

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**Estabilización de Perforaciones por medio de la Utilización de Lodos
Bentoníticos**

Guatemala

2001

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**Estabilización de Perforaciones por medio de la Utilización de Lodos
Bentoníticos**

Gustavo Adolfo Castañeda Guerra

**Trabajo de graduación presentado para optar
al grado académico de Ingeniero Civil**

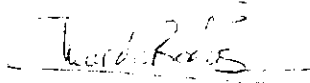
Guatemala

2001



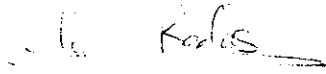


Vo.Bo.:

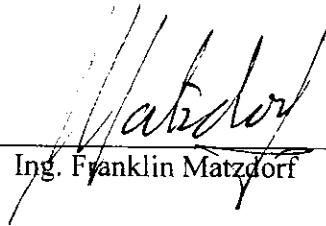


Ing. Ricardo Rodas
Asesor

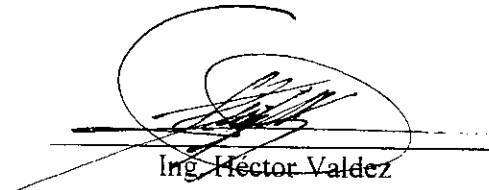
Tribunal:



Ing Ricardo Rodas



Ing. Franklin Matzdorf



Ing. Héctor Valdez

Fecha de aprobación: 20 de septiembre de 2,001

INDICE

I.	Introducción	1
	A. Estabilización de paredes.....	2
	B. Métodos existentes de perforación y estabilización de paredes.....	3
	1. Perforación en seco.....	3
	2. Tubería recuperable.....	3
	3. Tubería perdida.....	4
	4. Lodos de perforación.....	4
	5. Polímeros.....	4
	C. Utilidades de la bentonita.....	5
	1. Perforación de túneles.....	12
	2. Inyecciones de suelo.....	13
	3. Perforaciones verticales.....	13
	4. Selladura del suelo.....	14
	5. Perforaciones horizontales.....	15
	6. Tabla-estaqueado.....	15
	7. Muro colado.....	16
II.	Definición de bentonita	17
	A. Propiedades.....	17
	1. Tixotropía.....	21
	2. Viscosidad.....	22
	3. Rigidez de un lodo.....	24
	4. Densidad.....	25
	5. pH de un lodo.....	27
	6. Contenido de arena.....	27
	B. Calidades.....	28
	C. Tipos de bentonita.....	28
	D. Lodos bentoníticos especiales.....	32
	1. Lodos biodegradables.....	32
	2. Lodos bentoníticos con un incremento de densidad.....	32
	E. Casos especiales y tipos de aditivos (contaminación –solución).....	33

1.	Contaminación química del lodo.....	33
2.	Contaminación por el yeso y la anidrita.....	33
3.	Contaminación por aguas de mar.....	34
4.	Contaminación por el concreto (o por el cemento).....	35
5.	Contaminación por las aguas cloacales.....	35
6.	Tipos de aditivos para los lodos bentoníticos.....	37
F.	Rendimiento.....	39
III.	Proceso de desarenado	41
A.	Manejo de los lodos.....	41
B.	Preparación.....	41
1.	Dosificación del lodo.....	42
C.	Desarenado.....	42
D.	Desecho del Lodo.....	44
IV.	Control de lodos en las obras	45
A.	Lista de controles.....	45
1.	Prueba de filtrat utilizando la prensa Baroid.....	46
2.	Prueba de viscosidad utilizando el cono de Marsh.....	48
3.	Prueba de densidad utilizando la balanza Baroid.....	50
4.	Prueba de contenido de arena utilizando el Elutriómetro.....	52
B.	Tipos de controles.....	54
1.	La dureza del agua.....	54
2.	La potencia y el tiempo de agitación.....	54
3.	La edad del lodo.....	54
C.	Tipos de instalaciones y equipos.....	54
1.	Elaboración de un plano.....	54
2.	Almacenamiento de la bentonita.....	55
3.	Almacenamiento del lodo bentonítico.....	55
V.	Parámetros de aceptación y rechazos	56
A.	Viscosidad.....	56
B.	Densidad.....	56

C. PH.....	56
D. Contenido de arena.....	56
VI. Recomendaciones	57
VII. Conclusiones	59
VIII. Bibliografía	62

I. INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo de tesis es dar a conocer una alternativa en el proceso de estabilización de perforaciones mediante la utilización de lodos bentoníticos. Este proceso es poco común en Guatemala, por lo que el presente trabajo pretende recopilar información bibliográfica y experiencia personal adquirida durante la ejecución de un proyecto de perforación de pilotes utilizando este sistema, que pueda ser de utilidad para la ejecución y supervisión de trabajos de perforación con lodos bentoníticos.

El trabajo presenta la hipótesis que la utilización de lodos bentoníticos para la estabilización de perforaciones es una alternativa efectiva que puede ser utilizada en el área de la construcción en Guatemala. La información bibliográfica y experiencia personal servirán para demostrar la hipótesis planteada.

Debido a las normas de seguridad y las condiciones en que se realizan las perforaciones en nuestro país, este proceso va a ser utilizado con mas frecuencia en la construcción. Por esto el presente trabajo da a conocer otra opción en la estabilización de perforaciones en el suelo.

A. Estabilización de Paredes

La estabilidad de las paredes de una perforación depende del sistema que se utilice cuando ésta no se sostiene por sí misma. Para lograr la estabilización se puede utilizar tubería de protección o fluidos de perforación. La estabilización de arenas y limos, cuando utiliza tubería de protección no siempre es factible. Por lo tanto, se han ideado diversos métodos, en la mayor parte de los cuales se inyectan lodos o soluciones en los vacíos del suelo. Estos materiales endurecen el suelo en grados variables y le proporcionan cohesión. Como llenan parcialmente los vacíos, también reducen la permeabilidad. En muchas ocasiones se ha intentado la inyección de lechada de cemento. La experiencia ha demostrado que el método puede producir resultados muy buenos, pero solamente si el suelo es relativamente homogéneo y no está estratificado, y si el tamaño de los granos no es demasiado pequeño. La lechada no penetrará los vacíos de un suelo suelto cuyo diámetro efectivo D_{10} sea menor que 0.5 mm, o los de un suelo compacto cuyo diámetro efectivo sea menor que 1.5 mm. Por lo tanto, las inyecciones de cemento no son adecuadas para los suelos más finos que las arenas gruesas (Peck et al, 1998).

El tamaño de las partículas del cemento limita la finura de una arena para la cual es adecuada la inyección de cemento. Sin embargo, pueden obtenerse suspensiones de arcilla de cualquier finura deseada, mediante la eliminación de las fracciones más gruesas de las arcillas naturales. Esto condujo a intentos de inyectar suelos con lodos de arcilla. En la práctica, se ha encontrado que estas inyecciones impiden la penetración de agua en las paredes por medio la formación de una película filtrante que tapa los huecos (Peck et al, 1998).

B. Métodos existentes de perforación y estabilización de paredes

1. **Perforación en seco**

Este sistema es utilizado cuando las condiciones del suelo garantizan estabilidad, lo que significa que no habrá derrumbes o alteraciones en el terreno. Este método toma en cuenta todos los sistemas de perforación existentes que no necesiten tubería o fluidos de perforación para estabilizar las paredes. Los sistemas de perforación pueden variar desde barrenas, augers, tubería de perforación, almejas, etc.

Este sistema tiene la limitante que cuando se trabaja bajo el nivel freático no se puede garantizar estabilidad alguna, debido a los empujes activos que ejerce el agua hacia la perforación. Debido a lo anterior, es necesario equilibrar las presiones en la excavación, por lo que en los incisos siguientes se mencionan algunos métodos que se utilizan cuando no existe o no se puede garantizar la estabilidad de la perforación.

2. **Tubería recuperable**

La función básica de la tubería de recubrimiento (casing) es la de proteger la perforación y los equipos contra capas de suelo inestables o la de prevenir la excesiva pérdida o ganancia de agua en la perforación. Este sistema equilibra las presiones que suceden en las paredes de la perforación, evitando así que ocurran derrumbes o que colapse la perforación. Las tuberías comúnmente utilizadas son de acero de alta calidad, que pueden ser tanto de junta como de acople. Esta tubería se vuelve a sacar para que pueda ser utilizada nuevamente. No es necesario que la tubería sea de acero, ya que si las condiciones del suelo y del equipo de perforación lo permiten, se puede utilizar cualquier tubería estandarizada para la protección de perforaciones, incluso tubería PVC u otros materiales.

3. **Tubería perdida**

Tiene la misma función que la tubería recuperable, pero esta tubería se queda en la perforación, ya sea por su dificultad para ser removida porque así se diseñó. Este sistema es comúnmente utilizado en proyectos marinos.

4. **Lodos de perforación**

La utilización de lodos de perforación es un sustituto económico de la tuberías de recubrimiento. El sistema consiste en sustituir sistemáticamente el material de excavación con los lodos de perforación para así evitar cualquier tipo de derrumbe en la perforación. Debido a las propiedades de los lodos, las presiones ejercidas por el agua y el suelo hacia la perforación son equilibradas con los lodos, ya que estos poseen una viscosidad y densidad mayor a la del agua.

5. **Polímeros.-**

Los polímeros son probablemente la tecnología más importante desarrollada para fluidos de perforación. En años pasados, los polímeros han sido utilizados para mejorar el control de la filtración, la viscosidad y demás propiedades de los lodos.

Grandes cadenas de polímeros tienen afinidad por las arcillas y tienen la tendencia a formar una película en la superficie de la perforación. Aparentemente, los polímeros se adhieren en múltiples puntos de las placas de arcilla y en fisuras que existan en la perforación, con lo cual se previene su desintegración. Algunos polímeros son hidrofílicos, por lo que extraen el agua de las formaciones de arcilla, que por la diferencia de presiones tenderían a hincharse y provocar derrumbes.

C. Utilidades de la bentonita

El término Bentonita fue utilizado por primera vez para una arcilla plástica localizada en Fort Benton, Wyoming, Estados Unidos de Norteamérica.



La bentonita es utilizada en la industria de la construcción, elaboración de cerámicas, elaboración de refractarios, materias plásticas y colorantes, celulosa, papelería, arenas de fundición y la siderúrgica, en la preparación de jabones y el área de perfumería. En la agricultura se utiliza para preparar fungicidas e insecticidas, también en los productos farmacéuticos y muchos empleos diversos.

Hace algunos miles de años, los chinos utilizaron fluidos de perforación y en perforaciones en agua salada, ellos notaron que el agua suavizaba la roca y ayudaba a la remoción de los cortes. Este procedimiento fue utilizado por muchos años.

Los sistemas de lavado con agua y lodo que son utilizados en la actualidad se iniciaron a mediados del siglo XIX. Después de 1860, un francés de nombre Leschot utilizó un sistema de rotación con punta de diamante; a raíz de este descubrimiento, muchos sistemas de perforación han sido inventados.

