

ADITIVOS PARA LA PERFORACIÓN DE SONDEOS CON CIRCULACIÓN

PARA SISTEMAS EN CIRCULACIÓN INVERSA,
DIRECTA, ROTOPERCUSIÓN



La perforación con lodos en la construcción de sondeos

Con la implantación de equipos móviles hidráulicos, a finales de los años 50, ha ido aumentando significativamente el uso de lodos de perforación en la construcción de sondeos. Mediante el uso controlado de lodos de perforación, se consiguió cumplir las exigencias constantemente crecientes de los clientes en cuanto a sondeos más profundos y productivos.

Gracias al uso lodos y aditivos de última generación, las técnicas actuales permiten al avance rápido, sin necesidad de entubación provisional, de las perforaciones para construcción de sondeos, piezómetros,

instalaciones geotérmicas, voladuras, testigos continuos, etc. Las ventajas técnicas y económicas de estos sistemas, en comparación con los métodos de perforación en seco, son indiscutibles.

Como líder en la fabricación y suministro de materiales para la construcción de sondeos, les ofrecemos un amplio surtido de productos para la preparación de lodos de perforación, tales como bentonitas, polímeros, productos para aumentar la densidad y otros, avalados por la experiencia adquirida durante muchos de aplicación práctica.



1.0 Antecedentes

El desarrollo de la tecnología de perforación con lodos comenzó con la creación del procedimiento de perforación por rotación, método patentado en Inglaterra por Beart en 1845. Originalmente se utilizó agua como lodo de perforación que, con el avance de los trabajos de perforación, se mezclaba con una masa creciente de partículas del sondeo y formaba un fango, calificado como “barro de sondeo”. La experiencia reveló que el barro de sondeo, especialmente después de atravesar estratos con arcilla, presentaba mejores propiedades que la perforación con agua limpia. A partir de ahí, se empezaron a utilizar con éxito suspensiones de arcilla en agua, en vez de agua limpia. En 1921 se aplicaron por primera vez lodos con barita en acuíferos con gran presión hidrostática.

En 1929 se agregaron productos químicos y polímeros solubles en agua para optimizar las propiedades del lodo.

Hoy en día existen complejos sistemas de lodos para prácticamente todas las labores de perforación con circulación.

Se denomina lodo de perforación a todos los líquidos y gases circulantes de forma controlada en el sondeo durante el proceso de perforación.

2.0 Funciones del lodo de perforación

La función de los lodos puede resumirse en 5 puntos:

- Extracción del detritus hacia el exterior.
- Estabilización de la pared no entubada de la perforación, impidiendo su colapso.
- Compensación de presiones elevadas en acuíferos y yacimientos (agua / petróleo / gas).
- Protección del acuífero para su posterior explotación.
- Refrigeración y lubricación de las herramientas de perforación.

La experiencia nos ha demostrado que no es posible satisfacer todos estos requisitos utilizando exclusivamente agua como lodo de perforación. Su utilización se limita, por tanto, a pocos casos particulares como, por ejemplo, perforaciones en rocas consolidadas, duras o poco permeables.

2.1 Extracción del detritus

La extracción del detritus se determina por tres factores:

- Velocidad de ascenso del lodo en la perforación.
- Diferencia de densidad entre el lodo de perforación y el detritus.
- Viscosidad del lodo.

Especialmente en los procedimientos de perforación con rotación directa, hay que elegir el equipo de perforación (tricono, varillaje y bomba de lodos) de tal modo que en el espacio anular de la perforación, se alcancen velocidades de ascenso del lodo entre 0,5 y 1,0 m/s.

Como fórmula general valdría:

Caudal mínimo de la bomba 110 l/min por pulgada de diámetro del tricono

Avance de la perforación < 4,5 m/h: aproximadamente 130 l/min por pulgada de diámetro del tricono

Avance de la perforación > 4,5 m/h: aproximadamente 160 l/min por pulgada de diámetro del tricono

Hay que evitar caudales de la bomba > 200 l/min por pulgada de diámetro del tricono. A causa del régimen turbulento que se crearía, se produciría un ensanchamiento de la perforación y un desgaste del tricono y del varillaje.

Cuanto menor sea la diferencia de densidades entre los materiales perforados (aprox. 2,6 kg/l) y el lodo, tanto menor será su velocidad de sedimentación. La elevación de la densidad de un lodo de perforación con el objeto de mejorar su capacidad de transporte no es, sin embargo, razonable, ya que los lodos ricos en materiales sólidos reducen el avance de la perforación y aumentan el riesgo de colmatación permanente de la zona de la perforación que se prevé explotar.

En estos casos es preferible el uso lodos de perforación pobres en materiales sólidos, cuya capacidad de transporte se regula por medio de la adición de aditivos que eleven su viscosidad.

