentan las propiedades y clasificación de las arcillas y de las bentonitas.

En la elaboración del lodo se realiza una mezcla íntima de los materiales antes mencionados y se permite que se lleve a cabo la hidratación de la bentonita. Como resultado de este proceso se obtiene un fluido que presenta algunas características de

¹ Coloides son aquellos materiales que al mezclarse con un líquido producen una dispersión homogénea de las partículas pequeñas; si las partículas no sedimentan en un tiempo razonable, a la dispersión se le llama solución coloidal. Cuando las partículas dispersadas son grandes y se asientan rápidamente, a la dispersión se le denomina suspensión.

interés, como son la tixotropía y su clasificación dentro de los denominados fluidos plásticos de Bingham.

La tixotropía, investigada inicialmente por Peterfi y Friendlych y definida por ellos en 1927, consiste en una serie de variaciones ocurridas al fluido en condiciones isotérmicas, las cuales son reversibles y dependientes del tiempo. Las variaciones consisten básicamente en un endurecimiento del fluido bajo condiciones de reposo, formándose un gel o costra y en un regreso al estado de liquefacción bajo la agitación o remoldeo.

La clasificación de los lodos como fluidos plásticos de Bingham y la importancia de aquella se describen en el Anexo B.

1.2 Reseña histórica

El empleo de lodos para la estabilización de excavaciones es relativamente reciente. Sus orígenes se remontan a la Ingeniería Petrolera, donde se comenzaron a utilizar hacia 1914 en la recirculación de los azolves provenientes de las perforaciones. Paralelamente se observó su aplicabilidad en el enfriamiento de los barrenos de perforación y finalmente se estableció que eran de utilidad en el balanceo de las presiones artesianas y de gases, así como para soportar las paredes de la perforación en formaciones inestables.

Los procedimientos de construcción que utilizan lodos aumentaron con los años. Para 1977 (Xanthakos, P., 1979), el total de muros diafragma construidos en el mundo utilizando lodos era mayor de 10 millones de metros cuadrados. En la citada referencia se presenta una recopilación de acontecimientos significativos en la historia del empleo de los lodos, los cuales se resumen en la Tabla 1.

En México, uno de los primeros usos de los lodos bentoníticos fue como fluidos de perforación para sondeos, tanto en suelos como en rocas, con extracción de muestras. Se observó que al utilizarlos, las paredes de la excavación se mantenían estables y permitían obtener una mejor calidad en las muestras debido a la reducción en el volumen de

sedimentos. Posteriormente se emplearon en la estabilización de las paredes de perforaciones para cimientos profundos y muros colados en el lugar bajo el nivel freático. Para la construcción del Sistema de Transporte Colectivo “Metro”, se utilizaron lodos bentoníticos para la estabilización de las trincheras donde posteriormente se cuelan muros-ademe de concreto. Actualmente el empleo de sistemas constructivos que incluyen el uso de lodos es muy común, aunque la tecnología de los mismos continúa en desarrollo.

Tabla 1.1 Acontecimientos significativos en el empleo de lodos (Xanthakos, P., 1979).

Acontecimiento	Fecha
- Conocimiento de la acción de soporte y estabilización de los lodos	1900
- Primera publicación relativa a lodos	1913
- Inicio de la tecnología de fluidos para excavaciones	1921
- Investigación y definición de la tixotropía	1927
- Introducción de la bentonita en los sistemas de lodo	1929
- Aplicación del viscosímetro de Stormer para la medición de las propiedades de los lodos	1931
- Invención del viscosímetro Marsh	1931

El aumento en el uso de lodos bentoníticos obedece a tres factores principales:

- i) Disponibilidad de bentonita en el mercado
- ii) Adaptabilidad del método a las situaciones y condiciones difíciles
- iii) Avances en la solución de los problemas técnicos y prácticos por las mejoras en las técnicas de perforación

1.3 Funciones de los lodos bentoníticos

En la construcción de pilas coladas en el sitio se pretende que los lodos cumplan con las siguientes funciones:

- a) Impermeabilizar y proteger con una costra o enjarre (*cake*) las paredes de la excavación. Una justificación práctica de su uso como fluido circulante es evitar derrumbes de depósitos granulares y formaciones no consolidadas. Esto se logra con la formación de una costra impermeable en la interfase suelo-lodo, gracias a la cual se puede desarrollar el empuje hidrostático contra las paredes de la excavación produciendo una fuerza resistente adicional, la cual ayuda a estabilizar la excavación previendo desplazamientos y desconchamientos del suelo. Por otro lado, al formarse la costra impermeable se evitan las pérdidas de lodo hacia el terreno. El enjarre debe ser delgado para permitir el paso de las herramientas de perforación, ya que una costra muy gruesa produce empaques de la barrena y la destrucción del sello impermeable al extraer la tubería, lo que puede ocasionar derrumbes en las paredes. La costra formada en la interfase es el resultado de la filtración del fluido en el suelo; su espesor depende de la diferencia entre la presión hidrostática de la columna de lodo y la del fluido contenido en la formación, así como de las propiedades del suelo y las características coloidales del lodo.
- b) Remover el material excavado. El lodo debe suspender en su interior el material proveniente de la excavación, evitando acumulaciones de caídos en el fondo de la misma. La remoción de los detritus del fondo a la superficie depende principalmente del mantenimiento de la densidad, viscosidad y velocidad del lodo en la perforación. Otros factores de importancia son el tamaño y la densidad de los detritus. Las partículas sólidas tenderán a sedimentarse, esa tendencia será mayor si tales partículas son más densas. El lodo arrastrará los detritus cuya velocidad de sedimentación sea menor que la suya propia.
- c) Permitir el flujo libre del concreto colocado con tubería para que se presente un desplazamiento del concreto fresco sin afectar el comportamiento de la mezcla.
- d) Fluir en tuberías para facilitar el manejo de los materiales provenientes de la excavación.

- e) Ayudar a la sedimentación en tanques y permitir la separación de los sólidos adicionados durante su recirculación.
- f) Ser de fácil disposición.

Los requerimientos anteriores son conflictivos y en algunos casos opuestos; los dos primeros implican alta viscosidad y gelatinización, en tanto los cuatro últimos requieren que los lodos sean ligeros y tengan flujo libre. Por tanto, en la proporción deberá buscarse el equilibrio entre sus características, de forma tal que puedan desarrollar todas sus funciones.

Como ya se mencionó, una de las principales funciones de los lodos es permitir que el empuje hidrostático del fluido actúe contra las paredes de la excavación. Para que esto suceda, es necesario que se forme una película o costra impermeable (o muy poco permeable) en la interfase suelo-lodo. En la formación de la costra el lodo entra a los poros del suelo por alguna diferencia de presiones; durante este proceso, grupos de partículas sólidas comienzan a ocupar los espacios vacíos entre los granos de suelo. El proceso de filtración continúa y más partículas sólidas se acumulan en los poros formándose una zona de material de gel, apretadamente empacado, que constituye la película denominada costra (*cake* o *filter cake*). Se supone que esta película se ha formado cuando se presenta un súbito descenso en la velocidad de pérdida de lodos. De este proceso puede inferirse que el espesor de la costra se incrementa no solo con la profundidad, sino que también con el tiempo bajo el flujo continuo.

La costra es cubierta, generalmente en pocos segundos, por una capa fina de partículas de bentonita, llamada también película protectora; en este estado el sello es suficientemente impermeable y ofrece una completa resistencia a la posterior penetración. A continuación se inicia una segunda fase, que tarda varias horas y en ocasiones días, hasta que la penetración sea constante. Dado que la película se forma de la filtración del lodo, su formación está influenciada por el grado de impermeabilidad del suelo. En la Fig. 1.1 se muestra la formación de la costra en suelos compactos y en sueltos.

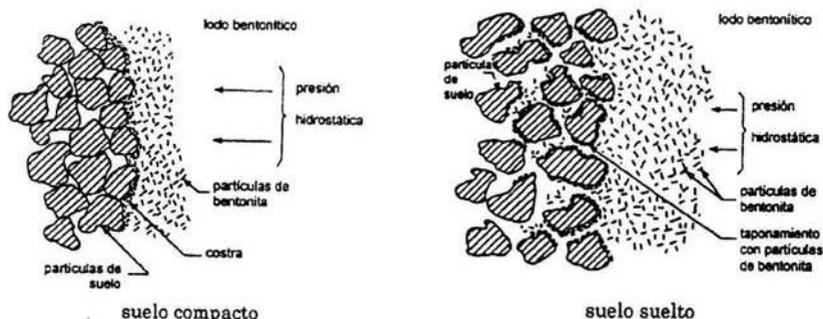


Fig. 1.1 Formación de costra (Reese and O'Neill, 1988).

Respecto a las pérdidas del flujo a través del suelo, se ha observado (Xanthakos, P., 1979) que, a mayor concentración de coloides sólidos, se produce menor pérdida de lodos, y que a concentraciones menores se presentan fugas aún en suelos de baja permeabilidad. Por tanto, será necesario establecer una concentración mínima para regular este comportamiento.

Ya que ningún material es completamente impermeable, durante y después de la formación de la costra, el agua proveniente del lodo continúa filtrándose a través del suelo. Aunque la cantidad puede ser pequeña, debe tomarse en consideración ya que en muchos casos esto se traduce en incrementos de la concentración inicial de coloides.

La costra también tiene un efecto plastificante en la interfase, de tal forma que las partículas individuales y los granos son obligados a permanecer en la estructura de suelo. Lo anterior es de particular importancia en suelos que carecen de cohesión, donde las fuerzas cinéticas y las de fricción son las que deben soportar a las partículas de suelo en la pared de la excavación las cuales tienden a colapsar debido a su propio peso bajo la acción de las herramientas de perforación. Durante la perforación las partículas del suelo en la interfase deben ser soportadas por el esfuerzo cortante de la costra.

El efecto de penetración del lodo depende del tipo de suelo excavado. En arcillas, su baja permeabilidad es suficiente para reducir las pérdidas de lodo a valores mínimos y en

muchos casos la excavación puede llevarse a cabo empleando agua natural como lodo, permitiéndose así la aplicación del empuje contra la cara de la excavación. En suelos granulares gruesos se ha observado que cuando éstos se encuentran saturados con lodos, el ángulo de fricción interna del material tiende a disminuir, siendo necesario considerar el ángulo reducido en la zona impregnada con lodo. Sin embargo, no está siempre claro bajo qué condiciones deben esperarse estos cambios en las propiedades de los suelos granulares. Por otra parte, las superficies de las partículas de suelo generalmente están contaminadas y pueden modificar la resistencia a la fricción; para la mayoría de las superficies contaminadas el agua incrementa la fricción y actúa como antilubricante.

1.4 Expresiones utilizadas en el cálculo de la estabilidad de excavaciones con lodo

Cuando se emplean lodos en la perforación para pilas coladas en el lugar, se pretende que el lodo desarrolle una acción estabilizadora mediante la aplicación de su empuje hidrostático (E_L) contra las paredes de la perforación; éste empuje debe ser mayor que el empuje activo del suelo (E_A) más el hidrostático (E_H), (Schmitter *et al.*, 1976), es decir:

$$E_L > E_A + E_H \quad (1)$$

Y para asegurar la estabilidad de una zanja, se puede definir factor de seguridad (FS) como la relación:

$$FS = \frac{E_L}{(E_A + E_H)} \quad (2)$$

Con base en las expresiones anteriores, se determinó el factor de seguridad y el peso volumétrico del lodo necesario para estabilizar perforaciones circulares, los cuales se presentan a continuación:

Suelo	Factor de seguridad (FS)	Peso volumétrico del lodo, γ_L
Predominantemente friccionante	$FS = \frac{(\gamma_L n - \gamma_w m) N_\phi^2}{2\gamma F_2 - (\gamma_L n - \gamma_w m) N_\phi}$	$\gamma_L = \frac{1}{n} \left(\frac{2FS\gamma F_2}{N_\phi(N_\phi + FS)} + \gamma_w m \right)$
Predominantemente cohesivo	$FS = \frac{cN_p}{H(\gamma - \gamma_L n)}$	$\gamma_L = \frac{1}{n} \left(\gamma - \frac{cN_p}{FS \times H} \right)$

donde:

γ_L , peso volumétrico del lodo.

γ , peso volumétrico del material excavado.

γ' , peso volumétrico sumergido del suelo.

γ_w , peso volumétrico del agua

H , profundidad de excavación.

c , cohesión del suelo.

ϕ , ángulo de fricción interna del suelo.

m, n , se presentan en la Fig. 1

$$N_\phi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (3)$$

$$F_2 = 1 - m \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma} \right) \quad (4)$$

$$N_p = \frac{\gamma H - \gamma_L n H}{c} \quad (5)$$

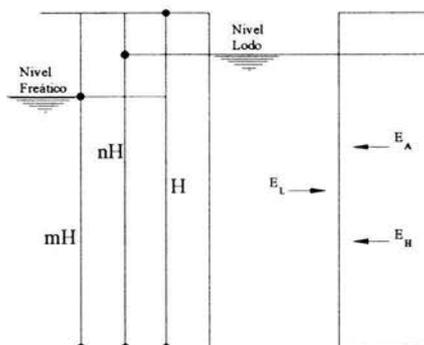


Fig. 1.2 Variables en la estabilidad de perforaciones ademas con lodo
(Schmitter *et al.*, 1976).

1.5 Propiedades de los lodos

Las principales propiedades que se determinan en los lodos son: viscosidad (plástica y Marsh), punto de fluencia, densidad, filtración y enjarre, contenido de arena y pH. A continuación se describe el significado, importancia y procedimiento para la determinación de cada una de ellas.

1.5.1 Viscosidad

Es la resistencia que opone un líquido a fluir. Básicamente depende de tres factores:

- Viscosidad de la fase líquida, es decir, la del agua.
- Tamaño, forma y cantidad de partículas en suspensión. Este factor varía con la cantidad de bentonita usada en la preparación del lodo y con la contaminación del mismo.
- Fuerzas entre las partículas.

La viscosidad de un lodo constituye una medida de su manejabilidad con equipos de bombeo. Debe ser pequeña, con el objeto de disminuir las pérdidas de carga durante el manejo del lodo, así como la potencia requerida para las bombas; sin embargo, no debe ser excesivamente baja ya que las partículas de arena se pueden sedimentar en el fondo de la perforación al presentarse una suspensión.

En la práctica es usual la determinación de dos viscosidades: la plástica y la Marsh; ambas constituyen un indicador cualitativo del grado de manejabilidad del lodo empleado, pero la viscosidad Marsh se usa además como una forma rápida y sencilla de estimar el grado de contaminación del lodo. Los métodos para la determinación de estas viscosidades, así como las unidades de medida, son diferentes; sin embargo, es posible establecer una correlación empírica entre los valores obtenidos en ellas.

1.5.1.1 Viscosidad plástica

Esta propiedad, en conjunto con el punto de fluencia, constituyen las características empleadas para la definición de los cuerpos de Bingham dentro de los cuales están comprendidos los lodos bentoníticos.

Con base en lo presentado en el Anexo B, se puede observar que la viscosidad plástica (η) es igual a la pendiente de la recta (τ) en función de ϵ' en su parte lineal, siendo τ el esfuerzo cortante aplicado y ϵ' la velocidad de deformación inducida por el esfuerzo aplicado.

Para su determinación se emplea un viscosímetro rotacional (Fig. 1.3) en el cual están integrados dos cilindros (uno interior fijo y otro exterior móvil que puede girar a 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm), un recipiente para lodo y una plataforma que puede moverse verticalmente.

El ensayo se inicia llenando un vaso mezclador con la muestra de lodo a analizar, la cual debe agitarse vigorosamente durante tres minutos a fin de disipar el efecto de

gelatinización natural del lodo. A continuación se llena el vaso del viscosímetro y se coloca en la plataforma donde se hace que los cilindros penetren en lodo hasta una marca que éstos tienen en su parte superior. Enseguida se aplica una velocidad de 600 rpm al cilindro exterior, que produce un momento torsor, a través del lodo, sobre el cilindro fijo; tal momento es registrado por medio de un resorte calibrado y se indica en una escala circular. Posteriormente se disminuye la velocidad a 300 rpm y se registra de la misma forma la lectura. La diferencia entre las dos lecturas corresponde a la viscosidad plástica en centipoises².

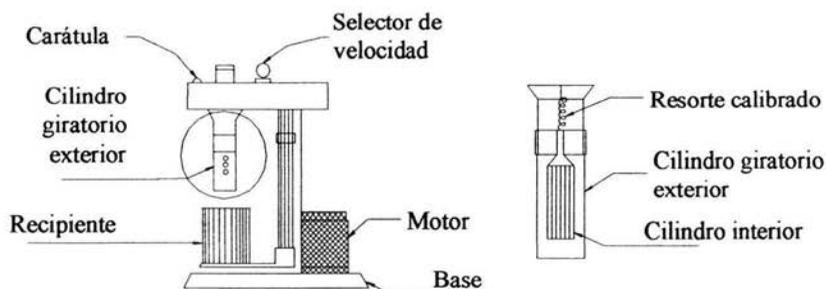


Fig. 1.3 Viscosímetro rotacional.

Un hecho interesante es que como el número de Reynolds³ marca el límite entre el flujo laminar y el turbulento, al aumentar el valor de η , manteniendo la velocidad de escurrimiento y el diámetro de la perforación constantes, se puede pasar de un flujo turbulento a uno laminar y viceversa. Esto es importante pues la capacidad de transporte de un lodo aumenta cuando el flujo es turbulento.

Se han observado viscosidades plásticas comprendidas entre 1 y 60 centipoises (Xanthakos, P., 1979), recomendándose valores entre 10 y 25. Valores menores pueden permitir a las arenas sedimentarse dentro del pozo durante una suspensión.

² El poise es la unidad estándar de viscosidad y se define como 1 dina seg/cm.

³ $Re = vd \gamma_l / \eta g$

siendo v = velocidad de escurrimiento.

d = diámetro del canal de flujo.

η = viscosidad del flujo.

γ_l/g = masa específica del lodo.

1.5.1.2 Viscosidad Marsh

Esta propiedad, además de suministrar información respecto a la manejabilidad de un lodo, proporciona un criterio rápido y sencillo para su reutilización o desecho.

Para su determinación se emplea el Cono Marsh (Fig. 1.4) que consiste en un embudo de 1500 cm³ de capacidad, con una malla en su parte más ancha que sirve para retener partículas mayores a 1.6 mm (1/16 de pulgada). Su extremo más angosto termina en un pequeño tubo de 5 mm de diámetro interior.

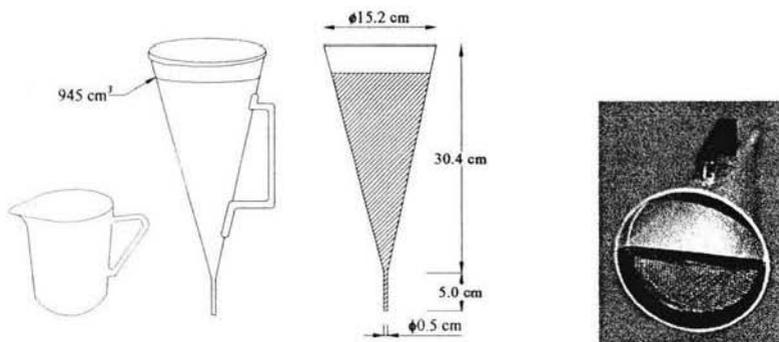


Fig. 1.4 Cono Marsh.