En años recientes se ha obtenido un progreso significativo en las perforaciones con lodos, como es en la industria de la perforación de petróleo. En perforaciones profundas (1,000 metros), se ha aplicado el lodo bentonítico con bastante éxito, siendo en las perforaciones petroleras donde se le dio uso por primera vez.

Lodos de perforación

A pesar de los importantes cambios que van sufriendo con el tiempo las formulaciones de los lodos de perforación, (comenzó a utilizarse a principios del siglo XX), éste sigue siendo uno de los mercados más importantes de las bentonitas.

Las funciones que debe cumplir el lodo son:

- Extracción del ripio y limpieza del fondo de la perforación
- Enfriamiento de la herramienta de perforación
- Control de presiones de formación y estabilización de las paredes
- Mantenimiento en suspensión del ripio
- Transmisión de potencia hidráulica al tricono
- Soportar parte del peso de la sarta de perforación
- Permitir la adición de agentes densificantes

Las bentonitas de Wyoming son las más utilizadas para la preparación de lodos de perforación.

Peletización

La bentonita se ha venido usando desde los años 50 como agente aglutinante en la producción de pelets del material previamente pulverizado durante las tareas de separación y concentración. La proporción de bentonita añadida es del 0.5%, en la mayor parte de los casos.

Aunque no existen especificaciones estandarizadas para este uso, se emplean bentonitas sódicas, naturales o activadas, puesto que son las únicas que forman buenos pelets con las resistencias en verde y en seco requeridas, así como una resistencia mecánica elevada tras la calcinación.

Absorbentes

La elevada superficie específica de la bentonita, le confiere una gran capacidad tanto de absorción como de adsorción. Debido a esto se emplea en decoloración y clarificación de aceites, vinos, sidras, cervezas, etc. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y contaminantes orgánicos.

Se utiliza además como soporte de productos químicos, como por ejemplo herbicidas, pesticidas e insecticidas, ya que posibilita una distribución homogénea del producto tóxico.

En los últimos años, además, están compitiendo con otras arcillas absorbentes (sepiolita y paligorskita) como materia prima para la fabricación de lechos de animales. La demanda de bentonitas para este uso varía sustancialmente de unos países a otros, así en Estados Unidos comenzaron a utilizarse a finales de los años 80; sin embargo, en Europa el mercado es más complejo y su demanda mucho menor.

Material de Sellado

La creciente importancia que está tomado en los últimos años, por parte de los gobiernos de toda Europa, la legislación en lo referente a medio ambiente, ha favorecido la apertura y desarrollo de todo un mercado orientado hacia el uso de bentonitas como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radiactivos de baja y media actividad.

Durante muchos años las bentonitas se han venido utilizando en mezclas de suelos en torno a los vertederos, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito. Esta mezcla se podía realizar in situ o sacando el suelo de su emplazamiento, mezclándolo con la bentonita y volviéndolo a colocar en su sitio. La ventaja de la primera alternativa es que supone un gasto menor pero implica una mezcla menos homogénea. La segunda alternativa, sin embargo, es más cara pero asegura una mejor homogeneización de la mezcla bentonita-suelo. Por otro lado, esto disminuye la cantidad de bentonita necesaria (5-6 %), frente a 7-8 % para la utilizada en mezclas in situ.

Recientemente ha surgido una nueva tendencia en el diseño de barreras de impermeabilización que se basa en la fabricación de complejos bentonitas-geosintéticos (geomembranas y geotextiles). Consiste en la colocación de una barrera de arcilla compactada entre dos capas, una de geotextil y otra de geomembrana (plásticos manufacturados, como polietileno de alta densidad o polipropileno, entre otros).

La geomembrana es impermeable, mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la bentonita hinchar, ya que produce la barrera de sellado compactada.

La normativa varía de un país a otro en cuanto a los valores que tienen que cumplir las arcillas compactadas para dicho fin.

Esta utilidad de las bentonitas como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. Las bentonitas más utilizadas para ese fin son las sódicas, por tener mayor capacidad de hinchamiento.

Asimismo, se utilizan bentonitas sódicas como material impermeabilizante y contenedor en los siguientes campos:

- Como contenedores de aguas frescas: Estanques y lagos ornamentales, campos de golf, canales, etc.
- Como contenedores de aguas residuales: Efluentes industriales (balsas).
- En suelos contaminados: Cubiertas, barreras verticales.
- En el sellado de pozos de aguas subterráneas contaminadas.
- En depósitos de residuos radiactivos: Repositorios subterráneos, sellado de fracturas en granitos, etc.

Ingeniería Civil

Las bentonitas se empezaron a utilizar para este fin en Europa en los años 50, y se desarrolló más tarde en Estados Unidos. Se usa para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc.

Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad. Las bentonitas sódicas o cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso.

Los usos en este campo se pueden resumir en:

- Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones.
- Prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de bentonita.
- Protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas.
- En cementos: aumenta su capacidad de ser trabajado y su plasticidad.
- En túneles: Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3-5 % de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel). También es posible el transporte de los materiales excavados en el seno de fluidos bentoníticos por arrastre.
- En tomas de tierra: Proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados.
- Transporte de sólidos en suspensión.

Las funciones que se pueden esperar los lodos bentoníticos en el área de la ingeniería civil y en cualquiera de los diferentes sistemas de perforación son las siguientes:

- **Enfriar y lubricar el equipo de perforación**

Debe disipar el calor generado por la circulación continua o rotación continua de los equipos de perforación. Es necesario que exista un buen contacto y que el lodo tenga habilidad para humedecer. La lubricación es importante para reducir la fricción.

- **Remover cortes de suelo de la perforación**

Los factores principales que afectan la remoción de los cortes de suelo son la viscosidad y velocidad de fluido de perforación, tamaño y densidad de los cortes. La velocidad anular debe ser limitada a un máximo de 50 metros por minuto para reducir la erosión hidráulica. La viscosidad del fluido puede incrementarse para obtener una limpieza más efectiva de la perforación. La mala limpieza puede causar que el equipo se obstruya, rendimientos de penetración bajos o que cantidades grandes de sedimentos caigan al fondo de la perforación.

- **Prevenir derrumbes dentro de la perforación**

La viscosidad, peso y densidad del lodo bentonítico ayudan a la estabilización de las paredes de la perforación. Bombas de alta rendimiento causan erosión hidráulica, especialmente en formaciones no consolidadas. Algunas formaciones son sensitivas al agua, por lo que se requiere de un fluido inhibidor, el cual tendrá la tendencia de extraer agua de la formación de suelo.

- **Suspender los cortes y material pesado cuando se detiene la circulación**

La viscosidad y peso del lodo bentonítico ayudan a prevenir que los cortes y el material pesado se asienten cuando el bombeo se detiene.

- **Liberar arena y cortes de perforación en la superficie**

La viscosidad y otras propiedades del lodo bentonítico ayudan a liberar sólidos en las trampas de arena o equipos para separación de sólidos. Los sólidos pueden dañar las bombas.

- **Garantizar que la mayor cantidad de información se recupera de la perforación**

Un buen fluido de perforación (lodo bentonítico) asegura una mejor recuperación de testigos o muestras de suelo, para que puedan ser analizadas debidamente.

- **Controlar presiones internas del suelo**

Controlando el peso del lodo bentonítico, se pueden controlar las altas presiones producidas por fluidos (agua, gas o petróleo) en formación, que pueden ocasionar problemas de pérdida de circulación.

- **Prevenir daños a formaciones permeables**

Los lodos bentoníticos pueden ser utilizados para prevenir que se sellen o se dañen las zonas permeables, para lo cual se puede utilizar lodos bentoníticos biodegradables.

- **Minimizar vibraciones de las cabezas de rotación**

Mediante la variación de las características del lodo bentonítico se pueden reducir los efectos de la vibración.

Los lodos bentoníticos han sido utilizados en el campo de la construcción en infinidad de proyectos en todo el mundo, donde ha probado ser bastante eficiente.

A continuación se describen los sistemas de construcción donde más se utilizan los lodos bentoníticos:

1. Perforación de Túneles

Soporta las paredes al formar una película denominada Cake o película resistente (se define más adelante) para transferir las presiones hidrostáticas. Los lodos bentoníticos sellan los

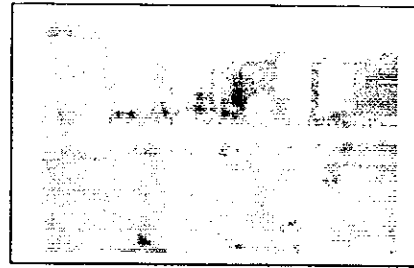


flujos de agua que, bajo condiciones normales, no permitirían la realización de los trabajos.

2. Inyecciones de suelo

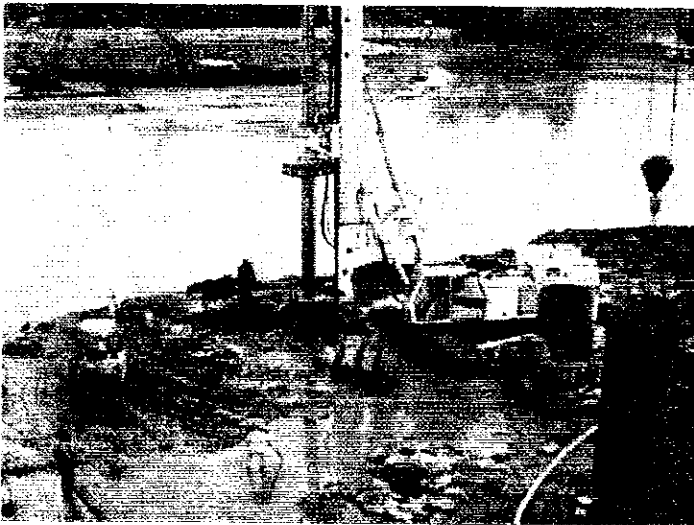
La tecnología de inyecciones de suelo es el método más antiguo para sellar el suelo. Este sistema fue desarrollado por Berigny en el año 1,802. Se convirtió en un sistema muy popular en los años de 1920 a 1930 para la construcción de presas.

Desde 1950, añadir bentonita a los materiales de inyección dio como resultado cemento estabilizado. Cuando se añade bentonita, se mejora las siguientes características: estabilidad, homogeneidad y los efectos de sellar el material inyectado.



3. Perforaciones verticales

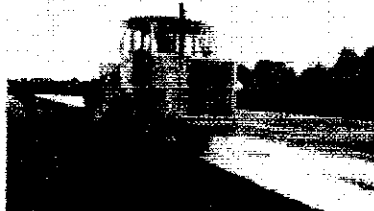
Las perforaciones verticales son mayormente utilizadas para la construcción de cimentaciones profundas. Cuando las condiciones del suelo no son estables, es necesario estabilizar las paredes de la perforación por medio de la utilización de tubería o de lodos bentoníticos.



4. Selladura del suelo

La función principal de la bentonita o de la arcilla fina que es usada para una variedad de materiales para sellar es la de reducir la permeabilidad del suelo.

Durante muchos años y en varias tecnologías para sellar o impermeabilizar, la bentonita ha demostrado su potencial en incrementar los efectos de sellar el suelo.