2.2 Estabilización de la perforación

Para la sujeción de las paredes de la perforación es necesaria, en principio, una presión en el lodo que supere la proveniente del agua subterránea y del terreno. De acuerdo con la experiencia, es suficiente para ello una sobre presión hidrostática de 2 m de

Tabla 1:

Productos normalmente utilizados para elevar la capacidad de transporte / viscosidad del lodo

Producto	Campo de aplicación recomendado
Bentonita activa	Perforaciones con agua dulce
CMC polianiónico	Perforaciones con agua dulce – salada
CMC técnico	Perforaciones con agua dulce – salada
Poliacrilamida	Perforaciones con agua dulce pobre en materiales sólidos
Hidroxietilcelulosa HEC	Perforaciones con agua dulce – salada Contenido en Ca^{2+} / Mg^{2+} >1500 ppm
Goma Guar	Perforaciones con agua dulce, sin bentonita

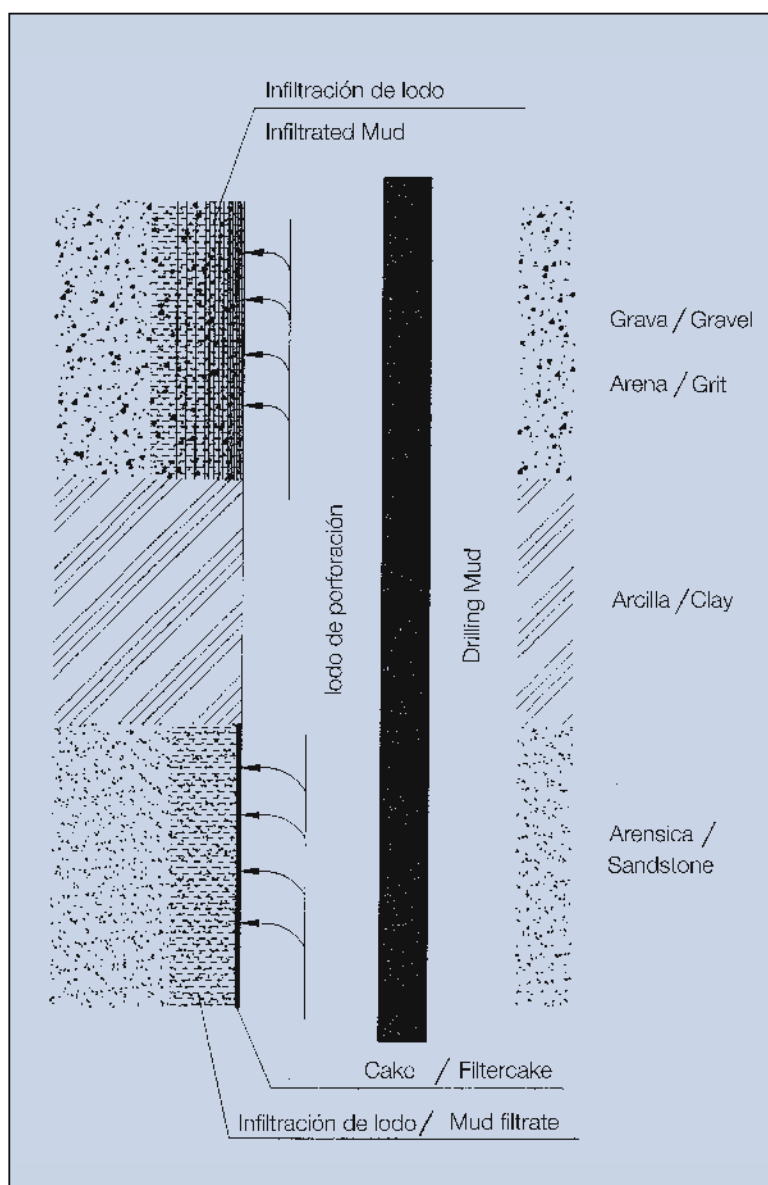
columna de agua. Además, para que la presión creada por la columna de lodo sea efectiva y no se produzcan pérdidas de lodos es necesario impermeabilizar simultáneamente las paredes de la perforación.

La formación de una película (cake) de lodo en la pared de la perforación o la creación de una zona impermeable junto a ésta, depende de cuál sea el tamaño de los poros de las rocas perforadas. Distinguimos tres casos:

- **El tamaño de los poros del terreno es mayor que el tamaño de las partículas de sólidos que se encuentran en el lodo.**

Este estado se presenta por regla general en las perforaciones en sedimentos sueltos, como estratos de grava y arena. Los sólidos en suspensión dispersos en el lodo de perforación (partículas de arcilla, láminas de bentonita, moléculas de polímeros de cadena larga) forman, en los huecos entre granos y capilares del estrato permeable, una estructura que mantiene el equilibrio de la presión en la columna de lodo. El medio de dispersión (agua) fluye lentamente a través de la estructura, con lo que los sólidos en suspensión se acumulan y la hacen cada vez más impermeable. Las partículas así acumuladas se califican aquí como “cake” (figura 1 / arena grava)

Infiltración de lodos en el acuífero (figura 1)



● **El tamaño de los poros es menor que el de las partículas de material sólido contenidas en el lodo.**

El medio de dispersión (agua) entra a presión entre los poros de la pared de la perforación, las partículas en suspensión se depositan en ella y con el tiempo la taponan (figura 1 / arenisca - cake).