En la ejecución de la prueba se toma una muestra de lodo y se agita en un vaso mezclador durante tres minutos para disipar la gelatinización del lodo. A continuación se le vierte dentro del Cono Marsh, hasta el nivel de la malla, manteniendo tapado el orificio inferior con un dedo. Luego se permite la salida del lodo a un vaso receptor marcado al volumen de 946 cm³ (0.25 galones) y con un cronómetro se mide el tiempo que tardan en fluir los 946 cm³. El resultado obtenido es la viscosidad Marsh en segundos.

No existe una correlación rigurosa entre la viscosidad medida con viscosímetro y con la de cono Marsh. Experimentalmente Petróleos Mexicanos obtuvo la expresión:

$$\eta = D(0.58T - 461/T) \quad (6)$$

donde:

η , viscosidad plástica en centipoises

T , viscosidad Marsh en segundos

D , densidad del lodo en kg/lt

La Fig. 1.5 es una gráfica que relaciona las viscosidades para densidades entre 1.03 y 1.06 kg/lt, mientras que la Fig. 1.6 presenta una conversión aproximada de la viscosidad plástica a la Marsh.

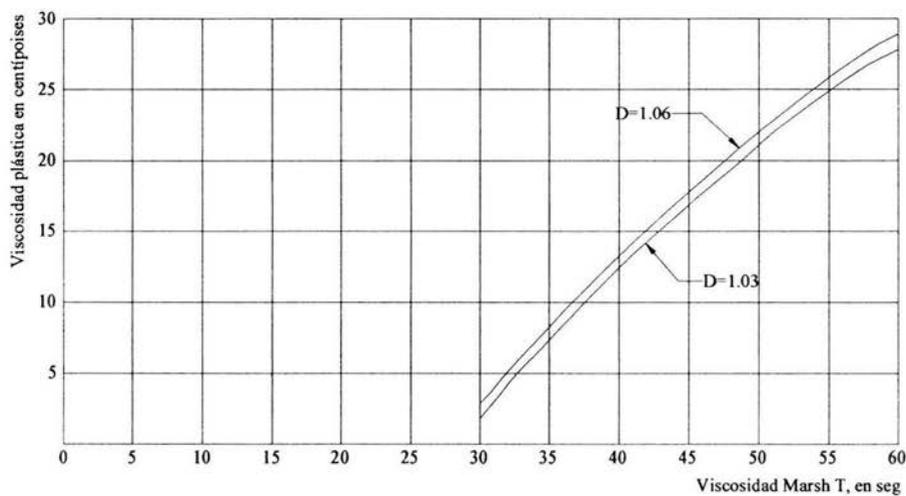


Fig. 1.5 Relación entre las viscosidades plástica y Marsh.

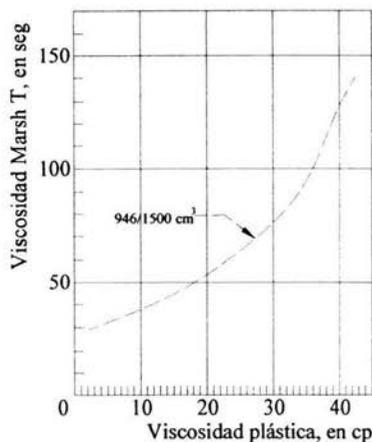


Fig. 1.6 Conversión de la viscosidad plástica a Marsh.

En general la viscosidad de los lodos suele estar entre 40 y 55 segundos para trabajos normales. Antes del vaciado de concreto se debe verificar la viscosidad, ya que si está por debajo de los valores antes mencionados existe el peligro de derrumbes, y si está por encima puede que el concreto tenga problemas para desalojar el lodo y se llegue a revolver con él, produciendo una baja notable en la resistencia nominal del concreto, a la vez que puede actuar como retardador de fraguado a tiempo indefinido.

1.5.2 Punto de fluencia

El punto de fluencia o estado de gel de un lodo es el valor mínimo del esfuerzo cortante para el cual ocurre un flujo. Esta propiedad se emplea para medir la resistencia de un gel y su variación con el tiempo, siendo una medida indirecta de la tixotropía. En la Fig. B-1 del Anexo B está representada por τ y usualmente se expresa en $\text{lbs}/100 \text{ ft}^2$ ($4.88 \times 10^{-2} \text{ kg}/\text{m}^2$).

Por otro lado, el punto de fluencia constituye una característica importante en la definición del radio de penetración del lodo en la vecindad de la perforación o de la zanja

estabilizada. Así, para un lodo cuyo punto de fluencia que se esté inyectando a una presión P en un suelo cuyos vacíos tengan un radio R , el radio de penetración L esta dado por:

$$L = PR / 2\tau_0 \quad (7)$$

donde:

$$R = 9\sqrt{k/n}$$

k , es la permeabilidad en cm/s y n la porosidad del suelo.

Cuanto mayor sea el punto de fluencia menor será el radio de penetración, pudiendo de esta forma evitarse la circulación del lodo fuera de la zona de interés.

Otro aspecto a considerar relacionado con esta propiedad es su influencia en el diámetro de las partículas que no sedimentan en una columna de lodo. Se tiene que:

$$D = 6\tau_0 / (\gamma - \gamma_s)g \quad (8)$$

donde:

D , diámetro de las partículas que no sedimentan

τ_0 , punto de fluencia del lodo

γ_s , densidad de las partículas que se sedimentan

γ , densidad del lodo

g , aceleración de la gravedad, igual a 9.81 cm/s^2

Con base en esta relación, se ha graficado el diámetro, D , contra el punto de fluencia para condiciones de obra en México (Fig. 1.7). En ellas se observa que con un punto de fluencia de $14.64 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ ($3 \text{ lbs}/100 \text{ ft}^2$) se mantienen sin sedimentar todas las partículas menores a las arenas medias (2.00 a 0.425 mm).

Para la cuantificación de esta propiedad se puede utilizar un viscosímetro rotacional o un “shearómetro” (Fig. 1.8); el segundo hace la determinación con menos precisión.

Cuando se emplea un viscosímetro el punto de fluencia se obtiene de la diferencia entre la lectura a 300 rpm y la obtenida para la viscosidad plástica.

$$\tau_0, \text{ lectura a 300 rpm} - \text{viscosidad plástica (en lb/100ft}^2\text{)} \quad (9)$$

El shearómetro, consiste en un recipiente con una escala de unidades de esfuerzo cortante adherida a él y un cilindro que pesa 5 gr.

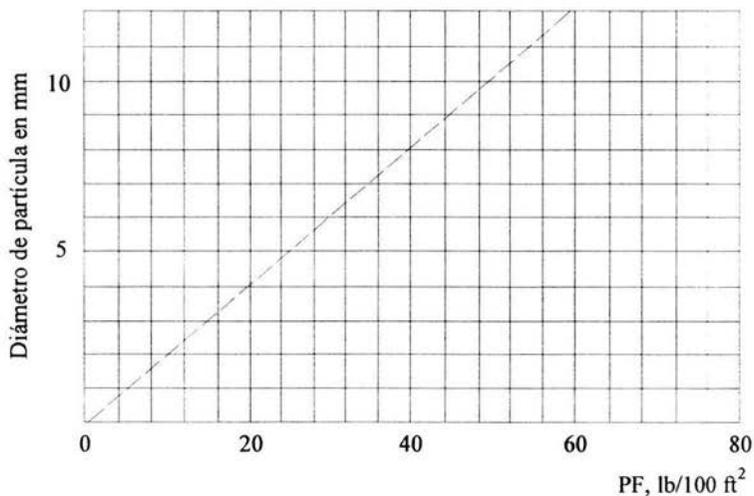


Fig. 1.7 Relación entre el punto de fluencia y el diámetro de las partículas que el lodo mantiene en suspensión.

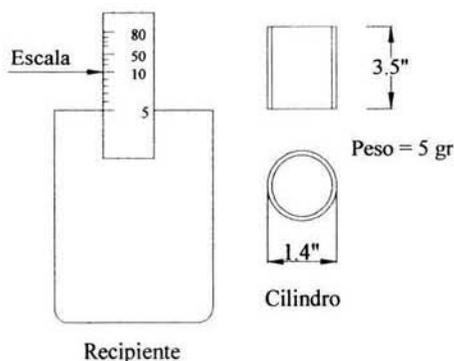


Fig. 1.8 Shearómetro.

En el ensaye se llevan a cabo dos mediciones, una con el lodo recién agitado y otra después de dejarlo reposar durante diez minutos.

El procedimiento consiste en colocar el cilindro humedecido en la superficie del lodo y dejarlo hundir, haciendo lecturas en la escala a diferentes tiempos a medida que el cilindro se va sumergiendo. Si el cilindro se hunde completamente durante el primer minuto se dice que la resistencia es nula, de lo contrario se repite la operación después de dejar reposar el lodo durante diez minutos. El punto de fluencia medido a los diez segundos en la primera prueba debe estar entre 4.88 y $48.8 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ (1 y 10 lb/100 ft^2) y en la prueba efectuada diez minutos después debe tener un valor de aproximadamente el doble.

1.5.3 Densidad

Se define como la cantidad de materia contenida en la unidad de volumen. Depende de la cantidad y peso específico de las partículas en suspensión. Puede afirmarse que la densidad inicial de un lodo es función del tipo y cantidad de arcilla empleada en tanto que una vez que el lodo se encuentre en la excavación, la densidad tiende a elevarse como consecuencia de la retención natural de partículas de suelo por parte del lodo.

La densidad del lodo resulta de importancia en el efecto de soporte de las paredes de las perforaciones, así como en el desplazamiento del lodo por el concreto fresco durante el colado de las pilas. Su elección depende del peso volumétrico y la granulometría del suelo a excavar, así, en arenas gruesas de cuarzo con pocos finos se requieren densidades hasta de 1.25 g/cm^3 , en tanto que en arcillas sin arena se pueden emplear lodos con densidades de 1.04 g/cm^3 . Es recomendable iniciar las perforaciones con densidades entre 1.04 y 1.15 g/cm^3 y modificarlas durante el proceso de excavación de acuerdo con los materiales que se encuentren. Densidades de más de 1.2 g/cm^3 presentan dificultades para el bombeo.

En ocasiones puede resultar conveniente aumentar la densidad de un lodo para incrementar el empuje hidrostático contra las paredes de la excavación. Para ello usualmente se emplea barita en polvo; sin embargo, este procedimiento resulta costoso, por lo que se puede optar por aumentar la densidad más económicamente adicionando al lodo arena muy fina.

Durante el colado del concreto se recomienda que la densidad del lodo no exceda de 1.25 g/cm^3 para que este pueda ser eficientemente desplazado por el concreto.

Para la determinación de la densidad de un lodo se emplea la llamada balanza de lodos (Fig. 1.9). En el ensaye se llena el recipiente de la balanza con la muestra a analizar hasta que parte de ella escurra por el orificio ubicado en la parte superior, (esto con el fin de proporcionar un volumen constante), se limpia el lodo excedente y con el contrapeso se nivela obteniendo por lectura directa en la escala la densidad en g/cm^3 o t/m^3 .

Con el fin de garantizar que los datos obtenidos sean correctos, es necesario verificar periódicamente la calibración de la balanza. Para esto se determina con ella la densidad de una muestra de agua limpia debiendo obtenerse 1.0 g/cm^3 (8.33 lb/gal o 62.3 lb/ft^3), dependiendo de la escala de la balanza. En caso de variación en la lectura se debe remover la tapa del recipiente colocado en el extremo opuesto al del lodo que contiene una cierta cantidad de pequeñas esferas de plomo que deberán incrementarse o reducirse hasta corregir el error.

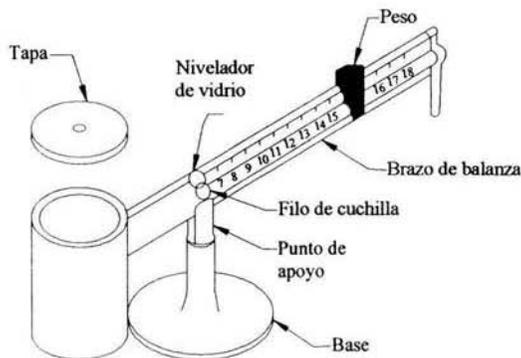


Fig. 1.9 Balanza de lodos.

1.5.4 Filtración

Esta propiedad se determina para estimar la habilidad de un lodo para formar la costra, así como el espesor que esta puede alcanzar. Básicamente se separa el agua libre de las partículas de arcilla dejando el residuo plástico llamado enjarre o *cake*.

Al aumentar la cantidad de agua libre de un lodo con la relación agua-bentonita constante, aumenta el espesor de la costra y disminuye su resistencia. Por tanto, una gran cantidad de agua libre en un lodo resulta desfavorable. Por otro lado, una baja filtración durante la prueba es tomada como indicadora de una costra de baja permeabilidad.

Para la prueba de filtrado se utiliza el filtro prensa (Fig. 1.10) que consta de un recipiente para la colocación del lodo, de un dispositivo para la aplicación de presión y de una probeta graduada para la medición del agua filtrada.

En la prueba se coloca la muestra de lodo en el filtro prensa y se somete a una presión de 7 kg/cm^2 durante un período de 30 minutos, tiempo durante el cual cierta cantidad de agua es expulsada del filtro y es recogida en la probeta graduada. Al final de la prueba se mide la cantidad de agua expulsada en cm^3 , lo que constituye la filtración del lodo. También se mide el espesor del residuo plástico que queda en el fondo del recipiente.

Algunos datos promedio de las propiedades de lodos empleados en perforaciones son: agua libre o filtración inferior a 20 cm^3 y espesor de enjarre inferior a 5 mm.

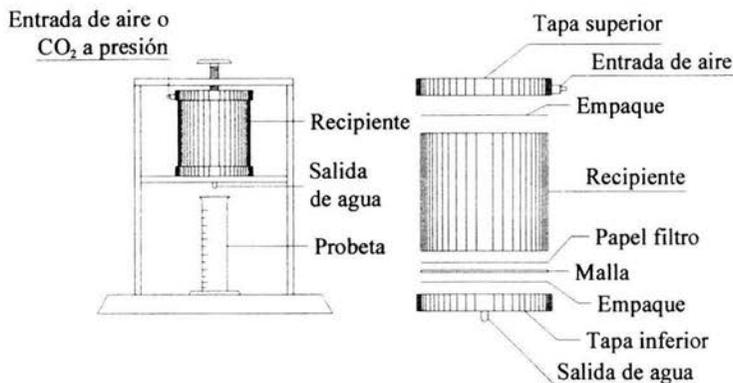


Fig. 1.10 Filtro prensa.

1.5.5 Contenido de arena

Esta propiedad se refiere a la cantidad de arena que se mantiene en suspensión en el lodo, expresada como porcentaje. Su determinación es importante, ya que si tal porcentaje es excesivo se aumenta el espesor de la costra y el volumen de agua filtrada. Otro efecto nocivo de un alto contenido de arena es el daño que ésta produce a las herramientas de perforación por su abrasividad.

Durante el colado de la estructura de concreto el contenido de arena no debe llegar nunca al 7%, pues al tener contenidos de este orden la arena se va decantando formándose flóculos que se adhieren a las armaduras y al vaciar el concreto éste pasa rodeando los flóculos y dejando núcleos que dan origen a la corrosión y a zonas débiles del concreto. En este estado el concreto no desplaza fácilmente al lodo y pueden quedar bolsas de arena y lodo dentro del concreto.

Para la determinación del contenido de arena en un lodo existen dos procedimientos: uno que emplea un tubo Baroid de vidrio (Fig. 1.11) y otro que utiliza la malla No. 200.

El tubo Baroid tiene dos marcas de aforo para el lodo y el agua, y en su parte inferior tiene una zona calibrada para la medición del volumen de arena; además, posee un pequeño embudo plástico que se coloca en la boca del tubo y un cilindro acoplado al embudo que lleva una malla No. 200 en la que se retiene la arena.

Durante el ensaye se toma la muestra de lodo y se coloca en el tubo hasta el nivel de lodos, enseguida se vacía agua limpia hasta alcanzar el siguiente nivel marcado. El lodo diluido se vacía sobre la malla, agregándole agua para lavar la arena. Después se conecta la malla invirtiéndola sobre el cono y con un poco de agua se obliga a la arena a pasar al interior del tubo. Finalmente, se lee directamente el porcentaje en volumen de arena que contiene el lodo ensayado, en la escala que tiene la probeta en su extremo inferior.

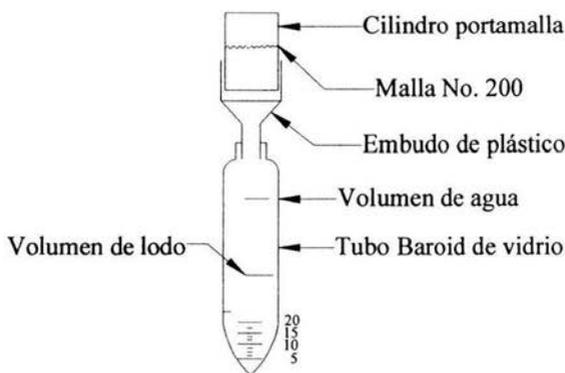


Fig. 1.11 Dispositivo para determinar el contenido de arena de un lodo.

Cuando se utiliza la malla No 200 para la determinación del contenido de arena, se efectúa un lavado del lodo sobre la malla; el material retenido se vacía en una probeta graduada en cm^3 , llenándola con agua limpia. El volumen observado se divide entre el volumen total de lodo ensayado y el resultado se expresa en porcentaje.

Es común que se especifiquen contenidos de arena menores del 3% en lodos de perforaciones.

1.5.6 Concentración de iones hidrógeno, pH⁴

El potencial hidrógeno representa el grado de acidez o alcalinidad de un lodo. Debido al carácter electronegativo de las suspensiones de arcilla, al tenerse pH bajos se provoca floculación y precipitación en forma de sedimentos, en tanto que pH elevados -que se pueden originar por la adición de sustancias alcalinas- producen, hasta un cierto límite, una estabilización de la suspensión. El pH esta muy ligado al equilibrio eléctrico entre las partículas y a posibles fenómenos de floculación.

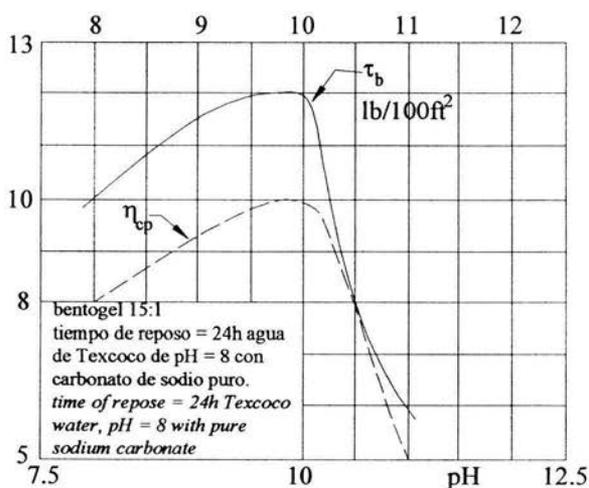


Fig. 1.12 Variación de la viscosidad plástica y el punto de fluencia en función del pH.