5. Perforaciones horizontales

El método de las perforaciones horizontales fue desarrollado en los Estados Unidos de Norteamérica donde se utilizó en las perforaciones de petróleo. Dicha tecnología fue introducida a Europa entre 1,980 y 1,990.

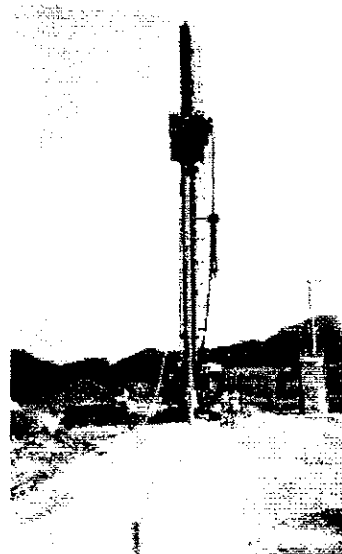
La función principal del lodo bentonítico de perforación es la de proteger la perforación una vez removido el material, ya que, dependiendo del tipo de suelo, existe la posibilidad de que el suelo no sea estable y que se derrumbe.



6. Tabla-estaqueado

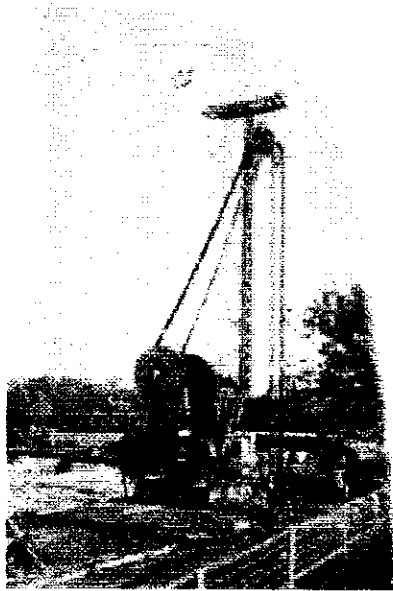
La tabla-estaca es un método para sellar bastante económico, tanto para trabajos en agua como en suelo. Este método es mayormente utilizado en excavaciones, presas, y en rellenos.

Para obtener verticalidad, cuando se remueve la tabla-estaca del suelo, la cavidad remanente se rellena con una mezcla de cemento-bentonita, que rellena los espacios vacíos dejados por la tabla-estaca.



7. Muro colado

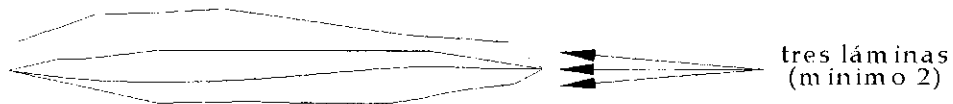
Este sistema se utiliza para construir muros de sótanos o edificaciones en el suelo antes de realizar la excavación, evitando así derrumbes que puedan ser provocados por los empujes activos del suelo. Este sistema es bastante utilizado en zonas donde existen edificios y en la construcción de metros.



II. DEFINICION DE BENTONITA

A. Propiedades

La bentonita está compuesta por arcillas coloidales de origen volcánico que contienen gran cantidad de una arcilla muy particular denominada montmorillonita. Todas las arcillas se componen de silicatos de aluminio hidratados que se distinguen por su tipo de cristalización particular que dota al producto sus características. La bentonita se presenta en forma de pequeñas láminas, mientras que el cemento se presenta en grano. Cada lámina está constituida a su vez por dos o varias láminas (Soletanche-Bachy France, 1980).



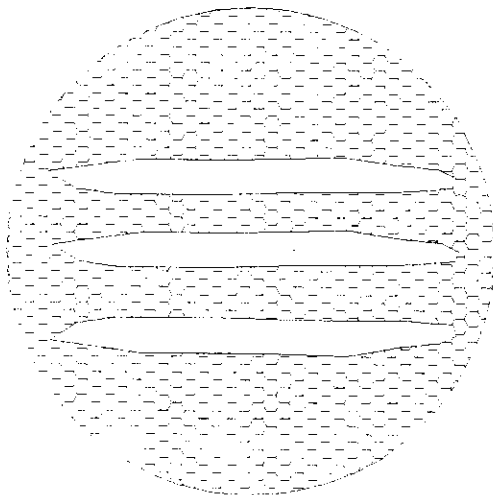
La montmorillonita posee una estructura que se compone de una zona de intercambio que se encuentra en medio de dos hojas de silicatos. En la montmorillonita existe una sustitución isomórfica de magnesio y hierro por aluminio en las hojas de los octaedros. Estas características de su estructura atraen gran cantidad de agua entre los planos. Las partículas de montmorillonita tienen una dimensión lateral de 1,000 a 5,000 Å y un espesor de 10 a 50 Å. La superficie específica es de aproximadamente de 800 m²/gr.

Bajo esfuerzos electrostáticos, el agua se fija sobre cada placa de bentonita y sobre todo se interpone entre las mismas.



Placas de bentonita seca

En función de su calidad, la bentonita puede fijar de 10 hasta 100 veces su peso en agua.

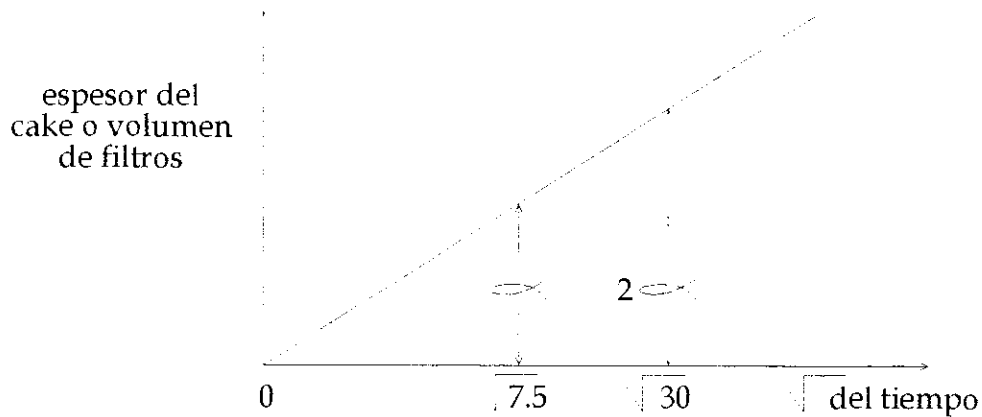


Placas de bentonita hidratada

Bajo el esfuerzo de la presión, las placas de bentonita hidratadas se adhieren al terreno, las moléculas de agua fijadas alrededor de las placas se hunden en el terreno y poco a poco, una franja de lodo más espesa se forma con base en ese contacto. Sólo quedan en las placas las moléculas de agua más cercanas, en las cuales las fuerzas eléctricas son las más fuertes (Soletanche-Bachy France, 1980).

Esta franja se comporta entonces como una película de estanqueidad que impide más pérdidas de agua y que permite a la presión de ejercer un esfuerzo sobre los lados de la excavación y asegurar su sostenimiento. La película que se forma se llama película resistente o "cake" y al agua que sale de éste se llama filtrado (*de aquí en adelante a la película resistente se le llamará cake*). Según pruebas de

laboratorio efectuadas por empresas francesas, se verificó que el espesor del cake y el volumen del filtrado es una función lineal de la raíz del tiempo. Se pudo verificar también que el espesor es una función lineal del logaritmo de la presión (Soletanche-Bachy France, 1980).

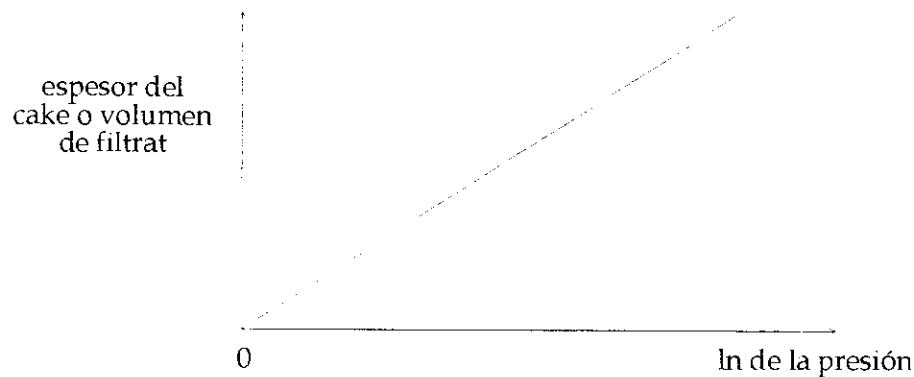


La pendiente de esta función depende esencialmente de:

- la profundidad de la excavación
- la diferencia de nivel entre el lodo y la capa freática
- la densidad del lodo

La presión por ende depende de:

- la calidad de la bentonita
- la dosificación del lodo
- la contaminación del lodo
- la edad del lodo



Ya que de este espesor depende la estanqueidad del cake y para el buen sostenimiento de la perforación, deberá siempre mantenerse el nivel del lodo al máximo. En obra se mide el espesor del cake y el volumen del filtrado con el aparato llamado Filtropress.

Bajo una presión de 7 Kg/cm^2 y después de 30 mm, un buen lodo debe tener un filtrado de 17 hasta 30 cm^3 . Es difícil decir a qué espesor el cake corresponde el volumen de filtrado, pero un buen cake debe tener un espesor milimétrico entre 2 a 5 mm (Soletanche-Bachy France, 1980).

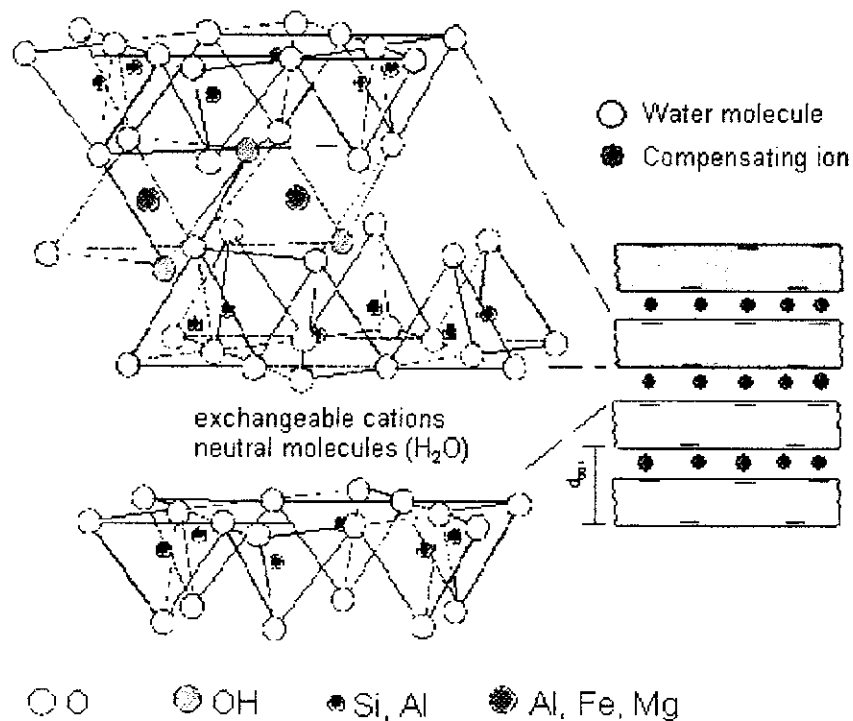
El lodo debe, por consiguiente, ser muy limpio para asegurar la estanqueidad con un espesor mínimo del cake. Lo que más influye en el espesor es la contaminación del lodo y las cargas en suspensión en el lodo.

El espesor es importante por lo siguiente:

Cuanto más espeso es el cake, más importante es el volumen de agua que se escapa del terreno hacia la perforación, lo que ocasiona daños al terreno.

En efecto, esta agua modifica las características mecánicas del terreno, especialmente en la parte situada por arriba del nivel freático, y puede provocar un derrumbe.

Cuanto más espeso es el cake, más oportunidades de romperlo tiene la almeja o cualquier instrumento de perforación, y más se ensuciarán las armaduras de acero durante la colocación y se tendrán más riesgos de mezcla con el concreto durante el fundición.



1. Tixotropía

Es una propiedad que posee el lodo de bentonita de tener una especie de fraguado cuando está en reposo. Con una pequeña agitación el falso fraguado se rompe y el lodo vuelve a su estado anterior. Si se deja de nuevo el lodo en reposo, el falso fraguado se produce otra vez. Esta propiedad resulta de fuerzas electrostáticas que se produce entre una placa de bentonita y otra.

Esta propiedad que no se puede medir en la obra, nos sirve porque se opone a la circulación cuando la velocidad es muy lenta, como sucede en las gravas abiertas y mejora el sostenimiento de una perforación durante una interrupción de excavación, pero por otra parte nos molesta porque se opone a la decantación.

2. Viscosidad

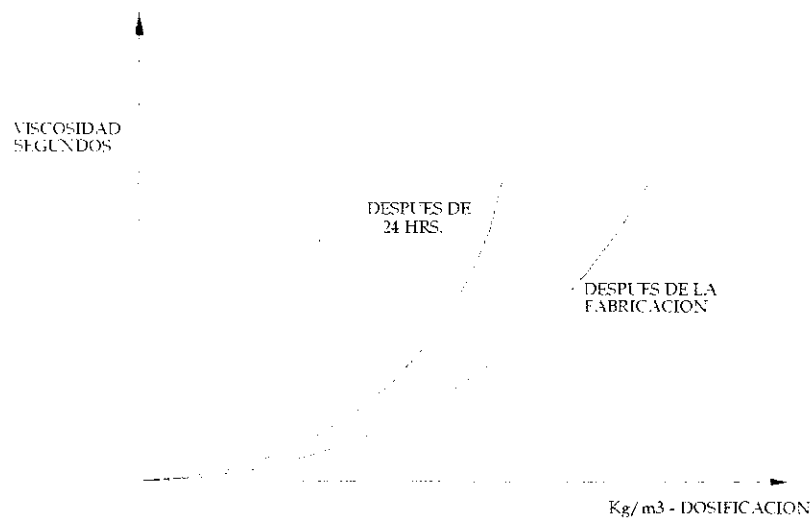
Es la facilidad o la dificultad que tiene un producto para moverse. Por ejemplo, el aceite que es más liviano que el agua es más viscoso, por el contrario, la gasolina más liviana que el aceite es menos viscosa.

La viscosidad se mide con el viscosímetro Marsh. El ensayo de la viscosidad consiste en llenar el embudo de lodo bentonítico hasta llegar a un marca que se indica en la parte superior del embudo, tapando el agujero inferior para evitar que se salga el lodo. Luego se deja caer el lodo bentonítico del embudo en un recipiente que posee una marca de un litro. Se toma el tiempo que tarda en llenar 1 litro. El agua tiene una viscosidad de 28 segundos, por lo que se recomienda que la viscosidad de un lodo sea de $30 < U < 60$. Generalmente para cualquier proyecto se busca una viscosidad de: $35 < U < 45$ (Soletanche-Bachy France, 1980).



La viscosidad de un lodo depende de la calidad de la bentonita, su dosificación y de la edad del lodo. En efecto, mientras más viejo es un lodo, más hidratación se produce entre las láminas y por lo tanto la bentonita se hincha más.

Para un mismo producto, tenemos las siguientes curvas:



Se puede decir aproximadamente que la velocidad es una función lineal del tiempo. Debemos tratar siempre de trabajar con un lodo que tenga más de 24 horas.

La viscosidad del lodo permite disminuir las pérdidas en un terreno abierto, sin embargo aumenta las pérdidas de cargas en los sistemas desarenadores y frena la barrena o almeja dentro de la excavación. Por este motivo, siempre se debe intentar trabajar con un lodo poco espeso (del orden de 35 seg.) en terrenos de poca permeabilidad y con un lodo viscoso del orden de 45 seg. en los terrenos abiertos.

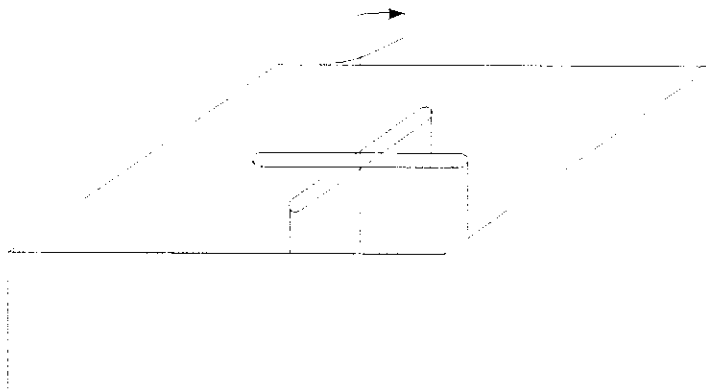
Con un lodo poco espeso (de baja dosificación) se puede observar una decantación del mismo, con aparición de agua en la superficie, lo que significa que el producto no es estable; esta agua se llama agua libre.

Siempre se debe tratar de trabajar con un producto estable, ya que la decantación debe ser inferior al 2% después de 24 horas (la decantación depende de la forma del recipiente, la prueba se debe hacer en una probeta de 1 litro).

Un lodo inestable provoca un derrumbe en la parte superior de la excavación, arriba de la capa freática debido a las modificaciones de las características del terreno por el aporte de agua libre.

3. Rigidez de un Lodo

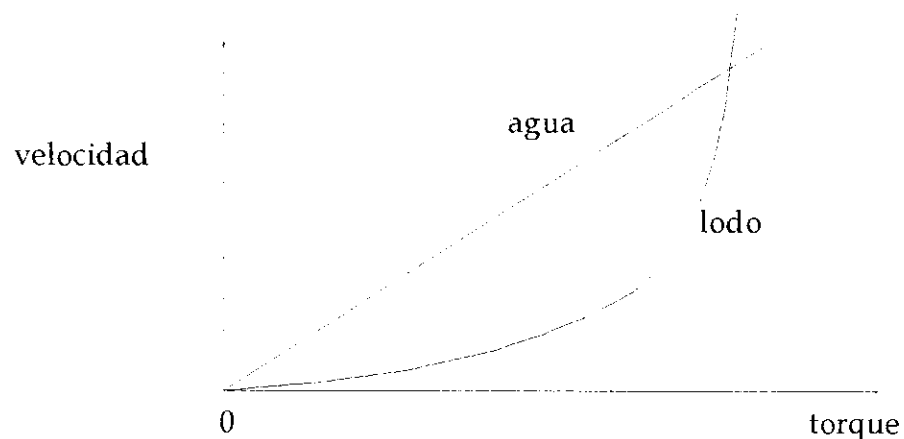
La rigidez es la resistencia al cizallamiento.



Si colocamos un aparato de cizallamiento en un tanque de agua, como lo muestra el dibujo, se entiende fácilmente que el torque necesario para girar el aparato depende esencialmente de la velocidad con la cual se hace girar el aparato (Soletanche-Bachy France, 1980).

Si hacemos la misma prueba en un lodo antes de que se materialice el fenómeno de tixotropía, se puede verificar que hasta un cierto valor del torque no hay movimiento (Soletanche-Bachy France, 1980).

Midiendo este esfuerzo, se realizan las siguientes curvas:



Este fenómeno explica que podemos tener en el lodo sedimentos de mayor densidad que el lodo mismo y que no decantan. Esta propiedad de la bentonita presenta una desventaja para desarenar el lodo, pero por otra parte limita las pérdidas (Soletanche-Bachy France, 1980).

4. Densidad

La densidad aparente de la bentonita es de 0.8 hasta 1 gr/cm³ y su peso específico es de 2.6 gr/cm³.

- La densidad teórica de un lodo se calcula de la siguiente manera:

$$D \text{ lodo} = \frac{P+1000}{(1000+\frac{P}{2.6})}$$

P: Peso de la bentonita en Kg. Mezclada con 1000 litros de agua.

El volumen de la mezcla es : $1000 + \frac{P}{2.6}$

- El volumen de agua que se debe añadir a un saco de 50 kg de bentonita para obtener un lodo de densidad d es:

$$V = \frac{50 - 19.23d}{d - 1}$$

- El peso de la bentonita que está dentro del 1 m^3 de lodo de densidad d es:

$$P = \frac{1000d - 1000}{0.615}$$

Los gráficos dan una idea de la densidad de un lodo normal después de la fabricación.

Durante la excavación, el lodo se carga con los finos del terreno y por consiguiente aumenta la densidad y el espesor del cake, lo que perjudica todavía más el vaciado. Cuanto menor sea la diferencia de densidad entre el lodo y el concreto, tenemos posibilidades de mezcla entre el cake y el concreto.

No se debe utilizar un lodo nuevo que tiene más de 1.025 gr/cm^3 de densidad. Tampoco se debe disminuir la densidad de un lodo al añadirle agua. Esta agua no será absorbida por la láminas de bentonita, puesto que ya todas las uniones eléctricas están ocupadas.

Lo mejor es dejar ese lodo y luego añadir un lodo nuevo menos viscoso pero estable, pero debido a su rigidez algunas veces no hay otra solución que la de botar el lodo demasiado espeso.

5. PH de un lodo

Todas las calidades de la bentonita se deben a fenómeno electrostáticos. Se pudo verificar que estos fenómenos se comportan de la mejor manera cuando el pH del lodo es del orden de 9.

Para trabajar de una manera correcta, siempre se debe tener un lodo con un pH entre $8 < \text{pH} < 10$.

Un lodo con un $\text{pH} < 8$ es muy fluido y decanta. Un lodo con un $\text{pH} > 10$ tiene floculación.

De manera general, un lodo nuevo tiene un pH del orden de 9, pero en el terreno, este pH puede cambiar (acidificaciones de terreno por las aguas cloacales o presencia de cemento).