La determinación aproximada del pH se hace con papel sensible que cambia de color al contacto con el lodo y por comparación con un patrón de colores se obtiene su valor.

En lodos comunes el pH varía generalmente entre 7 y 10 (solución alcalina). La mezcla del lodo con cemento durante la colocación del concreto aumenta el pH; sin embargo, su valor no debe exceder de 12.

⁴ El pH es el logaritmo decimal del recíproco de la concentración de iones hidrógeno y varía entre 0 y 14. La acidez varía de 0 a 7, y la alcalinidad entre 7 y 14, siendo 7 la de una solución neutra.

2. ELABORACIÓN Y MANEJO DE LOS LODOS

2.1 Dosificación

Por lo general siempre se busca obtener el lodo bentonítico más económico que pueda cumplir adecuadamente con sus funciones, es decir el que con menos viscosidad presente una adecuada resistencia a la contaminación y pueda proporcionar estabilidad en la perforación, resultando económico su manejo en la obra. Para lo anterior es necesario realizar una adecuada dosificación de los materiales constitutivos.

La práctica usual para la dosificación varía desde una inspección visual y juicios basados en la experiencia, hasta la elaboración de especificaciones estrictas que requieren de la ejecución de ensayos de laboratorio. El primer método básicamente consiste en realizar ensayos de prueba y error, con los costos que ello implique; el segundo usualmente conduce a establecer especificaciones generales por algunas entidades, que las aplican indiscriminadamente en sus proyectos. A menudo sucede que las especificaciones más rígidas no tienen una base sólida y hacen que el trabajo sea más difícil y costoso.

Observando los dos extremos anteriores, se hace necesario seguir un procedimiento adecuado para la dosificación que contemple las características propias de cada obra y que pueda conducir a resultados económicos y factibles. A continuación se resume un procedimiento que cumple con estos requerimientos (Xanthakos, P., 1979):

1. Es conveniente efectuar ensayos a los materiales que se utilicen en la elaboración del lodo, con el fin de determinar su composición. Esto puede ayudar a la selección de los mejores materiales antes de la elaboración de lodos de prueba.
2. A continuación se debe establecer el tipo de suelo o suelos donde se efectuarán las perforaciones. En la Tabla 2.1 se relaciona el tipo de suelo perforado contra la

tendencia a colapsar; se observa que la última será mayor a medida que la permeabilidad del suelo también lo sea.

Tabla 2.1 Relación entre el tipo de suelo y la tendencia a colapsar.

Tipo de suelo	Tendencia a colapsar	
	Seco	Con agua
Arcilla	Ninguna	Ninguna
Limo	Usualmente ninguna	Alguna
Arena limosa	Alguna	Apreciable
Arena fina (húmeda)	Apreciable	Apreciablemente alta
Arena gruesa	Apreciablemente alta	Alta
Grava arenosa	Alta	Muy alta
Grava	Muy alta	Muy alta

En la tabla anterior por “ninguna” se entiende que las paredes de la perforación pueden permanecer estables, pero no de una manera indefinida; “alguna” indica que no ocurrirán desconchamientos algún tiempo después de la exposición de las paredes de la perforación; “apreciable” indica que se pueden esperar socavaciones en cualquier momento, en tanto que “alta” y “muy alta” indican que se producirá un colapso a menos que las paredes sean protegidas.

Puede establecerse una correlación entre la presencia de diversos tipos de suelo y la viscosidad requerida para el lodo, tal como se ilustra en la Tabla 2.2. La correlación está basada en experiencias prácticas realizadas en los Estados Unidos y debe usarse con las reservas del caso.

3. Con base en los requerimientos de densidad se determina la fracción de material no coloidal necesaria para la estabilidad de la perforación, que puede incluir alguna cantidad de suelo proveniente de ésta; sin embargo, es de notar que una cantidad excesiva puede deteriorar el lodo.

Tabla 2.2 Correlación entre el tipo de suelo y la viscosidad requerida del lodo.

Tipo de suelo	Viscosidad Marsh	
	Suelo seco	Suelo bajo NAF
Arcilla	27-32	-
Arena limosa	29-35	-
Arcilla arenosa	29-35	-
Arena con limo	32-37	38-43
Arena fina a gruesa	38-43	41-47
Arena con grava	42-47	55-65
Grava	46-52	60-70

- Con base en la Tabla 2.2 se selecciona una viscosidad acorde con el suelo por perforar.
- Se establecen límites de control aplicables de acuerdo con la Tabla 2.3. En ocasiones será necesario refinar estos límites para aspectos particulares de operación.

Tabla 2.3 Límites de control para las propiedades de lodos.

Función	Concentración de bentonita %*	Densidad gr/cm ³	Viscosidad plástica cp	Viscosidad Marsh Seg	pH	Contenido de arena %
Soporte de la excavación	>3-4	>1.03	-	Límites establecidos de acuerdo con el tipo de suelo	-	>1
Sellado	>3-4	-	-		-	1
Suspensión de detritus	>3-4	-	-		-	-
Desplazamiento por el concreto	<15	<1.25	<20		12	<25
Separación de materiales coloidales	-	-	-		-	<30
Bombeo del lodo	-	-	-		-	-

*, se pueden esperar variaciones de acuerdo con el tipo de bentonita usada.

- Se determina si es necesario, y económicamente justificado, el uso de agentes de control.
- Se hace el proporcionamiento de los materiales constitutivos del lodo. Esta fase consiste en una estimación cuantitativa de la cantidad de bentonita, de la fracción no

coloidal y de los agentes de control. El proporcionamiento es empírico y depende de la experiencia, de si las propiedades de los materiales son conocidas o si debe hacerse con bases técnicas provenientes de los resultados de ensayos y estimaciones.

Un aspecto importante en la dosificación es el relacionado con el rendimiento de la bentonita, el cual usualmente se define como la cantidad de m^3 de lodo bentonítico con 15 centipoises de viscosidad que se pueden elaborar con una tonelada de bentonita seca. Este será un punto de importancia en la selección del tipo de bentonita.

Para obtener este rendimiento se necesita efectuar distintas mezclas, hasta obtener la adecuada. En la Tabla 2.4 (SMMS, 2001) se presentan valores que sirven como guía para la dosificación.

Tabla 2.4 Dosificación.

kg de bentonita / m^3 de lodo	% Bentonita	Densidad kg/dm^3	Viscosidad	
			Marsh s	cps
0	0	1.000	27	1.0
20	2	1.010	28	1.1
30	3	1.020	30	2.2
40	4	1.025	35	3.7
50	5	1.035	40	6.6
60	6	1.035	40	12.0
70	7	1.040	45	19.0
80	8	1.045	55	35.0
90	9	1.070	60	68.0
100	10	1.075	70	92.0

La economía relativa de los lodos depende del costo de los materiales puestos en la obra. Cuando no se consiguen bentonitas de buena calidad en la zona, los costos de transporte serán un factor importante. Así, en algunos casos puede resultar más económico emplear bentonitas de baja calidad, mejorando sus propiedades con la ayuda de agentes de control.

2.2 Mezclado

Al llevar a cabo el mezclado de los elementos constitutivos del lodo se pretende que la bentonita se hidrate totalmente. El tiempo que se requiere para obtener una hidratación completa (con lo cual la bentonita alcanza las propiedades deseadas de flujo), depende del método de mezclado y del tiempo mínimo de reposo.

La bentonita no se dispersa de una manera fácil en el agua. Debido a su notable habilidad para absorber agua, surgen dificultades al formarse grumos del material coloidal. Entonces, se necesita adicionar la bentonita a una corriente o chiflón de agua, lo que generalmente se hace con un dispositivo que se basa en el principio del tubo venturi (Fig. 2.1). La bentonita en polvo se coloca en un embudo del cual es succionada por la corriente de agua y se lleva a cabo la mezcla de los materiales, con el fin de asegurar una mezcla completa la tubería conduce la mezcla a una bomba que la recircula, llevándose a cabo el número de pasadas necesarias para obtener una completa hidratación. En la Fig. 2.2 se muestra un diagrama del equipo usado para mezclado de lodos. En esta operación cerca del 60% del lodo es recirculado en la unidad de mezclado y lo restante es bombeado a la perforación.

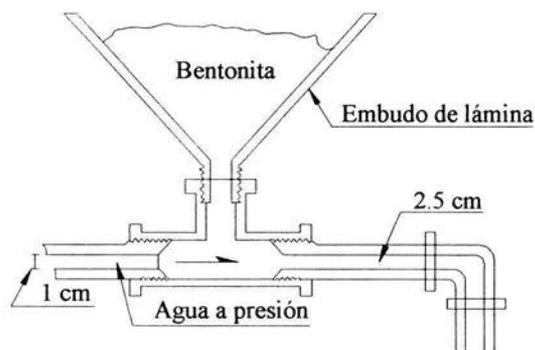


Fig. 2.1 Cono mezclador de lodo.

Los agentes de control y los materiales se mezclan separadamente en soluciones adecuadas y se llevan a la corriente cuando la bentonita ya está en suspensión.

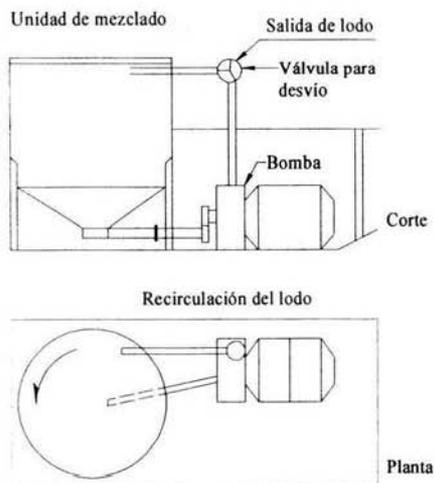


Fig. 2.2 Diagrama del equipo para mezclado de lodos.

En obra es conveniente efectuar pruebas para conocer cuantas pasadas se deben realizar para lograr la mezcla adecuada. Se miden las propiedades después de 1, 2 o 3 pasadas, se comparan, y se determina en que momento éstas ya no varían; en ese momento puede decidirse cuántas pasadas se necesitan.

2.3 Reuso y contaminación

Durante la operación de los lodos se producen cambios en sus propiedades como consecuencia de la adición de partículas provenientes de las excavaciones. Normalmente los lodos cambian de color, se vuelven más densos, y pueden perder parte de sus propiedades tixotrópicas; hacia el final de la excavación se vuelven de difícil bombeo. La causa y extensión de estos cambios en el lodo pueden variar con la operación de los mismos, principalmente se deben a la introducción del suelo excavado y de cemento.

El reuso de un lodo bentonítico obedece principalmente a un análisis económico del tratamiento necesario para regenerar sus propiedades. Este tratamiento requiere de ciertas instalaciones o aditivos.

2.4 Efecto en los lodos

2.4.1 Efecto del suelo

Las partículas del suelo aumentan la densidad del lodo y pueden afectar las propiedades de su flujo. La arcilla proveniente de formaciones naturales usualmente eleva la viscosidad y puede provocar una resistencia del gel demasiado alta. La arena causa incrementos en la viscosidad y contenidos grandes de ésta conducen a costras de baja resistencia.

El descenso en la viscosidad y en la resistencia del gel, resultado de la mezcla del lodo con arena y agua de filtración o de lluvia, puede ajustarse generalmente con la adición de bentonita o de algún agente como carboximetil celulosa (CMC).

Cuando el contenido de sólidos es excesivo, toda la suspensión deberá ser recirculada y tratada con sistemas mecánicos de dispersión para remover la arena (desarenado por sedimentación o por mallas vibratorias e hidrociclón). El factor primordial del desarenado consiste en colocar una bomba en el fondo de la excavación y al tiempo que se extrae lodo contaminado se hace entrar por la parte superior lodo puro o tratado y se establece un ciclo que se termina cuando el lodo que salga de la excavación llegue a niveles inferiores del 7% de contenido de arena. En la Fig. 2.3 se muestra con un esquema el ciclo de desarenado.



Fig. 2.3 Ciclo de desarenado.

Si se presenta un incremento de la viscosidad y en la resistencia del gel por la presencia de arcilla, el tratamiento puede comenzar con la adición de agua fresca y se completa

gradualmente mientras que el lodo es recirculado en un tanque. Si esto no resultara, pueden emplearse lodos disolventes para devolver las propiedades iniciales al fluido. En caso de que se tenga una cantidad excesiva de arcilla, puede resultar más conveniente desechar el lodo y reemplazarlo por otro nuevo.

2.4.2 Efecto de la materia orgánica

La presencia de materia orgánica en pequeñas cantidades en un lodo produce tan solo consecuencias menores y puede considerarse despreciable su efecto. Esta conclusión es válida para lodos preparados con bentonita pura, no tratada. Sin embargo, si el contenido de materia orgánica es excesivo, puede afectar seriamente las propiedades del flujo.

Debe tenerse especial cuidado cuando se trabaja con bentonitas tratadas con péptidos¹, las cuales son afectadas por la presencia de materia orgánica que produce pérdida completa de la estabilidad coloidal causando el colapso de la perforación.

2.4.3 Efecto del cemento

Esta es la contaminación más seria y la que produce problemas más frecuentes en los lodos. Se presenta cuando los iones de calcio se cambian por iones de sodio. Ocurre en mayor o menor grado durante la colocación del concreto y sus efectos son una costra más delgada y permeable así como mayor viscosidad y pérdida de lodo. El efecto del cemento en la pérdida de lodo y en la variación del pH se muestra en la Fig. 2.4.

¹ Péptido, sustancia orgánica cuyas moléculas son estructuralmente como las proteínas. Las cadenas de péptidos se pueden romper por hidrólisis del compuesto.

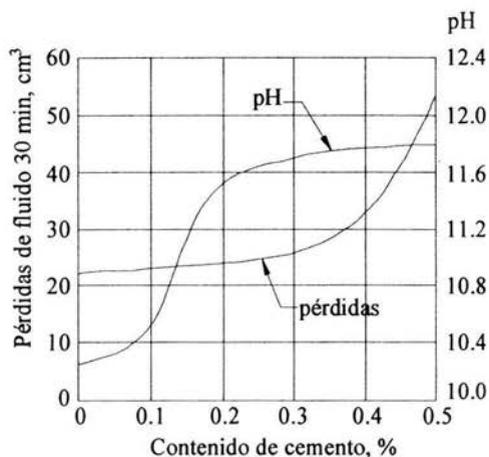


Fig. 2.4 Efecto de la contaminación del cemento en la pérdida de lodo y en el pH.

Los efectos de la contaminación del lodo con cemento se pueden evitar con el tratamiento del lodo con agentes de control antes de su uso.

2.4.4 Efecto de la sal

Al adicionar sal a la bentonita se retrasa su hidratación o no se lleva a cabo completamente. Sin embargo, en algunos casos es posible lograr una adecuada dispersión preparando lodos con agua de mar; la adición de polielectrolitos² beneficia la estabilidad coloidal y reduce el porcentaje de filtración. En estos casos, una posterior mezcla del lodo con sal no produce cambios significativos en las propiedades del fluido.

En un lodo elaborado con agua limpia, el efecto de que se encuentre agua salada o agua de filtración con contenidos de sal altos ocasiona que el lodo retenga cierta cantidad de sal. El resultado correspondiente podrá ser: un decremento en la viscosidad y en el gel, un agudo incremento en la viscosidad y en el gel debido a los efectos de floculación, o una sucesión de los dos anteriores, en ese orden.

² Polielectrolito, substancia que conduce corriente eléctrica como resultado de una disociación en iones cargados positiva y negativamente. Los más comunes son ácidos, bases y sales, los cuales se ionizan cuando se disuelven con agua o alcohol.

2.5 Tiempo de reposo

Las propiedades físicas de un lodo bentonítico mejoran si antes de entrar en operación se permite que permanezca en reposo en un tanque durante un período comprendido entre 8 y 24 horas como mínimo. Con esto se logra que la viscosidad plástica y el punto de fluencia aumenten y que el agua libre disminuya permaneciendo constante el espesor de la costra. En ensayos de viscosidad para diversos tiempos de hidratación, con diferentes contenidos de bentonita, de la marca comercial Perfobent, se llegó a la conclusión de que la parte del aumento en la viscosidad se desarrolla durante las primeras cinco horas de reposo del lodo (añejamiento). Este resultado reviste de gran importancia, pues puede conducir a reducciones significativas en los tiempos previos al empleo del lodo en la excavación, con lo cual se pueden reducir costos. En la Fig. 2.5 se presentan los resultados de estos ensayos.

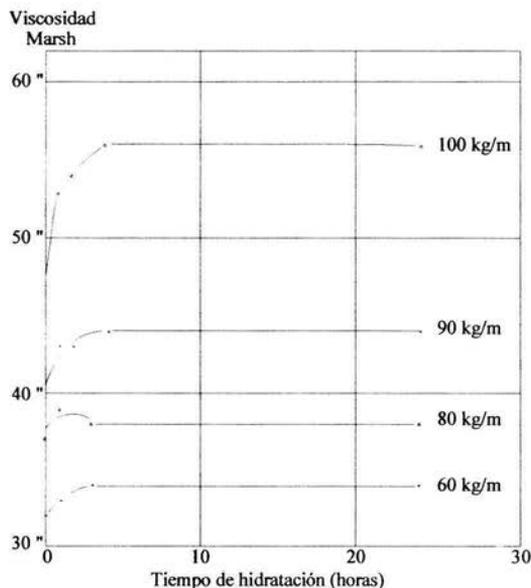


Fig. 2.5 Índice de viscosidad en función del tiempo de hidratación de diferentes contenidos de bentonita.

2.6 Aditivos y fibras

Los aditivos, principalmente se usan para facilitar la hidratación de la bentonita y estabilizar el lodo para evitar que se sedimente. Los principales son:

- CarboMetil Celulosa (CMC), el cual aumenta la viscosidad e incrementa la costra en la pared de la perforación. Se fabrica en polvo con calidad cruda.
- Sosa cáustica. Reduce la dureza en el agua y facilita la hidratación de la bentonita.

Las fibras, se utilizan para aumentar el espesor de la costra y evitar fugas del fluido. Pueden ser artificiales de poliéster, con diferentes tamaños y diámetros (2 a 5 cm y 0.1 a 0.5 mm, respectivamente), más fáciles de usar, a las naturales, como aserrín, paja, fibras de coco, cascarilla de arroz o cualquier material parecido que pueda ser bombeado con el equipo disponible.