6. Contenido de arena

Durante el trabajo de excavación el lodo se carga de arena. Esta arena, al finalizar la excavación, se decanta en la perforación y forma un colchón en el fondo. Para asegurar la capacidad portante del pilote, muro colado, barreta o cualquier otra estructura se necesita sacar la arena de la perforación antes de proceder a la fundición.

La primera operación necesaria es la de limpiar todo el fondo de la perforación. Se debe sacar después toda la arena que está en suspensión en el lodo. Esta operación se llama reciclaje, la cual consiste en bombear el lodo que está en la perforación y sustituirlo por un lodo limpio.

B. Calidades

La calidad de la bentonita depende de la homogeneidad del depósito de donde se extrae. La bentonita debe estar compuesta predominantemente por montmorillonita sódica, que es silicato de aluminio en capas.

Un indicador de la calidad de la bentonita es la viscosidad, ya que la cantidad de bentonita que se debe mezclar con 1 metro cúbico de agua para obtener un lodo bentonítico, con una viscosidad de 40 segundos, es lo que nos indica qué tan buena es la bentonita que estamos utilizando. Normalmente se usa aproximadamente entre 25 y 35 kilogramos de bentonita para obtener una viscosidad de 40 segundos.

La bentonita que se utilice debe ser estable. La decantación debe ser inferior al 2% después de 24 horas.

C. Tipos de Bentonita

- **Bentonita de calcio (bentonita no activada):** Bentonita que contiene esmectitas, que son predominantemente ocupadas con iones de calcio (Ca^{2+}) o magnesio (Mg^{2+}) en las capas intermedias.
- **Bentonita activada (bentonita activada):** Bentonita que contiene esmectitas, las cuales poseen una composición inicial de cationes alcalinos del suelo y son cambiados por iones de Na^+ en un proceso técnico llamado Activación Alcalina.
- **Bentonita de sodio natural (bentonita de Wyoming, también encontrada en otros lugares):** Bentonita con esmectitas que son predominantemente ocupadas por iones de Na^+ en las capas intermedias.
- **Bentonita orgánica (Arcilla orgánica):** Bentonita que en las capas intermedias, los cationes han sido sustituidos por moléculas polares

orgánicas (por ejemplo: iones amonio-alcalinos). Estos son hidrofóbicos y son solubles en solventes orgánicos.

- **Bentonita activada ácidamente (Bleaching earth/Fuller's earth):** Bentonita que sus esmectites han sido parcialmente disueltas en tratamientos con ácidos. Tienen una superficie larga y poseen microporos de gran volumen.

Las bentonitas descritas en los primeros tres incisos son relevantes para la industria de la construcción (Baroid, 1980).

Minas de bentonita

La mina Angeria en la isla Milos, en Grecia, es una de las minas más grandes del mundo (Baroid, 1980).



Proceso por medio del cual la bentonita es removida de su depósito natural y cargada en volquetas para ser transportada a la planta para ser preparada.

A continuación se hace referencia a algunos productos que distribuye la empresa **Baroid Industries, Inc.**, que es la más grande del mundo:

HOLEPLUG®

La bentonita graduada HOLEPLUG® es una arcilla de ocurrencia natural que se utiliza para sellar y taponar agujeros perforados. La arcilla es una bentonita de Wyoming a base de sodio (montmorillonita) que posee la característica específica de expandirse en agua dulce. La bentonita graduada HOLEPLUG se extrae de depósitos que tienen la habilidad de expandirse a una velocidad lenta controlada. La bentonita HOLEPLUG descenderá a través de una columna de agua en reposo y llegará fácilmente al fondo del agujero antes de que comience la hidratación o hinchamiento en el agua. Puede lograrse un llenado completo del espacio anular, y esto actúa para impedir la acumulación de las partículas en la parte superior de la parte superior del agujero. El llenado completo es un requerimiento para la formación de un buen tapón (Baroid, 1980).

EZ-MUD®

EZ-MUD® es una emulsión polimérica aniónica de líquido blanco rápidamente soluble en agua dulce o salobre. EZ-MUD puede utilizarse para preparar un fluido de perforación sin sólidos con propiedades excepcionales de estabilización del agujero, o para mejorar las propiedades de los fluidos QUIK-GEL® de bajo contenido de sólidos y fluidos de inyección de aire/espuma. Los fluidos de perforación EZ-MUD son aplicables a todo tipo de operaciones de perforación, incluyendo pozos de agua, extracción de núcleos de diamante, exploración de minerales, agujeros de disparo de sismógrafo, agujeros para voladura, agujeros de control/observación, investigaciones de suelos y cimientos y pozos de eliminación/inyección (Baroid, 1980).

ENVIRO-TORQ®

ENVIRO-TORQ® es un lubricante líquido que se emplea en fluidos de perforación, es una mezcla de triglicéridos y alcoholes. Primordialmente se utiliza para reducir el torque entre la tubería de perforación y la pared del pozo durante la rotación de la tubería (Baroid, 1980).

DRILLFOAM®

DRILLFOAM® es un líquido biodegradable (surfactante aniónico) utilizado como agente espumoso. Este producto aumenta la eficacia del flujo de aire en la limpieza del pozo (acarreo y recortes). Proporciona una técnica de perforación en zonas de pérdida crítica de circulación. Combate la tendencia pegajosa de arcillas húmedas y ayuda a minimizar el anillado de lodo. Mejora la calidad de la bentonita y recuperado de recortes (Baroid, 1980).

BARIOD® BENTONITE PELLETS

Las tabletas BARIOD® BENTONITE PELLETS son bentonita Wyoming de alta calidad compuesta principalmente de montmorillonita sódica. El agente de sellado y taponamiento se fabrica con bentonita de alto rendimiento que ha sido procesada sin polímeros orgánicos u otros aditivos. No incluye ningún relleno o agente adulterante. Las tabletas se moldean a presión para formar tabletas duras, la cual facilitan su colocación en los agujeros de pozos. La configuración de tableta endurecida sin recubrimiento de polímeros a agentes de liberación de moldeo, retarda la característica de hinchamiento de la bentonita durante un período suficientemente largo para permitir la colocación en los pozos de sondeo (Baroid, 1980).

AGUAGEL GOLD SEAL®

La bentonita de alto rendimiento de primera calidad AQUAGEL GOLD SEAL® se extrae de depósitos ubicados en Wyoming. La bentonita AQUAGEL GOLD SEAL no contiene aditivos poliméricos o tratamientos químicos de ninguna clase. Sólo la bentonita de más alta calidad se utiliza para este producto. AQUAGEL GOLD SEAL está compuesta predominantemente de montmorillonita sódica (silicato de aluminio en capas) y es una arcilla de ocurrencia completamente natural. Se utiliza para mejorar la capacidad del fluido para limpiar el agujero, reducir el paso o filtración de agua hacia formaciones permeables, formar rápidamente una torta de filtro delgada con baja permeabilidad, promover la estabilidad del agujero en

formaciones de poca consolidación, y para impedir la pérdida de fluidos a zonas de pérdida de circulación (Baroid, 1980).

QUIK-GEL®

QUIK-GEL es una bentonita sódica de origen occidental, de primer grado y fina molienda. Está especialmente procesada para proporcionar facilidad de mezclar y calidades superiores para la preparación de lodos en agua fresca. Aumenta la capacidad de limpieza del pozo. En las secciones permeables, forma una delgada costra de filtración en la pared del pozo que se quita fácilmente por medio de un contralavado. Proporciona estabilidad del pozo en formaciones mal consolidadas y susceptibles a derrumbes. Reduce el escape de agua hacia formaciones permeables. Evita o impide pérdidas de circulación (Baroid, 1980).

D. Lodos bentoníticos especiales

1. Lodos biodegradables

Para usos particulares se necesita un lodo que desaparezca en el tiempo, por ejemplo para ejecutar muros drenantes o pozos de bombeo. Por eso existen en el mercado, lodos artificiales que son a base de polímeros, tal como el lodo Revert. Son productos caros y su utilización se debe hacer según las especificaciones del fabricante (Baroid, 1980).

2. Lodo de bentonita con un incremento de densidad

En caso de capa freática artesiana podemos aumentar la densidad del lodo. Eso se puede lograr con una carga de baritina. Es un polvo blanco o rosado muy pesado y muy fino que permite obtener densidades hasta de 2 gr/cm³ (Soletanche-Bachy France, 1980).

En tal caso la densidad del concreto debe ser incrementada para tener siempre una diferencia de 1 punto entre la densidad del lodo y la densidad del concreto (Soletanche-Bachy France, 1980).

E. Casos especiales y tipos de aditivos (contaminación-solución)

1. Contaminación química del lodo

Las contaminaciones del lodo pueden tener varios orígenes:

- El terreno mismo que se está excavando.
- El agua que está en el terreno (circulaciones o agua de la capa freática).
- El concreto

De esta manera general, podemos distinguir 4 contaminantes principales que son:

- El yeso y la anidrita
- El agua de mar
- Las aguas cloacales
- El concreto

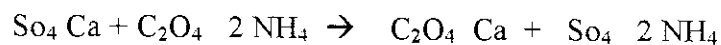
Tenemos siempre la posibilidad de determinar el origen de una contaminación por las diversas pruebas que podemos hacer al lodo.

2. Contaminación por el yeso y la anidrita (Soletanche-Bachy France, 1980)

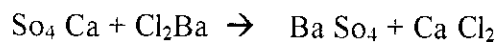
Se efectúa por:

- Aumento de la viscosidad y la floculación en los tanques
- Aumento neto hasta importante del filtrado.
- pH sin cambio o que baja un poco

Para averiguarlo, se coloca en el lodo algunas gotas de una solución de oxalato de amonio que debe dar un precipitado blanco.



La adición de algunas gotas de una solución de cloruro de bario da también un precipitado blanco.



Tratamiento:

Esta contaminación se puede tratar con:

- Hexametáfosforo de sodio $6(\text{PO}_3 \text{ Na})$
- Pirofosfato ácido de sodio $\text{P}_2 \text{ O}_7 \text{ Na H}_2$
- Carbonato de soda
- Taninos (quebracho, mimosa, manglar)

(En caso de tratamiento con los taninos, se prepara anteriormente una solución de tanino y de soda 5/1 hasta 2/1 que se mezcla al lodo)

3. Contaminación por aguas de mar (Soletanche-Bachy France, 1980)

Esta contaminación se manifiesta en:

- Aumento en la viscosidad
- Aumento muy importante en el filtrado
- Disminución del pH

Tratamiento:

- Taninos y fosfatos

(El pH debe quedarse entre $8 < \text{pH} < 10$)

4. Contaminación por el concreto (Soletanche-Bachy France, 1980)

- Aumento de la viscosidad
- Aumento del filtrado y del cake
- Aumento muy importante del pH
- Floculación del lodo

Tratamiento:

- Lo más fácil es el bicarbonato de sodio (2 Kg/m^3)
- Hexametáfosfato de sodio

5. Contaminación por las aguas cloacales (Soletanche-Bachy France, 1980)

Las aguas cloacales tienen frecuentemente un $\text{pH} < 7$ y transportan varios tipos de iones. De esta manera cada contaminación es un caso particular en sí. Sin embargo, los problemas que pueden provenir de la acidez del agua, se manifiestan por:

- Disminución de la viscosidad
- Decantación del lodo y agua libre
- Aumento en el filtrado
- Disminución del pH

Tratamiento:

- Carbonato de sodio
- Soda cáustica

	Yeso o Anidrita	Agua del mar	Concreto o cemento	Aguas cloacales
Filtrado	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Viscosidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Densidad	No afecta	Aumenta un poco o igual	No afecta	No afecta
PH	Disminuye un poco o igual	Disminuye un poco o igual	Aumenta	Disminuye
Floculación	hay	No significativo	hay	No significativo
Decantación	No significativo	No significativo	No significativo	hay

	Filtrado	Viscosidad	pH	
Soda cáustica	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Aguas cloacales
Bicarbonato de soda	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Concreto
Bicarbonato de soda	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Agua de mar, yeso y anidrita
Taninos	Disminuye	Disminuye		
	Disminuye	Disminuye	Aumenta	

6. Tipos de aditivos para los lodos bentoníticos

Aditivos para control de alcalinidad y pH:

Son productos designados a controlar el grado de acidez o de alcalinidad de los lodos bentoníticos.

Bactericidas:

Su función principal es la de reducir el conteo de bacterias.

Remoción de calcio:

Químicos designados a prevenir y componer los efectos causados por la anidrita y el gypsum. Las formaciones de sulfato de calcio pueden afectar la efectividad de cualquier lodo bentonítico sin la utilización de químicos que traten las formaciones de calcio.

Inhibidores de corrosión

Son aditivos que minimizan el porcentaje de corrosión del equipo de perforación. Un buen lodo bentonítico que contenga una cantidad adecuada de coloides, lodos de emulsión y lodos aceitosos, son apropiados para prevenir la corrosión.

Desespumantes

Productos diseñados para reducir la acción de la espuma, particularmente la que ocurre en agua salobre y en lodos saturados de agua salada.

Emulsores

Químicos que crean una mezcla heterogénea entre dos líquidos.

Reductores del filtrado

Reductores de filtrado o de pérdida de fluidos sirven para prevenir la pérdida del filtrado, siendo ésta una medida de la tendencia del líquido de un lodo bentonítico a pasarse a la formación de suelo.

Floculadores

Estos son utilizados algunas veces para que las partículas coloidales en suspensión se agrupen en flóculos y floten a la superficie.

Agentes espumantes

Estos son comúnmente químicos que también actúan como agentes activos en la superficie para que formen espuma en presencia de agua.

Materiales para pérdida de circulación

Casi cualquier producto ha sido utilizado para detener o disminuir la pérdida de circulación. Este lodo bentonítico debe ser diferenciado del lodo para pérdida de filtración y el que se pierde en las paredes en la formación del Cake, que es un proceso continuo en una perforación abierta.

Lubricantes

Lubricantes de alta presión son designados a reducir el torque para aumentar los caballos de fuerza de la máquina de perforación mediante la reducción del coeficiente de fricción.

Inhibidores para control de esquistos

Son productos para controlar cavidades por desintegración de formaciones de esquistos.

Agentes activos superficialmente

Reducen la tensión interfacial entre las superficies en contacto (agua/aceite, agua/sólido, agua/aire, etc.).

Solventes, dispersantes

Estos químicos modifican la relación entre viscosidad y el porcentaje de sólidos en el lodo bentonítico y pueden ser posteriormente utilizados para variaciones en la fuerza del lodo, al incrementar la facilidad de bombeo del lodo, etc. El propósito principal de los solventes es el de funcionar como defloculantes para combatir formaciones de partículas arcillosas.

Aditivos para viscosidad

Son productos que aumentan la viscosidad del lodo bentonítico.

Materiales de peso

Son productos que poseen una gravedad específica alta, que son utilizados para controlar presiones altas provenientes de la excavación, como lo pueden ocasionar ríos subterráneos.

F. Rendimiento

El rendimiento de una bentonita se determina en el peso de bentonita que se debe añadir a 1 m³ de agua para obtener una viscosidad de 40 segundos después de 24 horas (con agua a 20 grados centígrados). Se expresa en Kg por m³. Este factor es de suma importancia en la economía de los proyectos de construcción, por lo que deben realizarse pruebas antes de la compra de la bentonita. En términos generales, cualquier bentonita se considera de buen rendimiento si al añadirse entre 25 y 35 kilogramos de bentonita a 1 m³ de agua se obtiene una viscosidad de 40 segundos. Hay que tomar en cuenta que entre menos bentonita haya que añadir, más caro puede ser el producto, por lo que se necesita realizar un estudio de costo-beneficio

para saber qué bentonita es la que conviene utilizar. La calidad de la bentonita depende básicamente del lugar de donde procede.

El rendimiento depende también del estado en que se encuentra el equipo, ya que cuando se descompone alguna bomba o en el peor de los casos la mezcladora o la máquina desarenadora, es casi seguro que se va a perder bastante lodo bentonítico, que aún se encontraba en buen estado, ya que por deficiencia del sistema no se pudo reciclar.

III. PROCESO DE DESARENADO

A. Manejo de los lodos

En el caso de pequeñas obras muy concentradas, la alimentación del lodo en la excavación puede ser asegurada por la sobrecarga del lodo en los silos, pero en una obra grande o cuando el lodo está almacenado en tanques o piscinas, una bomba de alimentación es necesaria. En este caso se debe escoger preferiblemente una bomba sumergible tipo CS que funcione permanentemente con una descarga.

En el caso de obras importantes o de gran tamaño, la tubería de alimentación se ubica alrededor de todo el perímetro de la zona de trabajo, en la cual se colocan conexiones tipo T a cada 50 metros para los ramales de alimentación. En este caso se debe dejar la posibilidad de colocar bombas en serie para evitar las pérdidas de carga. Esto se hace para optimizar el tiempo de ejecución de los trabajos, ya que es bastante tardado cambiar la distribución de tuberías.

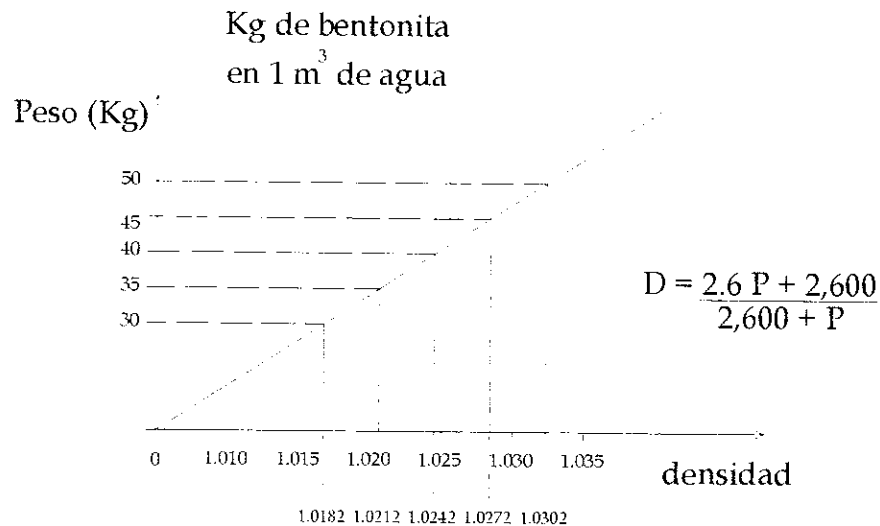
B. Preparación

- Cuando la bentonita se presenta en sacos, se intenta siempre hacer la mezcla por cada saco de bentonita, variando el volumen de agua. De aquí se debe tomar la bachada de lodo, que no es más que el volumen total de lodo bentonítico que se tiene al final del proceso. Esto sirve de referencia para obtener la cantidad exacta de agua que se debe colocar en el mezclador de bentonita. Se debe tratar de proporcionar volúmenes de agua fáciles de medir, ya que de lo contrario en el campo se vuelve tedioso la medición de cada bachada.
- En el caso de bentonita a granel, se necesita llegar al volumen del lodo máximo que el equipo pueda contener de una sola vez, de manera que se prolongue el tiempo de agitación de cada mezcla (mínimo 5 minutos).
- Se intentará utilizar siempre una mezcladora con una turbina defloculante.

- Se debe siempre prever una capacidad de producción diaria de lodo igual al doble del volumen que se debe excavar por día.

1. Dosificación del lodo

Dependiendo de la calidad de la bentonita, la dosificación del lodo bentonítico se determina de la siguiente manera:



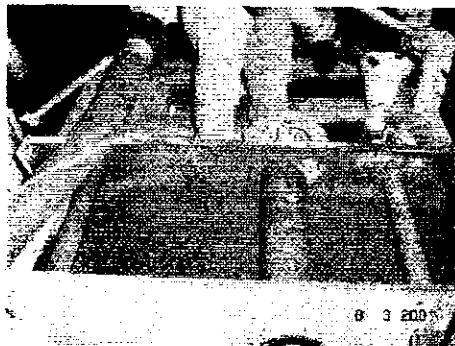
(Soletanche-Bachy France, 1980)

La dosificación depende del rendimiento que se obtenga, es decir, se necesita saber cuántos kilogramos de bentonita se necesitan para hacer 1 metro cúbico de lodo que tenga una viscosidad de por lo menos 35 segundos.

C. Desarenado

El lodo que se saca de la excavación va a la planta desarenadora. En esta planta, por un tratamiento mecánico, el lodo se limpia de la siguiente manera:

- Pasa a través de un tamiz en el cual los elementos más gruesos son detenidos.



- Una bomba de alta potencia manda después el lodo a un ciclón. En este aparato, la fuerza centrífuga separa la arena más fina.

Para su limpieza correcta, un lodo necesita dar varias vueltas en el ciclón.

Para bombear el lodo que está en la perforación existen tres métodos:

- Con una bomba superficial
- Con el procedimiento Air Lift
- Con una bomba sumergible

El aparato que permite averiguar el contenido de arena se llama elutriómetro.

De manera general, la porción de arena contenida en una perforación debe ser inferior a 5% para proceder con la fundición.

En función de la profundidad de la perforación, se pueden exigir valores menores (gran profundidad).

Se debe evitar mandar directamente el lodo hasta la planta de reciclado, cuando la distancia entre la planta y la perforación es mayor de 200 metros con la bomba de reciclado (Toyo dentro de la perforación o PDM 3 de superficie). En efecto, este lodo muy denso y viscoso engendra pérdidas de carga importantes que frenan el caudal de la substitución del lodo en la perforación y aumenta por eso el tiempo de reciclado.



D. Desecho del lodo

La localización de la zona de trabajo es primordial para el desecho del lodo. Existen varios procedimientos utilizados a nivel mundial que son aceptables para realizar este proceso.