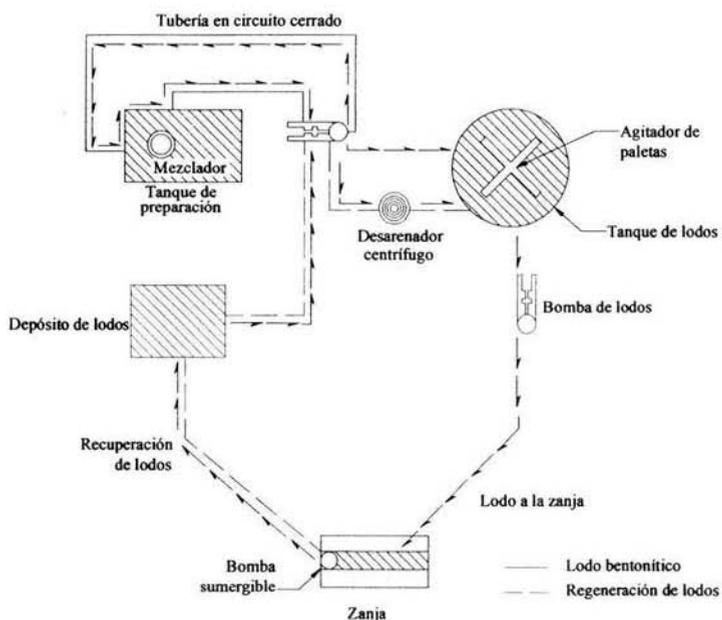


Fig. 2.6 Instalación para la elaboración de lodos.

2.7 Principales problemas y tratamiento

En la Tabla 2.5 se resumen los principales problemas que se presentan en el empleo de lodos y los posibles tratamientos. Por otro lado, en la Fig. 2.6 se presenta un diagrama de instalación para la elaboración de lodos.

Tabla 2.5 Problemas, control y tratamiento en lodos.

PROBLEMA	CONTROL Y TRATAMIENTO
Incrementar viscosidad y gel en agua fresca	Adicionar bentonita, CMC, o ambos
Reducir viscosidad y gel cuando tenga un material coloidal adecuado	Adicionar agua lentamente o tratar el lodo con disolventes
Reducir la viscosidad y el gel cuando la disolución no es aconsejable debido a la presencia de un material coloidal inadecuado o reducción de peso	Adicionar disolventes si la viscosidad baja apreciablemente. Si se presenta un sobretatamiento ajustar usando CMC
Reducir la viscosidad y el gel debidos a un contenido alto de sólidos no coloidales	Si los sólidos no están completamente dispersados, usar separación mecánica y adicionar agua lentamente y disolventes
Incrementar la viscosidad y gel debido a un contenido alto de sólidos no coloidales (arena)	Remover los sólidos mediante separación mecánica y adicionar bentonita o CMC
Reducir la densidad	Recircular el fluido para remover los sólidos mediante separación mecánica o permitiendo que se asienten. No adicionar agua, pero ajustar las propiedades del flujo (si es necesario) antes de que la densidad se reduzca
Reducir la filtración en el suelo y el espesor de la costra, es decir, reducir la pérdida del fluido	Adicionar bentonita y CMC si la viscosidad se torna demasiado alta tratar con FLC u otros disolventes
Manejo de grandes volúmenes de arena en el lodo o detritus	Usar dispersión mecánica. Evitar adicionar agua o productos químicos
Floculación de la sal debido a contaminación por agua de mar	Adicionar FCL pero tener un control cuidadoso del lodo
Floculación de sal en perforaciones profundas o formaciones salinas	Estabilizar la solución bajo la acción protectora de CMC o usar disolventes
Perforaciones en formaciones erráticas	Seleccionar el lodo base de acuerdo con la condición de la formación más crítica y efectuar revisiones y ajustes periódicos
Contaminación con cemento	Adicionar FCL u otro agente disolvente, si la restauración no se lleva a cabo desechar el lodo. Usar bentonitas pretratadas
Contaminación con materia orgánica	Evitar bentonitas que usen péptidos. Usar bentonita natural y un monitor para nivel de lodo

CMC, CarboxiMetil Celulosa

FCL, Lignosulfato de FerroCromo

3. PROCESO CONSTRUCTIVO DE PILAS COLADAS BAJO AGUA Y USO DE LOS LODOS

3.1 Introducción

Las pilas son elementos de cimentación profunda con secciones mayores a 80 cm, los cuales transmiten al subsuelo las cargas de una estructura, con el fin de lograr que el conjunto sea seguro, funcional y económico.

Las pilas se construyen directamente en el subsuelo, por lo que se les conoce como elementos fabricados *in situ*. Este tipo de cimentación se usa cuando el uso de pilotes no resulta económico debido a cargas elevadas o existen restricciones en el uso de aquellos, como pueden ser las vibraciones durante el hincado, entre otras.

La selección de los procedimientos constructivos depende de las condiciones del subsuelo. De ahí la importancia de los estudios preliminares y de detalle en cuanto Geotecnia se refiere. El proceso constructivo de pilas coladas bajo agua es un caso especial de construcción de cimientos profundos.

Tanto los equipos como los métodos constructivos seleccionados deben garantizar la localización precisa de las perforaciones, su verticalidad, que sean limpias, que se tengan las dimensiones de proyecto en toda su longitud y que el suelo adyacente no se altere.

3.2 Pilas coladas bajo agua

Generalmente las pilas se fabrican con concreto reforzado, aunque pueden ser únicamente de concreto simple, si los esfuerzos actuantes son sólo de compresión. Se puede usar acero en una parte de la pila (aquella sometida a esfuerzos de tensión). En México es común construir pilas con concreto y acero en toda su longitud. Las pilas coladas *in situ* se

consideran como cimentaciones sin desplazamiento, porque se retira una cantidad de material igual a la que se rellenará con concreto.

Existen distintos métodos de construcción de pilas, entre los cuales se encuentran (SMMS-ADSC, 1976):

- Método seco
- Método de ademe
- Método de lodo desplazado

En pilas coladas en presencia de agua, pueden usarse los dos últimos métodos.

Las pilas coladas *in situ* guardan ciertas ventajas con respecto a los pilotes, entre otras:

- ✓ El área necesaria para su construcción es menor, ya que no requieren planta de fabricación y lugar de almacenamiento.
- ✓ No sufren daños estructurales porque no están sujetas a maniobras.
- ✓ No contaminan por ruido.
- ✓ La capacidad de carga es mayor en pilas, aunque debe considerarse el efecto de escala.
- ✓ Su fabricación es monolítica; no tiene juntas como en los pilotes largos.
- ✓ Se pueden construir en cualquier suelo, incluso con rellenos; gravas y boleos, que impiden y dificultan el hincado en el caso de pilotes.

Los pilotes colados en el lugar, no son recomendables debido a su reducido diámetro que no asegura su buena construcción.

3.3 Proceso constructivo

El proceso constructivo de pilas consiste en hacer una perforación en el suelo con algún equipo adecuado, colocar en ella acero de refuerzo y luego colocar el concreto.

En la elección del método constructivo óptimo influyen la estratigrafía de los suelos, tipo y longitud de la perforación, la presencia de agua subterránea. Estas condiciones, aunadas a las propiedades tanto del subsuelo (permeabilidad, resistencia y deformabilidad) como del agua (profundidad, calidad y composición) determinarán el diseño geotécnico y estructural de la pila y el procedimiento constructivo, con énfasis en el ademe, lodos o bombeo, así como el método para la colocación del concreto y acero.

Cuando en el subsuelo existe nivel freático por arriba de la profundidad de desplante de las pilas y existen suelos inestables (arenosos sueltos), en las paredes y en el fondo, puede decidirse por el método de lodo desplazado, usando como fluido un lodo bentonítico. En la Fig. 3.1 se muestra un árbol de decisiones para determinar el método de construcción apropiado.

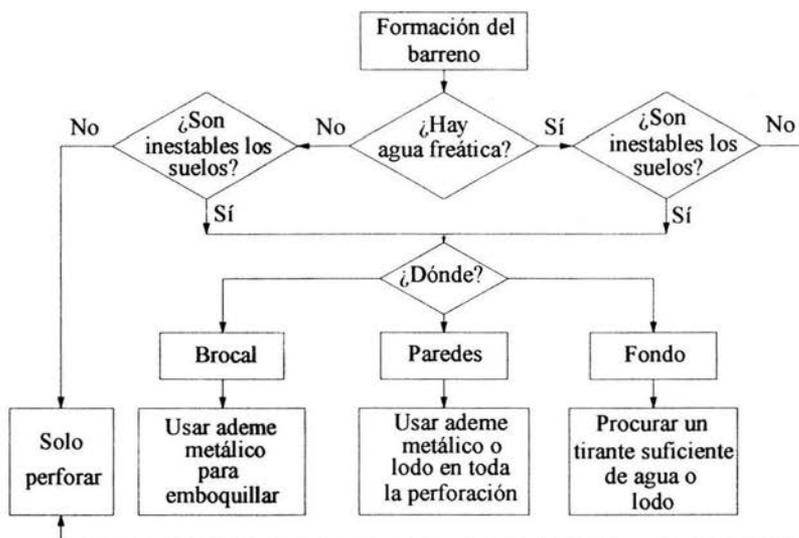


Fig. 3.1 Árbol de decisiones.

El proceso constructivo con lodos bentoníticos para soportar las paredes de las perforaciones, es el siguiente:

- a) Perforar e introducir a medida que se avanza el lodo bentonítico.

- b) Mantener el nivel de lodo cerca de la superficie del terreno (brocal).
- c) Perforar hasta la profundidad de desplante de la pila.
- d) Controlar las propiedades del lodo.
- e) Limpiar el fondo.
- f) Revisar las propiedades del lodo antes de colocar el acero y concreto
- g) Colocar el acero de refuerzo, cuidando el recubrimiento.
- h) Colocar el concreto, evitando la segregación.
- i) Verificar la calidad.

En la siguiente secuencia de figuras (Figs. 3.2 a 3.5), se ilustra el proceso constructivo con lodo desplazado.

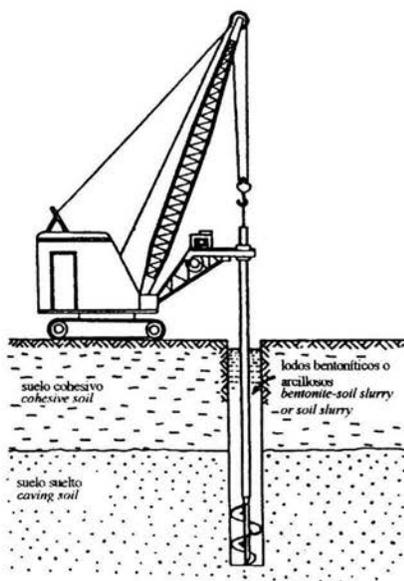


Fig. 3.2 Perforación con lodo.

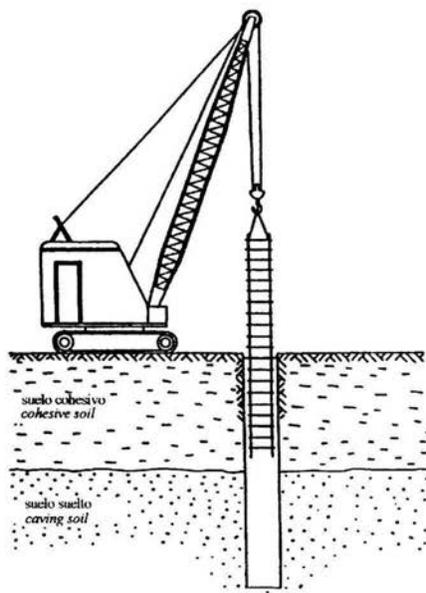


Fig. 3.3 Colocación del acero.

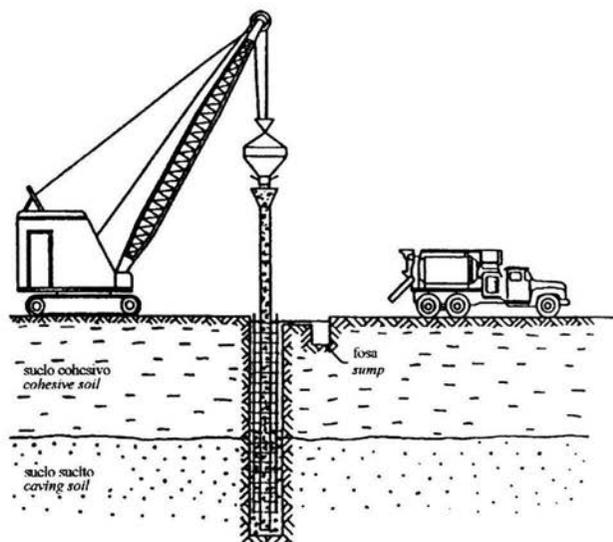


Fig. 3.4 Colocación del concreto.

3.4 Equipo usado

La selección de los equipos y herramientas para la construcción adecuada de pilas en estas condiciones, depende en primera instancia de los estudios geotécnicos.

El equipo usado en la construcción de pilas bajo agua puede clasificarse como sigue:

1. Grúas
2. Perforadoras
3. Almejas e hidrofresas
4. Desarenadores

3.4.1 Grúas

Las grúas son máquinas que permiten el manejo de objetos pesados, y pueden ser fijas o móviles. En la construcción de pilas se utilizan generalmente grúas móviles de pluma

rígida, ya sea para montar equipo especializado o ejecutar alguna maniobra. Las grúas móviles tienen orugas o neumáticos para facilitar su movimiento. La elección del tipo de sistema depende de las características de la zona de trabajo y del clima donde se construye, en especial de las lluvias. En la Fig. 3.5 se muestra el esquema de una grúa montada en orugas y en la Tabla 3.1 una lista de grúas usadas en la construcción de cimentaciones profundas en México.

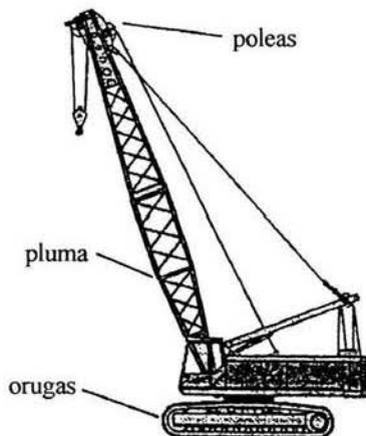


Fig. 3.5 Grúa montada en orugas.

Tabla 3.1 Grúas utilizadas en la construcción de cimentaciones profundas, (SMMS, 2001)

Marca	Modelo	Capacidad, t	Peso, t
American	599 C	36.29	-
	7225 A	77.25	-
	9270	136.08	-
Bauer	BS 640	40	40
	BS 680	80	80
	BS 6180	180	160
Bucyrus Erie	22 B	12	19.3
	54 B	-	-
	61 B	66.50	67.30
Casagrande	C 20	20	22
	C 50	50	48.65
	C 90	95	83.80
Link-Belt	LS 68	13.61	17.67
	LS 118	54.43	54.70
	LS 208-H	68.04	58.97
Liebherr	HS 833 HD	40	39.60
	HS 853 HD	80	81.20
	HS 883 HD	120	109.40
Manitowoc	222	90.70	74.52
	777 S-2	160	150.14
	4100 WS-3	217.70	218.64
P&H	550	50	-
	670 WCL	70	-
	5100	100	78.37

Cuando se trata de equipo de perforación, se usan grúas de 45 a 80 t de capacidad nominal, con plumas rígidas de 18.3 m (60 ft) de largo (SMMS, 2001). Para maniobras se usan grúas de al menos 15 t de capacidad nominal.

3.4.2 Perforadoras

Las perforadoras son máquinas que se emplean para hacer la perforación o barreno de la pila. Existen dos formas de hacer un barreno: por rotación y por percusión.

Las perforadoras rotatorias transmiten la torsión por medio de una barra, en cuya punta se coloca una herramienta de avance que se hace girar con algún mecanismo.

Las perforaciones con equipo rotatorio pueden ser:

- Con barretón o *kelly*, el cual puede ser de una pieza o telescópico. Pueden estar montadas en grúas sobre orugas o en camión. En la Fig. 3.6 se muestra un ejemplo de *kelly* montado en grúa con orugas.

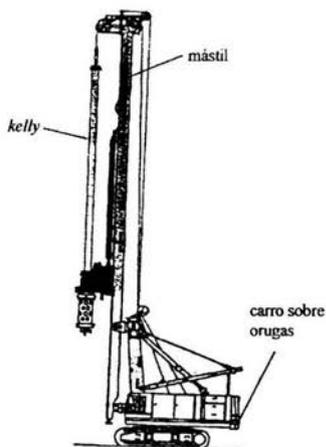


Fig. 3.6 Kelly montado en grúa con orugas.

- Con hélice continua montada en grúas sobre orugas. La hélice tiene la ventaja que el suelo se extrae de manera continua (Fig. 3.7). Se utiliza principalmente en suelos duros.

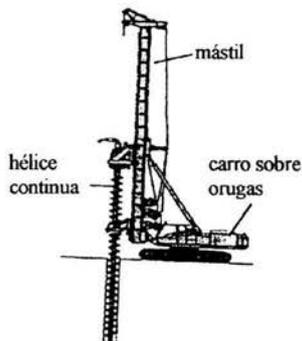


Fig. 3.7 Hélice continua.

- Circulación inversa (*air-lift*). Estos equipos pueden perforar profundidades mayores a 100 m. Tienen el inconveniente de que con este sistema empieza a succionar con una carga hidráulica de 10 m y alcanza niveles adecuados a partir de 15 m.

Las perforadoras por percusión transmiten impactos al material por medio de una herramienta de corte o avance llamado martillo de fondo. Se usa principalmente en rocas ya que en suelos se reduce su eficiencia (SMMS, 2001). Con esta técnica se pueden perforar diámetros hasta de 100 cm (40 in).

3.4.3 Almejas e hidrofresas

En la construcción se pueden necesitar pilas con secciones diferentes a la circular, ya sea rectangular, oblonga, o incluso alguna combinación de ambas. Para este efecto se utilizan dos equipos: almejas hidráulicas guiadas para secciones oblongas e hidrofresas para secciones rectangulares.

Las almejas utilizan un sistema hidráulico y una barra *kelly* rígida, de una pieza o telescópica, mientras que la hidrofresa usa el principio de circulación inversa, y puede perforar hasta 100 m de profundidad. En las Figs. 3.8 y 3.9 se muestran los equipos mencionados.

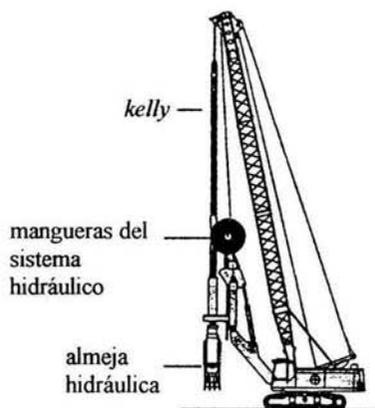


Fig. 3.8 Almeja hidráulica guiada.



Fig. 3.9 Hidrofresa.

3.4.4 Desarenadores

Estos equipos son necesarios cuando se utilizan fluidos de perforación. Se usan para remover las partículas suspendidas en el lodo. Se componen de una malla vibratoria que retiene partículas mayores de 5 mm (0.2 in) e hidrociclones para las partículas finas. La Fig. 3.10 muestra un esquema de un desarenador y en la Tabla 3.2 se presenta una lista de desarenadores para lodos bentoníticos.

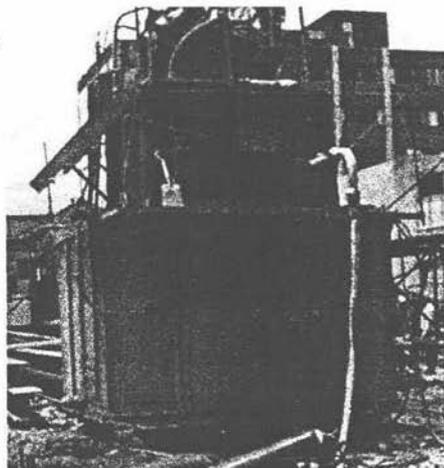
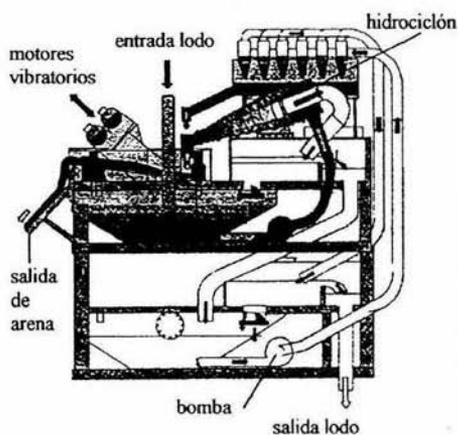


Fig. 3.10 Desarenador.

Tabla 3.2 Desarenadores para lodos bentoníticos, (SMMS, 2001).

Marca	Modelo	Capacidad m ³ /h	Potencia kW
Bauer	BE-50	50	23
	BE-100	100	26
	BE-150	150	39
Casagrande	D6	60	15
	D12	120	25
Caviem	Lyon	40	-
	Blayais	100	-
	SB-16	200	-
Soilmec	BE-50	50	-
	BE-120	120	-

3.5 Perforación

Una vez definido el método constructivo y el equipo adecuado para la construcción de la pila, se procede a la perforación del barreno.

Las etapas que se llevan a cabo en la perforación son: a) aflojar el suelo, b) retirar o remover el material perforado y c) soportar la perforación.

El método constructivo debe contemplar estas etapas. En ellas se pueden usar distintos equipos y técnicas de construcción. También debe tomarse en cuenta el tipo de suelo a perforar, la geometría de la perforación, las condiciones estratigráficas e hidráulicas, así como las condiciones ambientales en el sitio, en especial el ruido.

Aflojar el suelo. Existen distintas técnicas para aflojar el suelo dependiendo de la compacidad o consistencia del suelo o dureza de la roca. Estas técnicas son: corte, "ripeado", percusión y presión vertical estática. En la Tabla 3.3 se indican las herramientas usadas en estas técnicas.

Tabla 3.3 Técnicas para aflojar el suelo, (SMMS, 2001).

Corte		"Ripeado"		Percusión	
Elemento utilizado					
Almeja de gajos	Dientes planos	Dientes de punta de bala	Dientes de carburo de tungsteno	Trépano	Martillo de fondo
Herramienta					
-	Botes, brocas	-	Botes, brocas, bote corona	-	-

- a) *Corte*. Para aflojar el suelo mediante corte se usan las almejas de gajos y dientes planos o las cuchillas en botes o brocas. La almeja de gajos (Fig. 3.11) penetra el suelo por caída libre, los gajos se cierran por gravedad en forma de semiesfera reteniendo el material excavado. Las cuchillas y dientes planos se usan en herramientas como botes o brocas en perforación rotatoria; el tamaño de los dientes depende del tipo de suelo en el que se va a perforar. En SMMS, 2001 existen suficientes datos sobre tipos dientes planos y portadientes, además del tipo de suelo donde se puede usar.

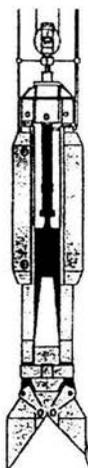


Fig. 3.11 Almeja de gajos.

- b) *Ripeado*. El ripeado se lleva a cabo en suelos duros o roca, con dientes de punta de bala o con aplicaciones de carbono de tungsteno en brocas, botes o botes corona. Es usual que cuando el suelo es muy duro, primero se corta un corazón del material con un bote corona (Fig. 3.12). Esto resulta más eficiente cuando las brocas tardan mucho y se gastan más. Para extraer el material perforado (corazones) se puede recuperar recirculando el fluido de perforación, con una herramienta en forma de cuña (*core-lift*), con una almeja (si se dispone de una) o si la perforación no es muy profunda y está seca, un obrero puede bajar y colocar un cable en el corazón para extraerlo.

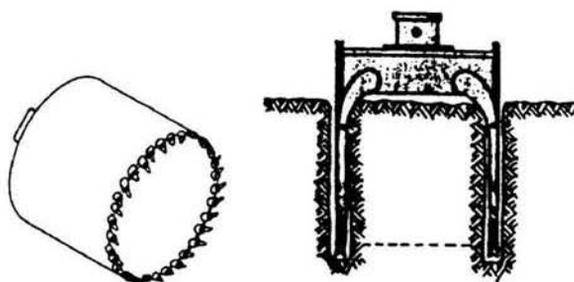


Fig. 3.12 Bote corona.

- c) *Percusión*. En el corte por percusión se aplica una carga puntual alta que pulveriza el suelo en el punto y transmite esfuerzos alrededor, fracturando la roca. Para aplicar esta carga se utilizan trépanos y martillos neumáticos de fondo. Los trépanos (hasta de 15 t) se montan en una grúa y se dejan caer de una altura (hasta 3 m) sobre la roca, suelos duros o boleos. El material excavado se retira con un bote o almeja de gajos. Por su parte, los martillos neumáticos de fondo son de pistón y se hincan con aire comprimido, montados en perforadoras rotatorias. En la superficie de corte tienen puntas de carburo de tungsteno. El diámetro de la perforación está limitado a 80 cm, dado que el consumo de aire comprimido aumenta proporcionalmente con el diámetro.
- d) *Presión vertical estática*. Usa rodillos (brocas tricónicas) que tienen puntas de carburo de tungsteno, las cuales giran con una presión vertical en el fondo del

barreno. Se puede perforar cualquier diámetro. La limitación radica en la cantidad de sobre carga requerida. Se han hecho pilas de 2.5 m de forma satisfactoria. La carga requerida por 100 m de ancho (*sic*)¹ de rodillo, varía entre 3 y 5 t. Cuando se use esta técnica es necesario el uso de lodos de perforación para evitar que la broca se caliente y se desgaste más rápido, y para remover el material excavado.

Remoción del material excavado. La remoción del material excavado puede efectuarse de manera intermitente o continua.

Cuando se extrae el material de forma intermitente se usa una herramienta, como puede ser una almeja, que se introduce al barreno para extraer el material, el cual se deposita junto a la perforación y nuevamente se introduce la herramienta. Esto puede resultar un mecanismo muy lento por el volumen de material que se extrae. Para subsanar esta desventaja se han desarrollado sistemas de malacates de alta velocidad.

Existen herramientas que combinan las funciones de aflojar el suelo y de remoción, como las almejas bivalvas, mecánicas o hidráulicas, las cuales cuentan con un peso muerto. Estas herramientas se dejan caer en el barreno y funcionan como un trépano. Al sacar la herramienta remueve el material con una almeja de gajos. Para resistir los impactos, los dientes de la almeja son más duros.

La remoción también puede hacerse con herramientas de corte como los botes que se introducen para perforar pero que también sirven para transportar el suelo excavado a la superficie.

Cuando las perforaciones utilizan algún fluido para soportar las paredes, entonces se puede usar un bote que hace las veces de perforador, cortador y transportador. Cuando el bote se llena, se extrae con el material excavado. Estos botes usualmente tienen un mecanismo en la tapa de fondo para extraer el material (Fig. 3.13).

¹ SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS), *Manual de Cimentaciones Profundas*, SMMS, México, 2001, p. 173.

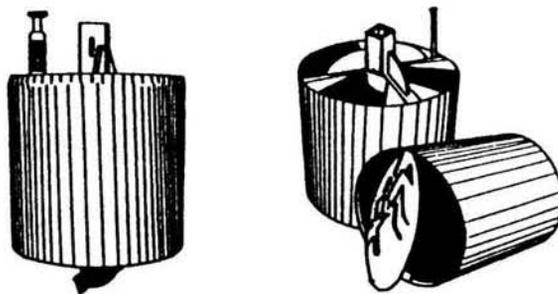


Fig. 3.13 Bote para perforación.

Cuando la remoción del material se hace de forma continua, el lodo se mezcla con el suelo perforado y por medio de recirculación del fluido, el suelo se extrae a la superficie de forma constante.

Existen tres tipos de sistemas de remoción continua de suelo excavado:

- Hélice continua (ademe espiral)
- Flujo directo
- Flujo indirecto

En el método de flujo directo sólo se utiliza agua a presión como fluido para hacer que el material perforado salga a la superficie. Mientras que el sistema de hélice continua, también llamada ademe espiral, no usa ningún fluido de perforación, ya que la misma tubería del ademe sirve para transportar el material y para realizar el colado de la pila.

La parte que compete al presente trabajo es la de flujo indirecto, donde se puede utilizar un lodo bentonítico. Para lograr que el lodo bentonítico circule en la perforación se puede usar una bomba de succión, bomba de chifloneo, circulación inversa o el sistema *air-lift*.

En la Fig. 3.14 se muestra el sistema con bomba de succión la cual crea una succión que eleva la mezcla fluido-suelo por la tubería, hasta depositarla ya sea en un desarenador o un tanque de sedimentación. En este sistema la diferencia de niveles entre la bomba y el fluido no debe ser mayor de 6 m (19.8 ft).

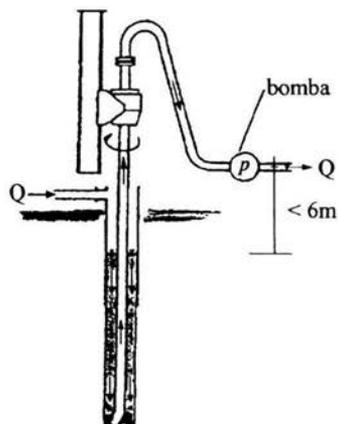


Fig. 3.14 Bomba de succión.

El sistema con bomba de chifloneo usa lodos bentoníticos a presión para crear un vacío bajo la boquilla de la tubería (Fig. 3.15) y entonces la mezcla se succiona desde el fondo del barreno.

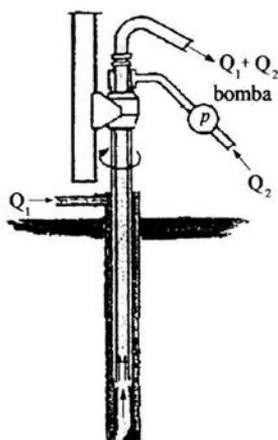


Fig. 3.15 Bomba de chifloneo.

La circulación inversa es un sistema en el cual se inyecta el lodo bentonítico a presión en el espacio entre el suelo y la tubería. Así, la mezcla fluido-suelo empuja a través de la

tubería de perforación. El inconveniente del procedimiento radica en lograr un buen sello en la parte superior del barreno como se muestra en la Fig. 3.16.

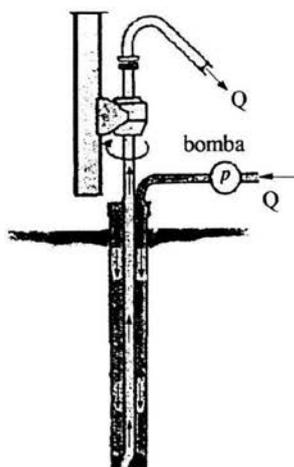


Fig. 3.16 Circulación inversa.

El sistema *air-lift* introduce aire en la perforación y logra una mezcla aire-agua. Esta mezcla tiene menor gravedad específica que el fluido circundante y se crea un gradiente de presión, lo que provoca un efecto de succión en el extremo de la tubería (Fig. 3.17). La limitación de este sistema es que comienza a succionar a partir de los 10 m de carga hidráulica y alcanza niveles satisfactorios a partir de los 15 m.

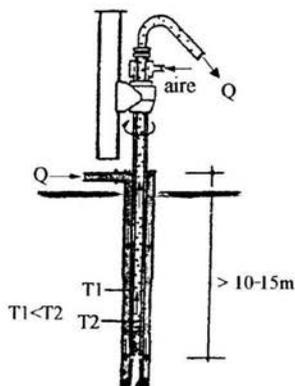


Fig. 3.17 Sistema *air-lift*.

La velocidad de extracción depende del diámetro de la tubería y de la cantidad de aire inyectado, mientras que la profundidad a la que se puede usar depende de la presión del aire.

De lo anterior se confirma la necesidad de hacer una exploración detallada del subsuelo para detectar los distintos estratos y planear las herramientas necesarias para cada condición de estratigrafía presente.

Soporte temporal. En el caso de pilas coladas bajo agua en suelos arenosos o con estratos de este tipo, que pueden producir caídos en la perforación por la presencia de agua o por propiedades mecánicas desfavorables, el soporte más usado es el lodo benonítico.

En años recientes se han desarrollado fluidos sintéticos poliméricos que sustituyen a los lodos bentoníticos. En nuestro país su uso es aún escaso principalmente por su costo comparado con el del lodo.

El lodo bentonítico más usado en México, debido a su bajo costo y fácil preparación, está constituido por agua dulce, con menos de 1 % de cloruro de sodio y menos de 120 ppm de sales de calcio, en suspensión, mezclado con bentonita sódica.

Para tener una perforación estable se debe mantener el nivel de lodo bentonítico muy cercano a la superficie del terreno, para así aplicar la máxima carga hidráulica sobre las paredes y fondo de la excavación y evitar posibles caídos y subpresiones.

Ampliación o campana. En la construcción de pilas es común construir ampliaciones o campanas, para reducir la sección de la pila y aumentar la capacidad de carga. Al respecto las Normas Técnicas de Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones mencionan que “no deben construirse campanas bajo agua, ya que los sistemas empleados para esta operación no garantizan la colocación del concreto sano en esta zona que es donde se desarrollará la capacidad de carga”.

3.5.1 Sistema de lodos

El sistema de lodos incluye las siguientes fases: almacenaje, mezclado y recirculación. A continuación se describe cada una de ellas.

El almacenaje de la bentonita debe hacerse en un lugar seco, no sujeto a humedad, ya sea un almacén construido para este fin, un silo, o si el clima lo permite, al aire libre pero cubierto con alguna lona. En la Fig. 3.18a se muestran estas tres opciones de almacenaje.

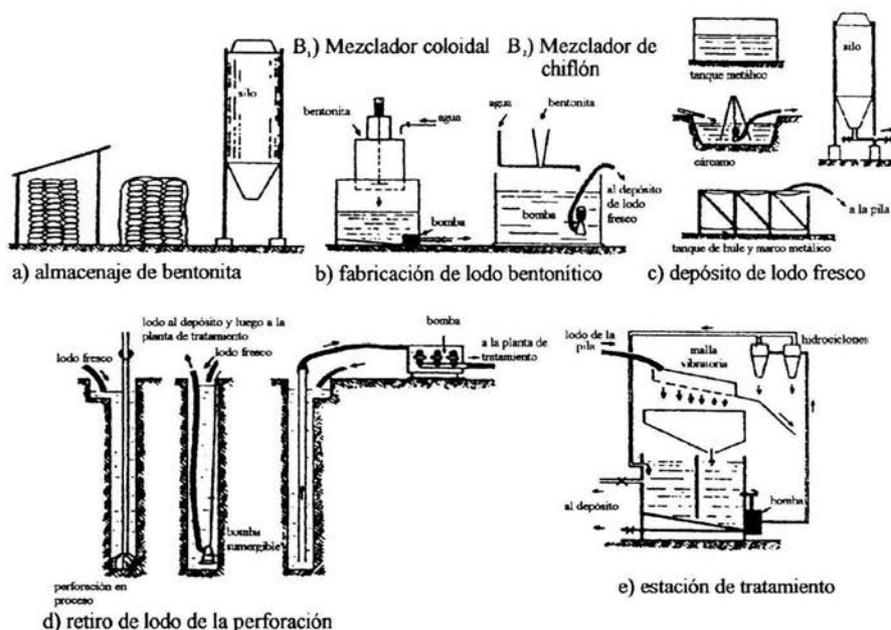


Fig. 3.18 Planta de lodos tipo (LCPC, 1986).

Enseguida se mezcla el material con agua. El objetivo del mezclado es obtener la mayor dispersión de las partículas de bentonita evitando la formación de grumos. Para lo anterior se usan dos sistemas de mezclado: coloidal (Fig. 3.18b₂ y 19) y de chiflón (Fig. 3.18b₁ y 19). En el primero se adiciona el agua y la bentonita y se mezclan de forma mecánica, mientras que en el segundo se introduce agua a presión en tanto se introduce bentonita por

un embudo. Estos sistemas incluyen el uso de una o varias bombas para la recirculación de la mezcla antes de pasar a los depósitos. El tiempo de mezclado con estos sistemas es de 3 a 10 minutos, para lograr una buena hidratación inicial.

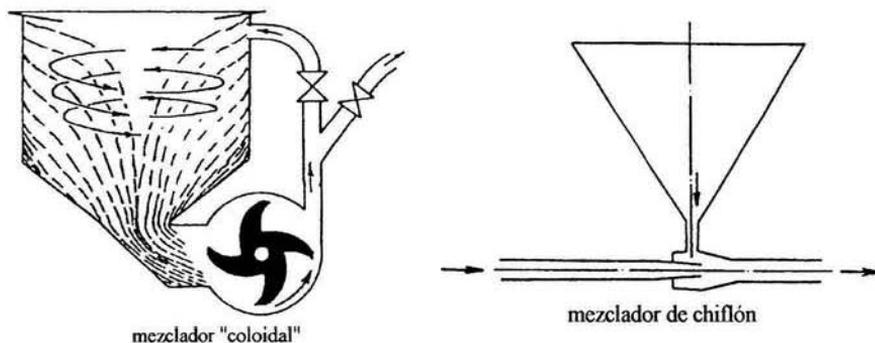
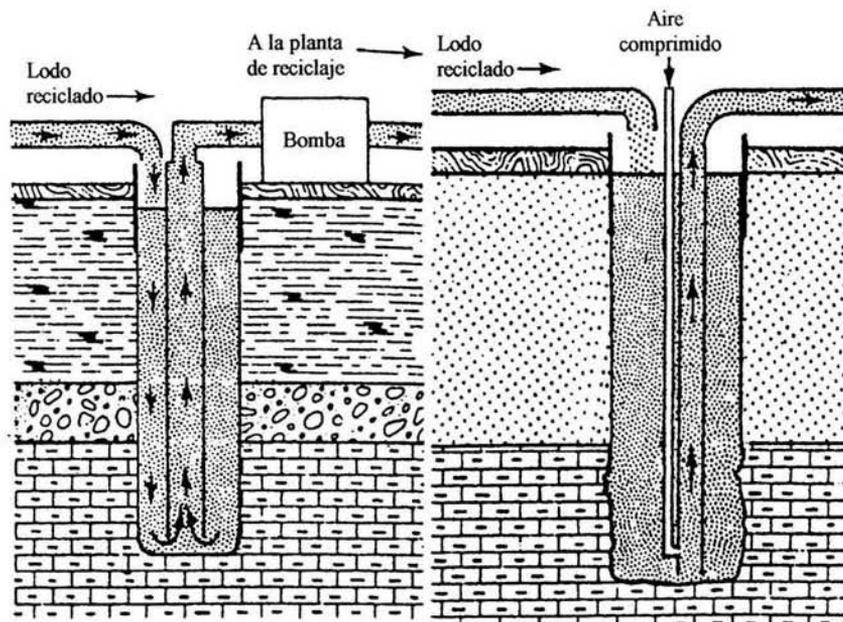


Fig. 3.19 Tipos de mezcladores de bentonita.