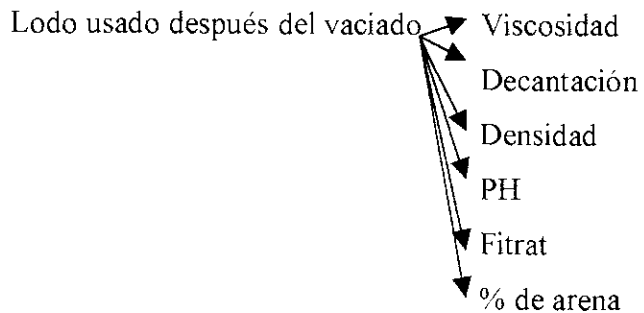
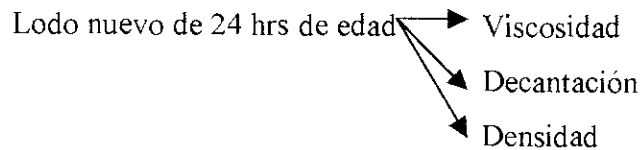
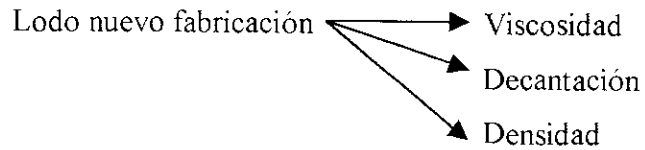
El procedimiento correcto para desechar la bentonita es el de bombear el lodo dentro de pipas o tanques para que luego sea transportado a un relleno sanitario o a un basurero municipal. Debido a sus propiedades tixotrópicas, el lodo bentonítico tiende a formar un falso fraguado, que puede ser útil para controlar los malos olores que despiden los basureros.

Otra manera de desechar los lodos de perforación es depositándolos por medios mecánicos en vertederos de suelos o escombros.

IV. CONTROL DE LODOS EN OBRA

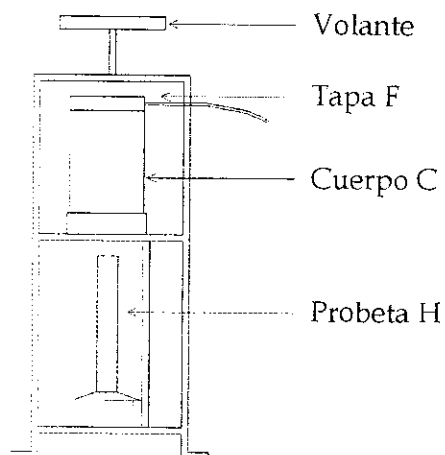
Para obtener los resultados esperados por parte del lodo bentonítico, es necesario tener controles en las obras cuando se fabrica el lodo, después de 24 horas y después de el vaciado (si se da el caso).

A. Lista de controles



1. Prueba de filtrado al utilizar la prensa Baroid

FILTRO PRENSA BAROID



Descripción del aparato:

- 1 pequeño tanque de 700 cm³ debajo del cual se coloca un soporte, un tamiz, un papel filtro y una junta.
- Este conjunto se coloca en un cuadro que comporta un volante y que permite apretar el apilamiento anteriormente definido.
- Una llegada de aire con una llave de paso
- Una pequeña probeta

Uso:

- a) Colocar el soporte en el tamiz, el papel filtro y la junta en la parte inferior del tanque.
- b) Apretar el conjunto (con la mano) y llenar el tanque de lodo hasta 5 mm del borde.
- c) Poner la tapa F, con su junta, en el tanque y el conjunto en el cuadro. Apretar con el volante G.
- d) Empalmar el conducto de aire y regular la presión a 7 kg manteniendo la llave cerrada.
- e) Colocar la probeta por debajo del tanque y ponerla en presión.
- f) Después de 30 mm anotar el volumen de agua que aparece en la probeta, y parar la llegada de aire.
- g) Desarmar el aparato y recuperar con cuidado el papel filtro sin quitar el pastel que está encima.
- h) Medir el espesor del pastel. Este espesor es el del cake.

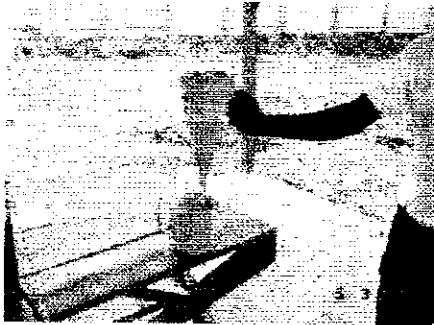
Observaciones:

- Se puede hacer una medida del volumen de agua a 7.5 mm. Este valor es la mitad de lo que se va a encontrar a 30 mm.
- Se debe controlar que durante el ensayo, la presión se mantenga a 7 kg.
- Se debe usar un papel filtro nuevo para cada operación.

2. Prueba de viscosidad al utilizar el cono de Marsh

Descripción del aparato:

- Un recipiente con una marca de 1,000 cm³ y otro de 946 cm³, un embudo de 1,500 cm³ de capacidad que tiene en su parte inferior un ajuste de 4.75 mm, y en su parte superior un pequeño tamiz.
- Por otra parte necesitamos un cronómetro.



Uso:

- a) Se llena el embudo con el lodo pasándolo por el tamiz, tapando el ajuste con el dedo. Se para este llenado cuando el lodo llega al nivel del tamiz.
- b) Se coloca el embudo en el recipiente.
- c) Al mismo tiempo que se libera el ajuste, se inicia el cronometraje. Cuando el nivel llegue a un litro, se para el cronómetro.
- d) Este tiempo en segundos caracteriza la viscosidad.

Contraste:

- A 20°C, el agua revela un tiempo de 28 ± 1 segundos por litro.

Observación:

- La medida definida anteriormente es la medida europea que la empresa de cimentaciones Bachy utiliza en Francia.
- Los norteamericanos y algunas empresas como Soletanche de Francia toman en cuenta el tiempo para llenar el recipiente hasta 946 cm³ ($\Delta \approx 1$ segundo).
- El rigor de esta medida depende esencialmente de la limpieza de los aparatos.

3. Prueba de densidad utilizando la balanza Baroid

Descripción del aparato:

Este aparato se compone de una balanza compuesta en tres partes:

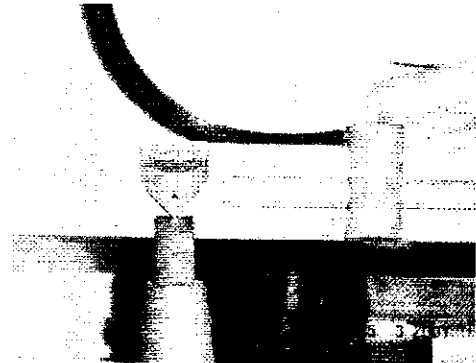
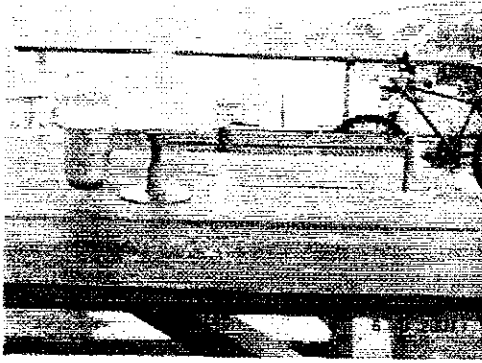
- 1 brazo con su contrapeso fijo o móvil.
- El pie
- la tapa del recipiente de lodo

Uso:

- a) Se debe colocar el pie en una superficie más o menos plana.
- b) Se llena el tanque hasta 2 mm del borde superior.
- c) Se coloca la tapa.
- d) El exceso de lodo debe salir por el hueco de la tapa.
- e) Tapando este hueco con el dedo, se necesita limpiar el brazo y secarlo.
- f) Se coloca el brazo en el pie y se mueve el cursor hasta que la burbuja de nivel se coloque en la parte central.
- g) Se lee directamente la densidad en la parte inferior del brazo.

Observaciones:

- Antes de usar el aparato, verificar que la densidad indicada por el agua sea de 1. En caso contrario modificar la tara.
- Es imprescindible verificar el estado de limpieza de los equipos.



4. Prueba de contenido de arena utilizando el Elutriómetro

Descripción del aparato:

- Este aparato se compone de:
 - un elutriómetro: es una probeta especial con dos marcas (agua y lodo). Tiene una graduación que indica por lectura directa el contenido de arena en porcentaje (%) para el volumen de lodo.
 - Un embudo
 - Una cofia con un tamiz en su centro de 200 Mesh (malla de 0.074 mm). Esta cofia se encaja en el embudo.

Uso:

- a) Se llena el Elutriómetro de lodo hasta el nivel: lodo. Se añade agua hasta el nivel de agua.
- b) Se tapa la probeta con el dedo y se agita.
- c) En el tamiz se vacía el contenido del Elutriómetro. En caso necesario, se puede llenar otra vez la probeta de agua para sacar la totalidad de los elementos.
- d) Se limpian abundantemente los productos que están en el tamiz.
- e) Se coloca la cofia en el embudo, de tal manera que los productos se encuentren en la parte inferior del tamiz.
- f) Se coloca el embudo en el Elutriómetro y se manda agua en el tamiz de manera que todos los productos caigan en la probeta.
- g) Se deja decantar el contenido de la probeta y se lee directamente el porcentaje (%) de arena.
- h) Al final se debe limpiar con agua todo el material y sobre todo el tamiz con el máximo cuidado para no romperlo.

Observación:

- Lo que sólo importa en esta medida es el volumen inicial del lodo, por eso en caso de un lodo muy espeso, se puede añadir toda el agua necesaria y vaciar la probeta en el tamiz varias veces.



Antes de proceder al vaciado se hace otra prueba del contenido de arena y se colocan los dos resultados sobre el informe de vaciado.

B. Tipos de controles

1. **La dureza del agua**

La dureza del agua es su concentración en iones calcio y magnesio. Cuanto más dura es el agua, menor será el rendimiento del lodo bentonítico.

2. **La potencia y el tiempo de agitación**

La mezcla de la bentonita con el agua debe durar un mínimo de 5 minutos para tener la mayor probabilidad de haber separado las placas de bentonita entre ellas. Además para favorecer la hidratación, siempre se deberá mantener en circulación el lodo que está en el tanque de reserva.

3. **La edad del lodo**

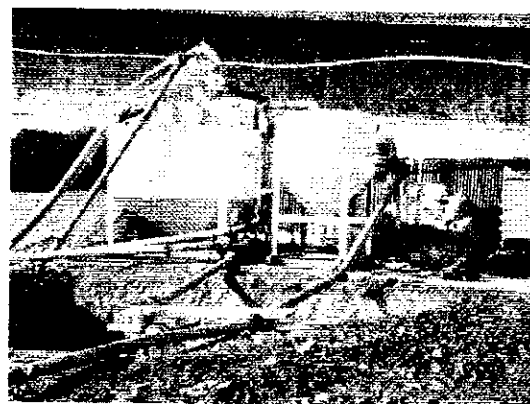
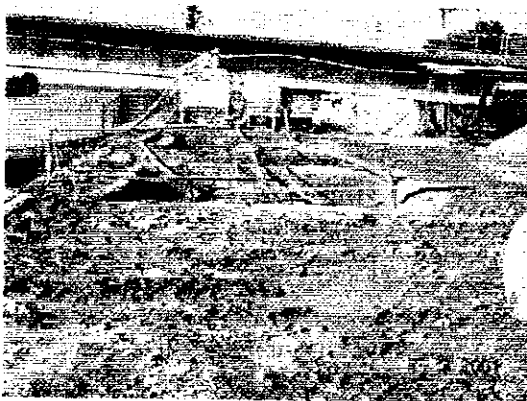
La hidratación correcta de un lodo necesita un mínimo de 24 horas (con movimiento). Se necesita hacer un chequeo continuo del lodo durante la ejecución de una obra y conservar los informes de todo los controles. De una manera general, se debe hacer en obra una prueba completa del lodo cada turno.