Una vez fabricado el lodo, se debe dejar reposar 24 hr para que la mezcla se hidrate completamente, su viscosidad plástica aumente y el agua libre disminuya. El tiempo de reposo del lodo se puede llevar a cabo en tanques metálicos, silos, cárcamos o tanques de hule, como los mostrados en la Fig. 3.18c.

Una vez comenzada la perforación, se introduce el lodo para estabilizar. Cuando el lodo se contamina con el suelo y es necesario cambiarlo, se extrae con una bomba sumergible (Fig. 3.18d), una en superficie o introduciendo aire comprimido (Figs. 3.20). El lodo extraído se envía a una estación de tratamiento o desarenador, que consiste en un sistema de mallas vibratorias, hidrociclones y tanques sedimentadores (Fig. 3.18e). En las mallas se retienen las partículas mayores de 5 mm y en los hidrociclones las partículas finas en suspensión.



Figs. 3.20 Cambio de lodo bentonítico (LCPC, 1986).

Cuando el lodo se contamina con arcilla, la regeneración del lodo puede hacerse adicionando agua para diluir la mezcla. En ocasiones se pueden adicionar aditivos que mejoran las propiedades. El principal contaminante del lodo es la arena. Para lograr la separación de esta, se recurre a distintas técnicas, como pueden ser tanques sedimentadores, donde se coloca la mezcla y se deja reposar el tiempo suficiente para que ocurra la sedimentación de la arena. También se recurre al uso de mallas vibratorias de diferentes diámetros, por donde se hace pasar el lodo, reteniendo las partículas mayores a la malla; al final el lodo se recupera en un tanque sedimentador. Otra técnica que se usa en conjunto con las mallas, consiste en el uso de hidrociclones, los cuales separan la fracción fina que no ha sido separada en las mallas. En la Fig. 3.21 se presenta el esquema de un hidrociclón.

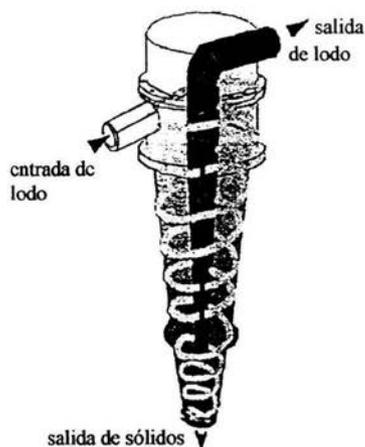


Fig. 3.21 Esquema de un hidrociclón.

3.5.2 Control de lodos durante la perforación

El control de las propiedades de los lodos debe hacerse para garantizar la estabilidad de la perforación, así como para que el fluido mantenga en suspensión el material excavado.

Si las propiedades se encuentran fuera de los rangos de valores recomendados, entonces será necesario cambiarlo por lodo fresco. En la Tabla 3.4 se presentan rangos de valores recomendados para propiedades de lodos bentoníticos, y del equipo de medición utilizado.

Tabla 3.4 Rangos de valores para lodos bentoníticos (Velázquez Vadillo, A.).

Propiedad	Equipo de medición	Rango de valores
Densidad	Balanza de lodos	1.02 a 1.04 g/cm ³
Viscosidad Marsh	Cono de Marsh	30 a 55 segundos
Viscosidad plástica	Viscosímetro rotacional	10 a 25 centipoises
Contenido de arena	Malla #200	Menor a 3%
pH	Papel indicador	7 a 10

3.5.3 Especificaciones de lodos

Para tener un control adecuado de las propiedades de los lodos de perforación deben hacerse pruebas estandarizadas para que los resultados puedan ser aceptados. Algunas normas para estas pruebas son las siguientes, (SMMS, 2001):

Norma	Descripción
ASTM D 4380-93e:	Test methods for density of bentonitic slurries.
ASTM D 4381-93e:	Test methods for sand content by volume of bentonítico slurries.
API-RP13 B-1-97:	Standard procedures for field testing water-bases drilling fluids.
API 13 I-95:	Standard procedure for laboratory testing drilling fluid.
ACI 336.1:	Reference specifications for the construction of drilled piers
ACI 336.1 R-98:	Commentary to ACI 336.1

3.6 Acero y concreto

3.6.1 Acero

Cuando las pilas están sujetas a fuerzas de tensión, fuerzas laterales y cargas excéntricas, como es común, se necesita diseñar un refuerzo que resista estas sollicitaciones. En la Fig. 3.22 se muestran los principales elementos de una armadura de acero.

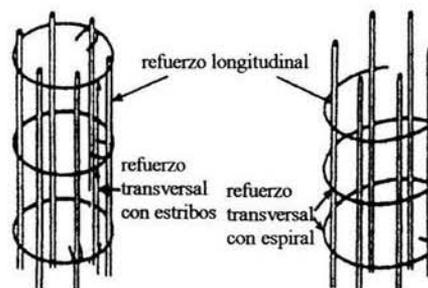


Fig. 3.22 Acero de refuerzo.

Para la habilitación del acero en obra se requiere espacio donde se pueda armar la longitud total de la pila o la necesaria a reforzar. El armado deberá ser lo suficientemente fuerte para resistir los esfuerzos inducidos durante las maniobras de colocación, pero no debe ser tan denso que impida el libre flujo del concreto.

En la implementación del acero de refuerzo se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Traslapes.
- Ganchos y dobleces.
- Recubrimiento y espaciamiento.
- Manejo y colocación.

Las pilas por su longitud requieren de refuerzo de mayor longitud a las de varillas comerciales, por lo que se debe recurrir a los traslapes o empalmes para lograr la longitud de proyecto. El principal punto es que los traslapes no concurren en la misma sección transversal.

Cuando el esfuerzo de adherencia no se puede lograr con la longitud de varilla con que se cuenta, se recurre a realizar dobleces o ganchos en las varillas. En el fondo de la excavación no deben hacerse dobleces para evitar que esto sea un obstáculo para el flujo del concreto, con el consecuente riesgo de concreto contaminado con lodo en la base de la pila.

Para proteger al acero de la corrosión, que puede poner en peligro la seguridad e integridad de la estructura, se deja un espacio entre la cara exterior del concreto y el acero. A este espacio se le denomina recubrimiento. Para lograr dicho recubrimiento en las pilas, se hace uso de guías de acero soldadas al armado o espaciadores de plástico o concreto.

Otro aspecto en el cual se debe tener especial cuidado es el manejo del acero al introducirlo al barreno. Se recomienda la construcción de armaduras para evitar deformaciones y esfuerzos adicionales durante el izaje y maniobras de colocación. En la Fig. 3.23 se muestra el izaje recomendado e incorrecto de una armadura.

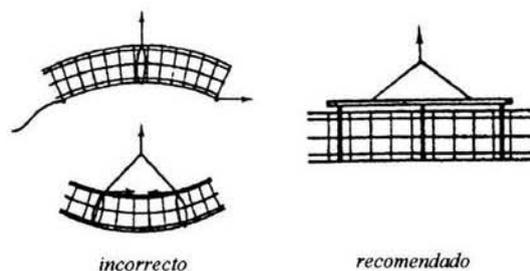


Fig. 3.23 Izaje de armadura de acero.

3.6.2 Concreto

El concreto es de especial importancia en la integridad de la pila. Dada la dificultad del colado bajo agua, el concreto debe ser trabajable, para poder pasar entre el acero de refuerzo, pero lo suficientemente denso para desplazar al lodo bentonítico.

Es importante que el tiempo entre la colocación del acero y el colado del concreto no exceda de cuatro horas, ya que si se rebasa el tiempo, se corre el riesgo de perder algo de adherencia con el concreto por la formación de una eventual membrana de lodo en el acero.

Las resistencias de los concretos para pilas van de 250 a 400 kg/cm². El tamaño máximo del agregado no debe ser mayor de 2/3 parte de la abertura mínima entre el acero de refuerzo o del espesor del recubrimiento, rigiendo el valor menor. Según la *Federation of Piling Specialist* (SMMS, 2001), cuando se coloca concreto bajo agua o lodo bentonítico la mezcla adecuada es la del tipo C, con revenimiento mayor a 17.5 cm, colocada con el sistema Tremie.

El sistema Tremie consiste en una serie de tubos de acero de longitud entre 1 y 6 m, con uniones roscadas, herméticas, sin coples que obstruyan su movimiento dentro de la perforación, principalmente con el acero de refuerzo. El diámetro del tubo será al menos seis veces el tamaño máximo del agregado grueso. A este tubo se le coloca en la parte superior una tolva para recibir el concreto.

El procedimiento de colado tiene como principio colocar el concreto desde el fondo de la perforación en forma continua. Para ello se introduce el tubo Tremie hasta casi tocar el fondo de la perforación. Al inicio del colado se coloca una válvula separadora o “diablo” para evitar la segregación del concreto al comenzar a fluir. Así, se llega a la condición de descarga y con movimientos verticales se logra que el concreto fluya. Estos movimientos verticales no deben ser excesivos en número para evitar una emersión del acero o la contaminación del concreto con bolsas de lodo. El tubo tremie se extrae a medida que se coloca el concreto, pero siempre embebido en él. En la Fig. 3.24 (Santoyo, 1996) se muestra el proceso de colado con tubería tremie, así como dos condiciones de error comunes, por falta de hermeticidad y sumergencia excesiva del tubo.

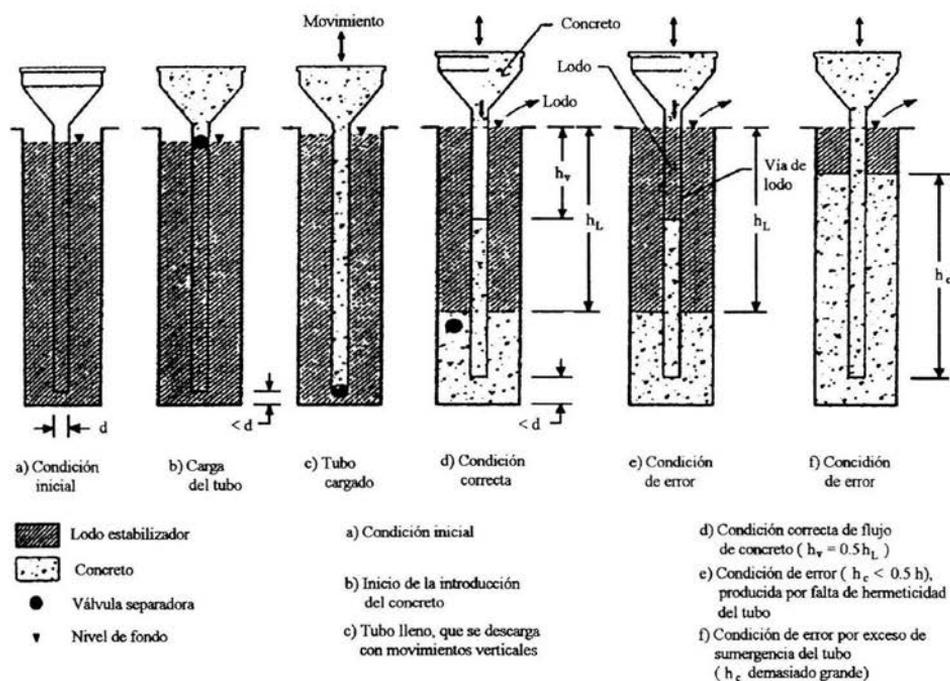


Fig. 3.24 Proceso de colado con tubo tremie (Santoyo, 1996).

Al término del colado, si el nivel superior de la pila está por arriba del suelo, el concreto se debe dejar rebosar hasta que el concreto esté sano, libre de lodo y detritus; esto reducirá problemas de un descabezamiento excesivo. Si el nivel de la pila está por debajo del nivel

del suelo el concreto, se elevará entre 0.5 y 1.0 m. Antes de colocar el concreto se deben revisar los azolves y si existen, removerlos.

3.7 Verificación de la calidad

La calidad de una pila se puede definir como la capacidad del elemento de satisfacer adecuadamente las especificaciones de diseño previstas. Para verificar la calidad de pilas terminadas existen métodos directos o “destructivos” e indirectos o “no destructivos”. Los métodos directos se aplican a elementos extraídos de la propia pila que se ensayan en laboratorio, como puede ser la prueba de compresión simple en corazones de concreto, mientras que los métodos indirectos sirven para detectar anomalías en el cuerpo de la pila, como el método de *cross-hole*. A continuación se enlistan las normas y especificaciones de los métodos de verificación de calidad.

Norma	Descripción
NOM-C-83-1988	Industria de la construcción. Concreto. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
NOM-C-169-1988	Obtención y prueba de corazones y vigas extraídos de concreto endurecido.
NOM-C-192-1986	Determinación del índice de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro.
NOM-C-275-1986	Concreto. Determinación de la velocidad de pulso. Método del ultrasonido.
NOM-C-301-1986	Concreto endurecido. Determinación de la resistencia a la penetración.
ASTM C 39-96	Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
ASTM C 42M-99	Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete.
ASTM C 174-97	Standard test method for measuring length of drilled concrete cores.
ASTM C 597-97	Standard test methods for pulse velocity through concrete.
ASTM C 803M-97	Standard test methods for penetration resistance of hardened concrete.
ASTM C 805-97	Standard test method for rebound number of hardened concrete.
ASTM C 900-93	Standard test methods for pullout strength of hardened concrete.
ASTM C 1040-93	Standard test methods for density of unhardened and hardened concrete in place by nuclear methods.

Adicionalmente a los métodos mencionados, durante las etapas de construcción de la pila se deben tener en cuenta aspectos geométricos, de localización, verticalidad en la excavación, limpieza del fondo antes del colado, etc. En obra deben llevarse al día registros de cada una de las etapas, así como una copia del estudio de mecánica de suelos. En el Anexo C se reproducen los datos necesarios que deben tenerse en obra, para la supervisión, perforación, colado del concreto y criterios de aceptación (Manual de Cimentaciones Profundas, SMMS, 2001). Esta información es útil para el supervisor de obra.

4. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS LODOS

4.1 Lodos al final del proceso en obra

El lodo bentonítico puede contaminarse con sólidos, producto de la excavación, con concreto, con agua subterránea, o con altas concentraciones de sal. En algunos casos, los problemas de control y costo no justifican un tratamiento extra del lodo bentonítico, por lo que es preferible reemplazar todo el volumen usado.

El tratamiento para la reutilización parcial o total del lodo se lleva a cabo con alguno de los siguientes sistemas, o una combinación de ellos:

- Tanques sedimentadores
- Mallas vibratorias
- Hidrociclones para eliminar arena
- Centrifugadores

Una vez terminado el uso y reuso de los lodos en la obra se deben colocar en un área para recolectarlos y transportarlos a algún sitio de disposición.

Sin embargo, el lodo bentonítico es un contaminante donde quiera que se le coloque: en tierra firme, ríos, lagunas, el drenaje municipal, tiraderos de basura, u otros¹. Hasta hace algunos años los lodos se vertían irresponsablemente en el drenaje municipal, causando el azolve e incluso taponamiento de los conductos, con los consecuentes prejuicios y costos al municipio.

En cuanto a los lodos bentoníticos como fluidos de perforación en sondeos, se menciona lo siguiente: “Durante la ejecución de sondeos es frecuente ver que se dejan en el sitio, sin

¹SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS), *Manual de Cimentaciones Profundas*, SMMS, México, 2001, p. 223.

más cuidado, los lodos de perforación (los cuales están clasificados como residuos peligrosos)². Estas opiniones se contraponen con lo que se menciona adelante.

4.2 Legislación

Los lodos bentoníticos son considerados por distintos autores como contaminantes. En una consulta hecha a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) sobre la legislación aplicable a lodos bentoníticos en materia ambiental, la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, respondió lo siguiente:

De acuerdo a la NOM-052-SEMARNAT-1993, misma que puede consultar en la sección de “*Leyes y Normas*” de la página de Internet de esta Secretaría (www.semarnat.gob.mx), **los lodos bentoníticos no están considerados como residuos peligrosos**; en consecuencia, la legislación aplicable para su regulación es de competencia local. Por lo anterior, le sugerimos que consulte los ordenamientos jurídicos estatales de la localidad que corresponda. Para el caso de la legislación ambiental del Distrito Federal, favor de consultar en la siguiente dirección electrónica <http://www.df.gob.mx/secretarias/mambiente/index.html>.

Por su parte, la legislación ambiental de los Estados Unidos de América, en el Código Electrónico de Regulaciones Federales (e-CFR, por sus siglas en inglés), Título 40, Protección del Ambiente, Capítulo I, Agencia de Protección Ambiental, Subcapítulo I, Residuos sólidos, Parte 261.4 (b)(5), identifica como residuos no peligrosos a los fluidos de perforación... producto de la exploración, desarrollo o producción de petróleo crudo, gas natural o energía geotérmica.

Por lo tanto, los lodos bentoníticos no son considerados como residuos peligrosos, pero no dejan de ser un residuo que se debe tratar, manejar, transportar y disponer adecuadamente.

² JAIME PAREDES, ALBERTO, *La legislación ambiental y la ingeniería civil frente al ambiente*, Publicación No. 578, Instituto de Ingeniería, UNAM.

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF) clasifica los residuos en dos: urbanos y de manejo especial, considerados como no peligrosos. Según el artículo 31, de dicha ley, inciso V, son residuos de manejo especial “los residuos de la demolición, mantenimiento y construcción civil en general”, por lo que los generadores de residuos de manejo especial deberán instrumentar planes de manejo tanto durante la construcción y montaje como en la operación y desarrollo de la actividad. Ningún residuo se puede disponer fuera de los lugares autorizados ni verter en el drenaje municipal o en cualquier cuerpo de agua.

En el Distrito Federal existe un programa para la Minimización y Manejo de Residuos de la Industria de la Construcción el cual tiene como objetivo “promover la minimización y el manejo adecuado de los residuos de la construcción, disminuyendo las presiones que sobre el suelo de conservación y barrancas se realiza, otorgándole un fuerte impulso al reaprovechamiento de los residuos de la construcción”. En comunicación personal con el Sr. Ricardo Ortiz del programa de minimización y manejo citado, comentó que en los próximos meses se publicará un escrito con los lineamientos sobre los residuos de la construcción.

4.3 Transporte y disposición

Al respecto del transporte y disposición de lodos bentoníticos, el artículo 26 de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, estipula que el transporte de los lodos bentoníticos corre por cuenta del generador de residuos sólidos, al ser estos considerados como residuos de manejo especial.

En cuanto a la disposición, esta se debe hacer en “... sitios que determine la Secretaría de Obras y Servicios.” (LRSDF, Art. 26). Al respecto, el Sr. Ricardo Ortiz comentó que en el Distrito Federal solo se cuenta con un lugar para disponer esos residuos y es el llamado Bordo Poniente, al oriente de la Ciudad. También citó que se planea la construcción de un

lugar alternativo para la disposición y valorización específica de residuos producto de la construcción.

4.4 Polímeros

Actualmente la interacción entre las obras civiles y el medio ambiente es un punto crítico y, por lo tanto, regulado por las leyes. Para eliminar el problema de la generación y disposición de residuos y el alto costo que esto representa, es factible sustituir la bentonita con polímeros sintéticos, total o parcialmente biodegradables con el tiempo.

Los fluidos poliméricos son principalmente del tipo orgánico, de cadena larga, o de sales de silicatos inorgánicos. Se presentan en forma líquida o granular. Su uso se considera beneficioso, ya que:

- a) Son, presumiblemente, más fáciles de preparar y de controlar. Para su mezclado no necesita de mezcladores coloidales.
- b) Requieren sólo una fracción del total que se utilizaría con bentonita, usualmente entre un 10 y 20%.
- c) Su rendimiento es mayor porque permite un mayor número de reusos; además, en su tratamiento sólo requiere de tanques sedimentadores. En mezclas típicas de polímeros hasta 8 veces más reusos que las mezclas de bentonita (Beresford *et al*, 1989).
- d) La mayoría de los polímeros se hidratan en 30 min aproximadamente (Beresford *et al*, 1989).
- e) Al reducirse el volumen de material para formar el fluido se ahorra espacio de almacenamiento, de producción y de manejo, empleando menos personal y tiempo en las actividades relacionadas con el fluido de perforación.
- f) En el transporte también existe un ahorro. En general, transportar 20 litros de polímero sustituyen una tonelada métrica de bentonita³.

³SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS), *Manual de Construcción Geotécnica*, Tomo I, SMMS, México, 2002.

- g) Son ambientalmente seguros. Muchos de los polímeros pueden obtener aprobación para su descarga directa al ambiente o en el drenaje municipal, sin consecuencias dañinas y sin sanción alguna (Beresford *et al*, 1989).
- h) En el momento del colado el polímero no se mezcla con el concreto por lo que no se contamina.

Algunas desventajas de los fluidos poliméricos son:

- a) Su punto de fluencia es nulo, por lo que las partículas no se mantienen en suspensión
- b) La densidad no se puede incrementar, así que se debe revisar la estabilidad en cada caso específico
- c) En suelos con agua salada o contaminada se deben usar aditivos especiales para mantener las propiedades.

5. CONCLUSIONES

Partiendo de la falta de información compilada sobre lodos bentoníticos, se presentan las siguientes conclusiones derivadas de este trabajo:

1. En este trabajo se reúne la información necesaria para conocer de manera integral qué es un lodo bentonítico, sus propiedades y comportamiento en distintas condiciones, dado que entender los fenómenos con los que trata el ingeniero es imprescindible si se quiere hacer una práctica razonable de la ingeniería.
2. Las principales propiedades de un lodo bentonítico que interesan al ingeniero son la viscosidad, punto de fluencia, densidad, filtración, contenido de arena y pH. Estas propiedades a menudo se contradicen con respecto a las funciones que debe realizar el lodo, la principal, estabilizar la excavación. Es por esto que conocer las propiedades y los equipos para medirlas, de acuerdo a las especificaciones existentes, marcará la pauta para determinar el equilibrio donde se puedan desarrollar las funciones necesarias sin afectar otras.
3. En la elaboración de lodos bentoníticos se busca que con la menor viscosidad se presente una adecuada resistencia a la contaminación y proporcione la estabilidad de la perforación, además que sea lo más económico posible.
4. En este trabajo se presenta un procedimiento de dosificación que proporciona una guía para la elaboración de un lodo bentonítico; no obstante, se recomienda hacer pruebas con las bentonitas que se disponen en el mercado para conocer cuál es la dosificación óptima y para qué condiciones de estratigrafía, calidad de agua, se da esta dosificación.
5. El tiempo de reposo del lodo después de mezclado es muy importante para que el fluido adquiera sus propiedades. El tiempo mínimo de reposo es de 24 h. Se deben realizar pruebas para observar si este tiempo se puede disminuir.

6. El lodo se puede contaminar principalmente con suelo, materia orgánica, cemento y sal. Esta contaminación reduce su tiempo de reuso e implica un tratamiento extra para seguirlo usando. Se pueden incluir aditivos al lodo para facilitar la hidratación de la bentonita o bien, fibras para aumentar el espesor de la costra y evitar fugas del fluido. La calidad del agua freática es importante para planear el tipo de materiales y aditivos a usar en la elaboración del lodo bentonítico.

7. Un estudio de mecánica de suelos de calidad es de vital importancia en la etapa de construcción. Este debe ser suficiente para conocer las propiedades del subsuelo y así planear el proceso constructivo adecuado, que incluye el tipo de maquinaria y el tipo de lodo a usar como soporte. El método de lodo desplazado tiene como base un lodo bentonítico que establezca la perforación y mantenga los sólidos en suspensión para que la limpieza del fondo sea mínima.

8. El control de las propiedades de los lodos y supervisión de la calidad en obra de las pilas se puede realizar siguiendo los aspectos mencionados en el Anexo C. Esta supervisión se debe llevar a cabo por ingenieros con conocimiento de los temas tratados aquí para minimizar los errores en la construcción. En obra deben llevarse al día registros de cada etapa, incluyendo las características de los lodos bentoníticos, así como una copia del estudio de mecánica de suelos.

9. La toxicidad del lodo bentonítico es materia de discusión. Se considera que los lodos son contaminantes donde quiera que se les coloque¹ o residuos peligrosos², mientras que para la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) son residuos de competencia local de manejo especial, producto de la construcción civil, los cuales deben ser transportados por el constructor y dispuestos en un tiradero normal. Es importante lograr una concordancia entre los que practican y los que formulan la normatividad ambiental, para determinar si los

¹ SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS), *Manual de Cimentaciones Profundas*, SMMS, México, 2001, p. 223.

² JAIME PAREDES, ALBERTO, *La legislación ambiental y la ingeniería civil frente al ambiente*, Publicación No. 578, Instituto de Ingeniería, UNAM.

lodos bentoníticos son residuos peligrosos o no, realizando en su caso pruebas específicas en los lodos utilizados en nuestro País.

10. En los próximos meses se publicará una normatividad sobre los residuos de la construcción, para su manejo, transporte y disposición, por parte del Programa de Minimización y Manejo de Residuos de la Industria de la Construcción del Distrito Federal. Complementando esta normatividad se planea, asimismo, contar con un lugar específico para la disposición de los residuos producto de la construcción. Esto representa un avance en la normatividad ambiental porque además busca posibles usos alternos de estos residuos.
11. Para mitigar el posible impacto ambiental de los lodos bentoníticos, pueden utilizarse lodos de perforación sintéticos (polímeros), los cuales son biodegradables y representan ahorros en las etapas de transportación, disposición, almacenamiento y tratamiento, en comparación con aquellos. El motivo principal de porque no se usan con frecuencia ese tipo de fluidos es su costo, que resulta mayor que el de un lodo bentonítico; sin embargo, debe realizarse un análisis cuidadoso de precios unitarios para determinar el costo final de ambos fluidos y revisar la factibilidad de uno u otro.

A partir de este trabajo se desprenden las siguientes líneas de investigación:

- a) Es deseable contraponer la teoría con la práctica en el proceso constructivo de pilas con el sistema de lodos, para ello es conveniente realizar un estudio de campo, que permita obtener información sobre la forma en que se realiza este proceso, desde la etapa de elaboración de lodos, uso en la perforación y colado y disposición de ellos.
- b) Si la práctica de construcción de pilas coladas bajo agua continúa haciendo uso de los lodos bentoníticos, se ve la necesidad de contar con datos más precisos de sus propiedades. Para ello se recomienda la realización de un trabajo que incluya una serie de pruebas de laboratorio con distintas marcas de bentonitas en el mercado.

Estos datos son de utilidad para el sector de la construcción porque marcarían los límites de control en los que se encuentran los distintos productos. También son recomendables pruebas de lodos bentoníticos con los distintos aditivos y fibras usados en nuestro País.

- c) Una línea más de investigación se refiere a los fluidos sintéticos (polímeros). En ella pueden determinarse sus ventajas y desventajas con respecto a los lodos bentoníticos, tanto en costos y rendimientos, comparando sus propiedades, y analizando la factibilidad de su uso.
- d) Una línea de investigación muy importante es determinar el tipo de residuo que es el lodo bentonítico, y definir si realmente es peligroso o sólo se trata de un residuo de manejo especial producto de la construcción, tomando en cuenta la normatividad que se publicará en los próximos meses.

El desarrollo de este trabajo me ha permitido visualizar la necesidad de investigación en el tema de lodos bentoníticos usados en la práctica mexicana, con el fin de caracterizar las diferentes marcas de bentonitas que existen en el mercado, para dar a los constructores parámetros confiables que les permitan planear de manera eficiente el proceso constructivo. Por otra parte, me llama la atención que exista contradicción en cuanto a la toxicidad de los lodos bentoníticos, así como la falta de estudios al respecto. Me parece que en el tema de lodos bentoníticos existe aún mucho por hacer ya que el uso de polímeros no es común en nuestro País.

BIBLIOGRAFÍA

I. Legislación

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, vigentes, p.23.

Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, Gobierno del Distrito Federal, publicado en Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 33, abril 22, 2003.

II. Obras consultadas

ALBERRO, J.A. & HIRIART, G.M., *Lodos*, en 40 años de Investigación y Práctica en Geotecnia, artículos históricos, Tomo II, Fundación ICA, México, 1996.

BERESFORD, J.J., CASHMAN, P.M., HOLLAMBY, R.G., *The merits of polymeric fluids as support slurries*, en Piling and Deep Foundations, Burland J. B. & Mitchell J. M. (editors), Vol. 1, Balken, Netherlands, 1989.

FLORES OCHOA, J., *Problemática Geotécnica en la Construcción de Cimentaciones Profundas*, en Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, 2º Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas, México, D.F., 1994.

PANIAGUA ESPINOZA, W., *La supervisión Geotécnica en la Construcción de Cimentaciones Profundas*, en Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, 2º Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas, México, D.F., 1994.

REESE, L.C., & TUCKER, K.L., *Bentonite Slurry in Constructing Drilled Piers*, en Drilled Piers and Caissons II, American society of Civil Engineers, New York, 1985.

SANTOYO, E., *Propuesta para enfrentar retos tecnológicos de la mecánica de suelos blandos*, citado en Manual de Cimentaciones Profundas, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 2001.

SCHMITTER, J., et al, *Efecto estabilizador de los lodos bentoníticos en cimentaciones*, citado en Manual de Cimentaciones Profundas, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 2001.

SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS (SMMS), *Cimientos Profundos Colados en Sitio*, Reunión conjunta ADSC-SMMS, SMMS, México, 1976.

_____, *Manual de Cimentaciones Profundas*, SMMS, México, 2001.

_____, *Manual de Construcción Geotécnica*, Tomo I, SMMS, México, 2002.

_____, *Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes*, SMMS, México, 1989.

WOODWARD Jr., R.J., GARDNER, W.S., GREER, D.M., *Drilled Pier Foundations*, McGraw-Hill, 1972.

XANTHAKOS, P.P., *Slurry walls*, McGraw-Hill, New York, 1979.

III. Otras obras consultadas

JUÁREZ B, E., & RICO R., A., *Mecánica de Suelos*, Tomo 2, 2ª Edición, Limusa, 1998.

MOCTEZUMA, C.O., *Pilotes Colados en su Sitio y Sistema de Balancines*, en 40 años de Investigación y Práctica en Geotecnia, artículos históricos, Tomo II, Fundación ICA, México, 1996.

PECK, R.B., HANSON, W.E., THORNBURN, T.H., *Foundation Engineering*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1974.

WINTERKORN, H.F. & FANG HSAI-YANG (editors), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, USA, 1975.

IV. Tesis

VELÁZQUEZ VADILLO, ALBERTO, *Procedimientos constructivos de Pilas Coladas en el Lugar*, Tesis de Maestría, UNAM, México, 2002.

V. Internet

- “Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-93, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente”, dirección de internet: <http://semarnat.gob.mx/wps/portal>, fecha de consulta: enero 25, 2004.
- “Ley Ambiental del Distrito Federal”, Gobierno del Distrito Federal, dirección de internet: <http://df.gob.mx/leyes/normatividad>, fecha de consulta: enero 25, 2004.
- “Instituto Federal de Acceso a la Información Pública, IFAI, Sistema de solicitudes de información por internet”. Consulta a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, área que proporciona la respuesta: Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, dirección de internet: <http://www.informacionpublica.gob.mx/>, fecha de consulta: enero 29, 2004, fecha de respuesta: febrero 18, 2004.
- “Protection of Eenvironment, Title 40, Protection of Environment, Chapter I Environmental Protection Agency, Subchapter I Solid Wastes, Part 261.4 (b) (5)”, Electronic Code of Federal Regulations (eCFR), dirección de internet: <http://www.gpoaccess.gov/ecfr/>, fecha de consulta: enero 25, 2004.
- “Guía para la definición y clasificación de residuos peligrosos”, dirección de internet: <http://www.cepis.ops-oms.org>, fecha de consulta: octubre 13, 2003.
- “Test Method for the Marsh Funnel Viscosity of Bentonitic Construction Slurries”, dirección de internet: <http://www.astm.org>, fecha de consulta: octubre 12, 2003.
- “Ensayos de Cal de Construcción, Lechadas y Lodos”, Catálogo en CD, empresa Controls, Venta de equipo de ensayo para la industria de la construcción.
- “Bentonite slurry assist drilled shafts”, dirección de internet: <http://www.agrafoundations.com>, fecha de consulta: octubre 13, 2003.
- “Suspensiones de bentonita”, dirección de internet: <http://www.carreteros.org>, fecha de consulta: octubre 12, 2003.
- “Preparación del fluido de excavación”, dirección de internet: <http://www.carreteros.org>, fecha de consulta: octubre 12, 2003.

“Instrumentos de laboratorio para lodos”, dirección de internet: <http://www.adriatech.com>,
fecha de consulta: octubre 12, 2003.

VI. Otras fuentes

ORTÍZ, RICARDO, *Comunicación personal*, Programa de Minimización y Manejo de Residuos de la Industria de la Construcción, Dirección General de Gestión Ambiental de Agua, Suelo y Residuos, Gobierno del Distrito Federal, marzo 26, 2004.

ANEXO A

FÍSICO-QUÍMICA DE LA BENTONITA

Propiedades de las arcillas

Estructura

Las arcillas se producen debido a la descomposición química de minerales (principalmente silicatos), que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas. Están constituidas fundamentalmente por silicatos de aluminio hidratados, además de silicatos de magnesio, hierro y otros metales, también hidratados, cuya estructura cristalina está bien definida.

Los átomos que constituyen las arcillas están dispuestos en forma de láminas. Existen dos variedades de dicha disposición: la silícica y la aluminica.

La disposición en lámina silícica está constituida por un átomo de silicio y cuatro de oxígeno ordenados en forma de tetraedro, como muestra la Fig. A-1 (a), que se agrupan en unidades hexagonales las cuales se repiten indefinidamente constituyendo una redícula laminar. La unión entre cada tetraedro se realiza por medio de un átomo de oxígeno, como ilustra la Fig. A-1 (b).

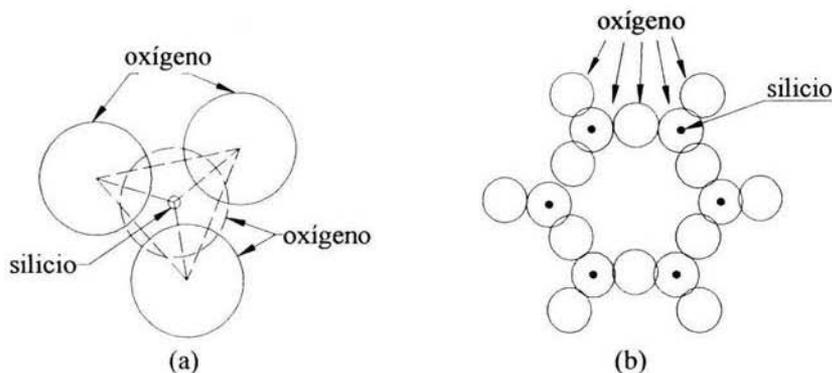


Fig. A-1 Disposición en lámina silícica.

En la disposición en láminas aluminicas, un átomo de aluminio está rodeado por seis de oxígeno formando un octaedro. El enlace de unión que forma la retícula es un átomo de oxígeno (Fig. A-2).

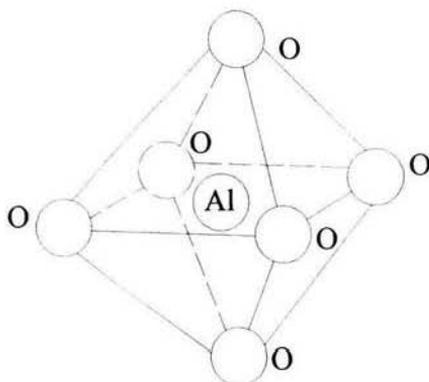


Fig. A-2 Disposición de una lámina aluminica.

La forma de la estructura de las arcillas proporciona a las partículas un área superficial muy grande, la que será la responsable del grado de cohesión de estos suelos.

Físico-química de las arcillas

En los suelos de grano fino, las fuerzas que mayor influencia tienen en su comportamiento son las que se desarrollan en su superficie, tales como las del tipo electromagnético. La superficie de cada partícula de arcilla posee carga eléctrica negativa, la cual atrae a los iones positivos del agua (ion hidrógeno) y a diferentes cationes de otros elementos químicos como el potasio, calcio, magnesio y aluminio; la magnitud de esta atracción depende de la intensidad de la carga, y de la estructura y composición de la arcilla.

Las propiedades físicas de la arcilla derivan del tipo de catión que atraiga. En la película superficial de los cristales de arcilla se pueden intercambiar cationes; así, por ejemplo, en una arcilla que contenga en su película superficial cationes de hidrógeno éstos pueden ser sustituidos por cationes de sodio si se hace circular a través de su masa agua con sales de

sodio en disolución. El tipo de catión absorbido le dará un espesor a la película superficial, lo que influye en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo.

Estado coloidal

Se dice que una sustancia se encuentra en estado coloidal cuando la actividad superficial de sus granos influye sobre las propiedades del agregado.

Las partículas en suspensión de una arcilla se encuentran cargadas negativamente por lo cual se repelen entre ellas. Sin embargo, si se someten a la acción de un electrolito, las cargas negativas se neutralizan y se produce una agrupación de las partículas formando lo que se denomina una estructura floculenta. Dependiendo de la sustancia adicionada, la estructura floculenta puede dar origen a dos tipos de coloides: los hidrófilos, que absorben agua, se hinchan y coagulan de gel, y los hidrófobos, que no absorben agua y coagulan en forma de copos. Las arcillas coloidales se sitúan como un producto intermedio entre estos dos tipos.