C. Tipos de instalaciones y equipos

1. **Elaboración de un plano**

Es necesario hacer siempre un plano de las instalaciones del lodo en una obra para aprovechar las mejores condiciones del espacio disponible y para estar en condiciones de efectuar los pedidos de equipo y consumibles.

Sobre dicho plano, se necesita colocar las tuberías de distribución para prever la circulación de los camiones y de las grúas.



2. Almacenamiento de la bentonita

La bentonita es generalmente entregada a la obra en sacos de 50 kg o a granel.

Se debe cuidar siempre los siguientes puntos:

- Facilidad de descarga para los camiones
- Facilidad para los obreros para transportar los sacos hasta el agitador
- Mantener la bentonita resguardada de la humedad
- Prever una reserva de bentonita del orden de 25 kg/m² (esto depende de las características de la bentonita).

3. Almacenamiento del lodo bentonítico

Se debe prever una capacidad de almacenamiento total de lodo al mínimo igual a 2 veces el volumen total excavado en un día.

Por ejemplo:

- La mitad de capacidad para lodo nuevo y la otra para lodo usado.
- La reserva de lodo debe ser siempre mantenida en movimiento por una bomba centrífuga, esta reserva puede ser constituida por silos, tanque o por piscinas.

V. PARAMETROS DE ACEPTACION Y RECHAZO

A. Viscosidad

La viscosidad de un lodo bentonítico debe oscilar de 35 a 45 segundos, con lo que se asegura que el lodo es más espeso y por ende más pesado que el agua. De esta manera, el lodo bentonítico ejerce una mayor presión de poro que el agua en las paredes de la perforación, y mantiene el agua fuera de las paredes. Hay que tomar en cuenta que la viscosidad del agua es de 28 segundos.

B. Densidad

La densidad del lodo bentonítico debe oscilar entre 1.01 gr/cm^3 a 1.05 gr/cm^3 . No se debe aceptar utilizar un lodo nuevo que tenga más de 1.025 gr/cm^3 de densidad.

C. pH

Para trabajar de una manera correcta, siempre se debe tener un lodo con un pH entre $8 < \text{pH} < 10$. Un lodo con un $\text{pH} < 8$ es muy fluido y decanta. Un lodo con un $\text{pH} > 10$ tiene floculación. Un lodo nuevo tiene un pH del orden de 9.

D. Contenido de arena

El contenido de arena en una perforación debe ser inferior a 5% para que se pueda tomar como una perforación limpia.

VI. RECOMENDACIONES

Producción de bentonita

La bentonita debe ser suspendida en agua. Esto se hace para mojar todos sus aglomerados y separarla hasta que lleguen a sus partículas primarias. Las siguientes recomendaciones deben tomarse en cuenta para una delaminación óptima de los aglomerantes y la formación de una suspensión estable:

- Se debe tener una gran energía mecánica durante la defloculación (energía compartida)
- Tiempo suficiente de reposo después de las defloculación
- Se debe utilizar agua que tenga poca dureza para la mezcla, preferiblemente agua potable. Si se utiliza agua subterránea o de un río, es muy probable que el lodo bentonítico será de menor calidad, por lo que se utilizará mayores cantidades de bentonita para obtener una viscosidad de 40 segundos con la prueba del Cono de Marsh.
- Hacer pruebas constantes de los lodos bentoníticos, ya que el resultado del trabajo depende en su mayor parte de factores característicos de cada bentonita y cada lugar de trabajo.

Controles en obra

Es de suma importancia hacer los controles de laboratorio del lodo bentonítico en la obra, ya que de esto depende la calidad del trabajo que se esté ejecutando. Por lo general se recomienda hacer una prueba durante la perforación, una en el desarenado y la última en la fundición, o a su efecto en cada turno de trabajo. Es recomendable dejar registro de cada prueba que se realice, ya que así, el monitoreo de la producción del lodo bentonítico se hace más sencillo y se puede saber en qué momento el lodo presenta problemas y porqué.

Seguridad en el trabajo

La bentonita posee en su composición silicatos de aluminio, los cuales son químicos que en grandes cantidades producen silicosis. Esto significa que los granos de bentonita forman protuberancias en los alveolos pulmonares y los van tapando con el tiempo, lo cual a largo plazo puede convertirse en cáncer pulmonar. Debido a lo anteriormente mencionado, es de suma importancia que el personal que va a estar en contacto directo con la bentonita se proteja utilizando mascarilla de seguridad. Por lo general, las personas que intervienen en la mezcla de bentonita con el agua en la planta de producción del lodo, son los que corren este riesgo, pero utilizando la mascarilla de protección está demostrado médicamente que es cien por ciento seguro trabajar con la bentonita. Este efecto es similar al del cemento. Por lo que para su manipulación, como se menciona anteriormente, se debe proteger el sistema respiratorio con una mascarilla.

El lodo bentonítico es bastante viscoso, lo que para términos de manipulación significa que es bastante resbaloso. Por lo general, en todos los proyectos se debe procurar caminar con cuidado, ya que se pueden producir accidentes, los cuales suelen resultar en lesiones leves, o en el peor de los casos, en quebraduras. Por lo anterior, es recomendable lavar luego de cada turno el equipo con el que se está trabajando, ya que así se minimizan los riesgos de resbalarse en la zona de trabajo.

Es recomendable utilizar un buen sistema de tuberías para la conducción del lodo bentonítico, ya que de esto depende que no hayan pérdidas del lodo. La economía de las obras depende de la optimización de los recursos, por lo que revisar todos los días las juntas y los empaques de las tuberías no está de más.

VII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis queda demostrado de forma clara que la utilización de lodos bentoníticos para la estabilización de perforaciones es una alternativa real y efectiva, que puede ser utilizada en el área de la construcción en Guatemala.

El sistema de protección de paredes de perforación con lodos bentoníticos ha permitido llevar a cabo perforaciones en terrenos difíciles, ya que es un método efectivo debido a que parece alterar muy poco el terreno y no lo ensancha. En este sistema los empujes sobre el "cake" o película resistente pueden estar compensados dentro y fuera de la excavación, siempre que el lodo se mantenga desde la boca de la perforación y se vaya manteniendo su contenido de bentonita.

Si hay capas granulares, pueden producirse importantes pérdidas de lodos y peligrar la estabilidad de la excavación. En el caso de perforaciones circulares, como la de los pilotes, puede ser conveniente utilizar entubación metálica. No hay ningún inconveniente en utilizar una entubación en una parte del pilote (generalmente la superior) y luego continuar la excavación con lodos bentoníticos, lo cual puede ser más económico, al no tener que estar metiendo la tubería metálica más de la imprescindible.

La estabilización de arenas y limos valiéndose de tubería de protección no siempre es factible. Por lo tanto, se han ideado diversos métodos, en la mayor parte de los cuales se inyectan lodos o soluciones en los vacíos del suelo. Estos materiales endurecen el suelo en grados variables y le proporcionan cohesión. Como llenan parcialmente los vacíos, también reducen la permeabilidad.

El lodo debe ser muy limpio para asegurar la estanqueidad con un espesor mínimo del cake. Lo que más influye en el espesor es la contaminación del lodo y las cargas en suspensión en el lodo. Siempre deberá mantenerse el nivel del lodo al máximo, ya que de esto depende la estanqueidad del cake y el buen sostenimiento de la perforación.

Cuanto más espeso es el cake, más importante es el volumen de agua que se escapa del terreno hacia la perforación, lo que ocasiona daños al terreno.

La viscosidad de un lodo depende de la calidad de la bentonita, su dosificación y de la edad del lodo. Mientras más viejo es un lodo, más hidratación se produce entre las láminas y, por lo tanto, la bentonita se hincha más.

La viscosidad del lodo permite disminuir las pérdidas en un terreno abierto, sin embargo aumenta las pérdidas de cargas en los sistemas desarenadores; y frena la barrena o almeja dentro de la excavación. Por este motivo, siempre se debe intentar trabajar con un lodo poco espeso (del orden de 35 seg.) en terrenos de poca permeabilidad y con un lodo viscoso del orden de 45 seg. en los terrenos abiertos.

Durante la excavación, el lodo se carga con los finos del terreno y por consiguiente aumenta la densidad y el espesor del cake, lo que perjudica todavía más el vaciado, por lo que cuanto menor sea la diferencia de densidad entre el lodo y el concreto, tenemos posibilidades de mezcla entre el cake y el concreto. Por lo tanto, no se debe utilizar un lodo nuevo que tiene más de 1.025 gr/cm^3 de densidad. Tampoco se debe disminuir la densidad de un lodo al que se le añade agua. Esta agua no será absorbida por la láminas de bentonita puesto que ya todas las uniones eléctricas están ocupadas.

Cuando un lodo se encuentra muy espeso, es decir, que tiene una viscosidad más alta de la aceptable, lo que se recomienda es dejar ese lodo en reposo y luego añadir un lodo nuevo menos viscoso pero estable, pero debido a su rigidez, algunas veces no hay otra solución que la de botar el lodo demasiado espeso.

En términos generales, las perforaciones deben ser limpiadas antes de proceder con el trabajo final de la perforación. Si se trata de pilotes, por ejemplo, es necesario limpiar la perforación desarenando el pilote. Este proceso permite reducir la cantidad de partículas pesadas que quedan flotando en el lodo bentonítico. De lo contrario, a la hora de realizar el

vaciado de concreto, existe la posibilidad de que el concreto se mezcle con el lodo, ya que el lodo bentonítico se vuelve más pesado, por lo que su densidad aumenta.

VIII. BIBLIOGRAFIA

DIAMOND DRILLING HANDBOOK, W.F. Heinz. South African Drilling Association (SADA). Johannesburg. 1985

DRILLING MUD HANDBOOK, NL BAROID/NL Industries, Inc. Houston, 1980.

GEOTECNIA Y CIMENTOS 2da. Edición Tomos 1, 2 y 3 , J. A. Jiménez Salas. Editorial Rueda, Madrid, 1975

MANUAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PILAS Y PILOTES, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México D.F. 1989

MANUAL DE PERFORACIONES CON BENTONITA, Soletache-Bachy France, Paris. 1980

MÓDULO DE PILOTES Y CIMENTACIONES PROFUNDAS (MASTER EN MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERIA DE CIMENTACIONES), Carlos Oteo, Cedex, 2000

PILOTES Y CIMENTACIONES SOBRE PILOTES, Zaven Davidian, Editores Técnicos Asociados, Barcelona, 1982