La concentración de iones hidrógeno (pH) tiene un papel importante en la floculación. Al tener las suspensiones un carácter electronegativo, los ácidos y las sales provocan su floculación por tener un pH bajo, y ante la presencia de sustancias alcalinas, con un pH elevado, se produce una estabilización de la suspensión.

Tixotropía

Se denomina tixotropía de una arcilla al fenómeno que consiste en la pérdida de la liga entre las partículas ante el movimiento del suelo y a la posterior recuperación de sus propiedades si se permite el reposo.

Plasticidad

De manera sencilla se puede definir la plasticidad como la propiedad de una arcilla de mantener una deformación al cesar el esfuerzo que la ha producido.

Clasificación de las arcillas

Atendiendo a los minerales que con mayor frecuencia se encuentran en las arcillas naturales y de acuerdo a su estructura cristalina, se puede hacer la siguiente clasificación:

Caolinitas. Se forman por superposición indefinida de láminas aluminicas y silicicas. La unión entre partículas es muy fuerte de tal modo que no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas. Presentan poca actividad superficial y sus propiedades coloidales no son favorables para su uso como fluidos de perforación.

Illitas. Estas arcillas se forman por las superposiciones indefinidas de una lámina aluminica entre dos silicicas. En su constitución interna se forman grumos de material que ocasionan una reducción del área expuesta al agua, lo que limita su propiedad de expandirse. Tampoco son recomendables como materiales para la elaboración de lodos de perforación.

Montmorillonitas. Su estructura es análoga a la de las illitas, pero su unión es más débil de modo que se permite la introducción de agua en su estructura, lo que ocasiona un aumento en el volumen de los cristales que se traduce en una expansión del suelo. Las montmorillonitas poseen una gran actividad superficial en sus partículas coloidales, lo que puede variar sus propiedades físicas de un tipo a otro, como en el caso de la montmorillonita cálcica y sódica.

Las arcillas montmorilloníticas son las que se han usado satisfactoriamente como lodos de perforación. La bentonita es una arcilla de este grupo.

Propiedades de la bentonita

El término bentonita fue aplicado inicialmente a una arcilla plástica altamente coloidal encontrada en Fort Benton, Wyoming, USA. Posteriormente, se demostró que se trataba de una arcilla formada por alteración de cenizas volcánicas y se encontró que poseía un porcentaje elevado de montmorillonita.

En la naturaleza se le encuentra desde estratos de poco espesor hasta algunos que han alcanzado los 15 m. La bentonita varía en color desde blanco hasta gris, amarillo, verde, azul y negro. Quizá el color más frecuente sea el amarillo-verde, que proviene de yacimientos intemperizados y cuyas propiedades físicas son diferentes a las del material de origen.

La arcilla predominante es la monmorillonita, acompañada muchas veces de illita y caolinita hasta en proporciones de un 50% del contenido total del mineral. Se pueden encontrar formadas por montmorillonita hasta en un 90%. La composición de la montmorillonita varía en diferentes bentonitas de acuerdo con lo que suceda en su red cristalina o en la naturaleza de los cationes intercambiables. Uno de los iones más abundantes en el intercambio es el calcio.

La causa principal de la variación de las propiedades de la bentonita es su composición misma y el carácter de los iones intercambiables. Así, por ejemplo, las bentonitas que tienen sodio como catión intercambiable presentan un alto grado de hinchamiento y coloidalidad.

El peso específico de la bentonita seca varía entre 2.7 y 2.8 aproximadamente, descendiendo este valor al orden de 1.6 a 1.8 cuando se presenta como producto molido.

Además de su aplicación en la ingeniería, la bentonita se ha usado en la manufactura de catalizadores, en la fabricación de jabones, productos farmacéuticos y en la cerámica.

ANEXO B

TIPOS DE FLUIDOS

Se acostumbra dividir los fluidos en Newtonianos o No Newtonianos atendiendo a la proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación que presenten en régimen laminar.

Fluidos Newtonianos

Son aquellos en los cuales el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación. A la constante de proporcionalidad se le llama coeficiente de viscosidad y está definida como:

$$\eta = \frac{\tau}{\varepsilon'}$$

donde:

η , coeficiente de viscosidad

τ , esfuerzo cortante

ε' , velocidad de deformación

En estos fluidos el coeficiente de viscosidad permanece constante ante cambios de esfuerzos, independiente del estado de reposo o agitación de los mismos.

Fluidos No Newtonianos

Por el contrario a los anteriores, estos fluidos no presentan una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Dentro de ellos se encuentran los denominados fluidos dilatantes, los fluidos plásticos ideales y los fluidos plásticos de Bingham.

Los lodos son fluidos plásticos de Bingham. En ellos la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es independiente del tiempo, también es lineal pero no pasa por el origen de coordenadas, sino que tiene un valor positivo en el eje de los esfuerzos cortantes, denominado τ_0 , resistencia del gel o punto de fluencia y representa el esfuerzo cortante mínimo requerido para producir el flujo (Fig. B-1).

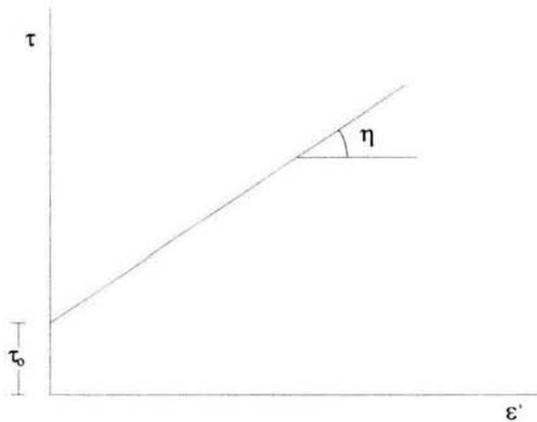


Fig. B-1 Fluido plástico de Bingham, (SMMS-ADSC, 1976).

ANEXO C

SUPERVISIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE PILAS

Es importante tener en cuenta ciertos aspectos para poder llevar un control adecuado de la obra y verificar a tiempo la calidad de cada actividad. A continuación se presentan aspectos de las etapas que conforman la construcción de una pila.

a) Supervisión

La supervisión de la construcción de las pilas incluye, entre otros aspectos:

- La corroboración de su localización.
- La vigilancia durante la perforación.
- El control de la fabricación y manejo del lodo de perforación, si se requiriera.
- La protección del agujero, entendiendo como tal el cuidado de su estabilidad durante la perforación y durante la colocación del armado y del colado del concreto.
- La protección de las construcciones vecinas.
- La verificación de la verticalidad de la perforación y de las dimensiones del fuste y de la campana, si la hubiere.
- La confirmación de la profundidad de desplante y de las características del material en que se apoyará el elemento.
- La revisión del acero de refuerzo y que cuente con los elementos rigidizantes necesarios para su manejo.
- La verificación de la calidad de los materiales de construcción.
- La vigilancia del izado, manejo y colocación del acero de refuerzo.
- La verificación de que los procedimientos de colocación del concreto y de manejo de los lodos sean los adecuados.

Deberá realizarse con una brigada de topografía el trazo de la cimentación, marcando con una estaca la localización del centro de cada elemento, indicando la profundidad de perforación y la de desplante. Una vez terminado el colado de la pila, deberá verificarse su posición real, siempre con una brigada de topografía, a fin de comparar con la tolerancia prevista.

La supervisión deberá contar en obra con una copia del estudio geotécnico, el que, además de información general sobre secuencia estratigráfica, tipos de suelos y resistencia al corte, deberá contar con la siguiente información:

- Presencia de estratos permeables de grava, arena o limo; localización y espesor de dichos estratos; niveles piezométricos en tales estratos.
- Niveles piezométricos en el estrato de apoyo.
- Caudal del agua que fluye de los estratos de apoyo hacia el barreno (aún en roca).
- Presencia de obstrucciones grandes arriba del nivel de desplante y procedimientos para la remoción de las mismas.
- Presencia de gas natural en el suelo o roca.
- Análisis químico del agua freática.
- Caudal de descarga de las bombas de achique, cuando se usen, y determinación del porcentaje de finos arrastrado por el agua. Para resultan útiles los tanques de sedimentación con crestas vertedoras.

b) Perforación

Entre los puntos que se deben verificar o anotar durante la perforación, destacan:

- Información general: fecha, condiciones atmosféricas, identificación individual, hora de inicio y de terminación de la perforación, equipo utilizado, personal.
- Localización topográfica de la pila al inicio y al término de la perforación.
- Conformidad del procedimiento de perforación con las especificaciones de construcción o con la práctica correcta (se aconseja que toda obra de cimentación tenga sus propias especificaciones que rijan durante toda la construcción).
- Verticalidad y dimensiones de la perforación a intervalos regulares. La verticalidad de la perforación se debe comparar con el valor de proyecto y con la desviación permisible especificada.
- Bondad del método y equipo usados para atravesar estratos permeables, si los hubiere.
- Bondad del método y equipo usados para atravesar grandes obstrucciones, si las hubiere.
- Seleccionar adecuadamente la secuela de perforación y colado, cuando se contemple ejecutar simultáneamente varias pilas relativamente cercanas, a fin de

garantizar el movimiento del equipo, su seguridad, la de las construcciones vecinas, así como la estabilidad de las perforaciones.

- Registro de los estratos de suelos atravesados durante la perforación.
- Profundidad de empotramiento en el estrato de apoyo y cota del fondo de la perforación.
- Elevación y geometría de la campana, si la hubiere.
- Calidad del estrato de apoyo (esto debe hacerse mediante inspección visual, siempre que sea posible). Para altas capacidades de carga se recomienda la obtención de núcleos y el ensaye *in situ* del material hasta una profundidad de 1 a 2 diámetros bajo el nivel de desplante. El supervisor debe decidir cuando se ha alcanzado el estrato de apoyo y cual es la profundidad correcta de la pila.
- Limpieza del fondo y de las paredes de la perforación y del ademe permanente (o perdido), si lo hubiere, con la herramienta adecuada.
- Gasto de filtración hacia la perforación.
- Calidad del lodo bentonítico, si se requiriera.
- Pérdida de lodo, si la hubiera (hora, elevación, cantidad).
- Cuando la perforación atraviese arcillas blandas bajo el nivel freático, no debe extraerse la cuchara a velocidad tal que produce succión y, en consecuencia, caídos. En este caso conviene subir la cuchara en etapas, permitiendo el restablecimiento de la presión, o dejando en el centro de la misma una tubería que permita el rápido paso del lodo hacia la parte inferior de la cuchara mientras ésta sube despacio. Se debe evitar el uso indiscriminado de lodos y el nivel del lodo deberá permanecer lo más arriba posible del nivel freático.

c) Colado del concreto

Después de haber inspeccionado y aprobado la perforación, se puede proceder a colocar el acero de refuerzo y el concreto. Entre los aspectos que se deben verificar o anotar, destacan:

- Información general: fecha, condiciones atmosféricas, identificación de la pila, hora de inicio y hora de terminación del colado.
- Calidad del concreto: proporcionamiento, revenimiento, resistencia, agregado máximo, hora de mezclado, hora de salida, hora de llegada, hora de inicio de la descarga, hora de término de la descarga, volumen colocado, identificación del o de los camiones. Se deberá tomar una muestra de tres cilindros de cada 10 m³ de concreto para ensaye a la edad de 28 días.

- Que el método de colocación y posicionamiento correcto del tubo o canalón de descarga del concreto sean los correctos: llevar registro continuo del embebimiento del extremo del tubo tremie en el concreto. No usar tubería que tenga elementos que se atoren por dentro ni por fuera.
- Observar la condición del fondo del agujero, si es que es posible, inmediatamente antes de colocar el concreto.
- Observar la condición de las paredes del agujero o del ademe de acero que estará en contacto con el concreto fresco y anotar la posición del nivel freático detrás del ademe. El concreto deberá colocarse inmediatamente después de esta inspección.
- Observar si el acero de refuerzo está limpio y colocado en su posición correcta y si el diámetro, longitud y espaciamiento de las varillas longitudinales y de los estribos es el adecuado. En varillas con diámetro No. 8 la unión de las varillas deben ser a base de soldadura, a tope.
- No usar patos para el manejo del acero de refuerzo.
- Observar que la posición del acero de refuerzo sea de conformidad con planos y especificaciones.
- Observar el método de colocación del concreto en la pila y asegurarse de que no hay segregación de materiales cuando se utilizan procedimientos tales como caída libre desde una tolva, tubería tremie y botes con descarga de fondo. No usar concreto bombeado a menos que sea colocado con tubería tremie.
- Cuando se deba colocar concreto bajo lodo bentonítico, debe hacerse una limpieza previa de éste, desarenándolo, o bien una sustitución completa del lodo, asegurando sí que el lodo no suelte azolves.
- Realizar pruebas en el concreto fresco, tales como: revenimiento, aire incluido y peso volumétrico.
- Asegurarse de que el concreto se coloca en forma continua, sin interrupciones ni retrasos largos y que dentro del ademe se mantenga un altura de concreto suficiente si es que se va a extraer. Si no se usa ademe, verificar que el peso del concreto sea suficiente para equilibrar la presión hidrostática existente.
- Calcular el volumen de concreto colocado y compararlo con el equivalente a la altura de la perforación.
- La supervisión debe estar pendiente de que el concreto no se contamine con el suelo debido a desprendimientos de las paredes o a extrusión.

- Consolidar mediante vibración el último tramo de 1.5 a 3.0m (5 a 10ft) de altura cuando el concreto tenga un revenimiento menor de 10cm, 4in (lo cual no se aconseja; el revenimiento mínimo debe ser de 15cm (6in), para asegurar un flujo continuo).
- Determinar la cota del descabece y la longitud exacta de cada elemento.
- Verificar *in situ* la calidad de las pilas terminadas, mediante alguno de los procedimientos descritos en el inciso 4.7.
- Verificar topográficamente la localización final de la pila terminada.

d) Criterios de aceptación

- Localización:

Ver Tabla C-1.

- Verticalidad:

La tolerancia permisible está comprendida entre 1 y 2% de la longitud final de la pila, pero sin exceder el 12.5% del diámetro de la pila o 38cm en el fondo, lo que sea menor.

- Campanas:

El área del fondo de la campana no será menor del 98% de la especificada. En ningún caso la inclinación del talud de las paredes de la campana será menor de 55 grados con la horizontal y el arranque vertical de la campana debe tener cuando menos 15cm (6in) de altura. El talud vertical de la campana debe ser preferentemente una línea recta o, en su defecto, ser cóncavo hacia arriba en más de 15cm (6in), medidos en cualquier punto a lo largo de una regla colocada entre sus extremos.

- Limpieza:

Se deberá remover todo el material suelto y de azolve del fuste y de la campana antes de colar el concreto. En ningún caso el volumen de tales materiales excederá el equivalente al que fuera necesario para cubrir un 5% del área en un espesor de 5 cm.

- Concreto:

Ver Tabla C-1.

- Tubería tremie:

Ver Tabla C-1.

- Ademe:

El ademe debe manejarse y protegerse de tal modo que no se ovale más de $\pm 2\%$ del diámetro nominal.

- Acero de refuerzo:

Ver Tabla C-1.

e) Informes

La supervisión entregará un informe diario firmado al director de la obra, al proyectista estructural y al ingeniero geotécnico, en formas preparadas ex profeso. Estos informes deben contener lo siguiente:

- Localización precisa y dimensiones de las perforaciones realizadas.
- Elevaciones precisas del brocal y del fondo.
- Registro de mediciones de la verticalidad.
- Método empleado para la perforación.
- Descripción de los materiales encontrados durante la perforación.
- Descripción de las condiciones en las que se encontró el nivel freático.
- Descripción de las obstrucciones encontradas y removidas.
- Descripción del ademe temporal o recuperable y del permanente colocado, incluyendo su finalidad. Longitud y espesor de la pared, así como el empotramiento y sello obtenido, si estaba proyectado.
- Descripción de cualquier movimiento del suelo o del agua, estabilidad de la campana y de las paredes, pérdida de suelo, métodos de control y necesidades de bombeo.
- Datos obtenidos de la medición directa de la perforación y de la campana.
- Descripción de los métodos de limpieza y grado de limpieza alcanzado inicialmente.
- Elevación a la cual se encontró el material de apoyo. Descripción del material de apoyo, sondeos realizados, método de muestreo, velocidad de avance en roca, especímenes recuperados, pruebas realizadas y conclusiones alcanzadas en relación con el material de apoyo.
- Descripción del grado de limpieza justamente antes de colocar el concreto.
- Registro de la profundidad del espejo de agua dentro de la perforación y gasto de filtración antes de colar el concreto.
- Registro de la supervisión del acero de refuerzo, en cuanto al armado en si, posición y calidad.
- Método de colocación del concreto y de extracción del ademe, si lo hubiere. Registro de la carga de altura del concreto durante la extracción del ademe. Registro

de la elevación del concreto al iniciar la consolidación por vibración, si fuera el caso.

- Registro de las dificultades encontradas. Debe contener la posible extrusión de suelo, posibles huecos, posible estrangulamiento y posible colapso del ademe.
- Condición del concreto entregado en obra, incluyendo el revenimiento, peso volumétrico, aire incluido, fabricación y ensaye de cilindros a compresión y otras pruebas.
- Registro de cualquier desviación de las especificaciones y decisiones tomadas al respecto.

f) Causas más comunes de pilas defectuosas.

- Formación de huecos en el fuste por la extracción inadecuada del ademe.
- Desconchamiento del suelo, dando lugar a contaminación del concreto.
- Localización incorrecta, falta de verticalidad o refuerzo inadecuado.
- Colocación inadecuada del concreto, dando lugar a segregación.
- Estrangulamiento del fuste.
- Colapso del ademe.
- Formación de juntas frías.
- Migración de agua y segregación que originan un concreto débil.
- Concreto de baja calidad entregado en obra.
- Contaminación del concreto con lodo de perforación.
- Tamaño inadecuado de la campana.
- Estrato de apoyo inadecuado.

Las tolerancias comúnmente aceptadas en la fabricación de pilas se indican en la Tabla C-1.

Tabla C-1 Tolerancias aceptadas en la fabricación de pilas.

Concepto	Tolerancias con relación a las especificaciones
Traslapes de acero de refuerzo.	Menor al 50% en una sección.
Separación del acero de refuerzo tanto en el sentido longitudinal como en le transversal.	Mayor de 20 cm.
Acero de refuerzo en extremos.	Sin dobleces y recubrimiento.
Recubrimiento del acero de refuerzo.	Mayor de 7.0 cm; con ademe metálico recuperable mayor de 14.0 cm.
Diámetro interior de tubo tremie.	Mayor de 10 veces el tamaño máximo de agregados del concreto y menor de 12".
Unión entre tramos de tubo tremie.	Impermeable cuando se introduzca en agua.
Revenimiento del concreto.	Mayor de 18.0 cm.
Tamaño máximo de agregado del concreto.	¾".
Excentricidad radial con relación al trazo de la pila medido en la plataforma de trabajo.	15% del diámetro de la sección de la pila; en suelos con presencia de boleo se acepta el 20%.
Desviación horizontal con relación al eje de inclinación proyectado.	2% de la longitud total de la pila; en suelos muy heterogéneos se acepta el 4%.