Si el tamaño de los poros de la roca perforada sobrepasa un determinado tamaño, se produce una pérdida de lodos. Para este caso se utilizan medios de taponamiento que, como consecuencia de su forma y tamaño, poseen la capacidad de fijarse en los espacios intergranulares de la roca permeable, reduciendo, por tanto, la pérdida de lodo o, incluso, terminando con ella completamente. (ver tabla 2)

Junto a esta función de sujeción, es importante también la estabilización del hueco de la perforación

ante problemas provocados por la hidratación de los componentes arcillosos de los materiales perforados (ver figura 2). Según el contenido en componentes expansivos de la roca perforada, pueden darse los siguientes casos:

Alto contenido en componentes expansivos

- Estrechamiento del sondeo, con lo cual el terreno perforado a menudo desarrolla propiedades plásticas.
- Sin desprendimientos, aunque a menudo se forman grumos de arcilla que se van pegando al varillaje de perforación, pudiendo llegar a bloquearlo, aumentando, a la vez, la carga de tracción.
- Rápido espesamiento del lodo por cargarse con detritus.

Tipos de lodos de perforación para la estabilización de perforaciones no entubadas (Tabla 2)

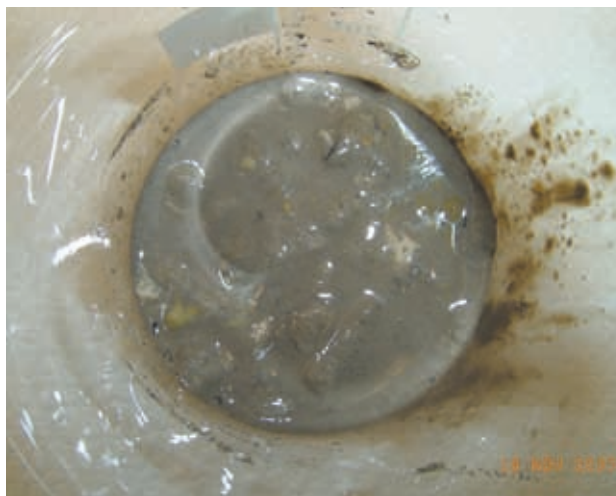
Aditivo	Campos de aplicación recomendados
Bentonita activa	Estabilización de estratos de arena – grava en lodos de agua dulce
CMC polianiónico	Inhibición de arcillas en lodos de agua dulce – salada
CMC Técnico	Inhibición de arcillas en lodos de agua dulce – salada
Poliacrilamida	Inhibición de arcillas en lodos de agua dulce – salada
Hidroxietilcelulosa HEC	Inhibición de arcillas en lodos de agua dulce – salada Contenido en Ca^{2+} / Mg^{2+} >1500 ppm
Polisacáridos (Goma guar)	Inhibición de arcillas en lodos de agua dulce
Material para taponar en todos los sistemas de lodos, ver hojas de datos adjuntas	

Resumen de características de los aditivos de perforación							
	Bentonita	CMC puro HV	CMC técn HV	CMC técn LV	HEC polímero	PAA	Polisacáridos
Elevación de la viscosidad	++	++	++	—	++	++	++
Estabilización de terrenos poco consolidados	++	0	0	—	0	—	+
Inhibición de arcillas	—	++	++	0	++	++	++
Estabilidad con sales NaCl /KCl	—	+	+	+	+	0	0
Estabilidad con sales Ca^{2+} / Mg^{2+}	—	—	—	—	++	—	—
Estabilidad a las variaciones de temperatura	+	+	+	+	+	++	—
Estabilidad biológica	++	0	0	0	0	+	—
Tabla de valores: ++ = muy bueno / + = bueno / 0 = regular / — = malo							

Pellets de bentonita en diversos lodos de perforación (figura 2.)



Pellets secos antes de su introducción en agua



Pellets después de 24 horas



Pellets después de 24 h. en lodo con polímero viscopol



Pellets después de 24 h. en lodo de agua salada con polímero viscopol

Bajo contenido en componentes expansivos

- Aumento del diámetro de la perforación causado por el deterioro de la estructura de las paredes de roca y su consiguiente desprendimiento.
- Subsiguiente caída, que, con el desarrollo de la hidratación, se agrava en zonas cercanas a la perforación.
- Dispersión constante de los fragmentos producidos por la rotura del terreno inestable.

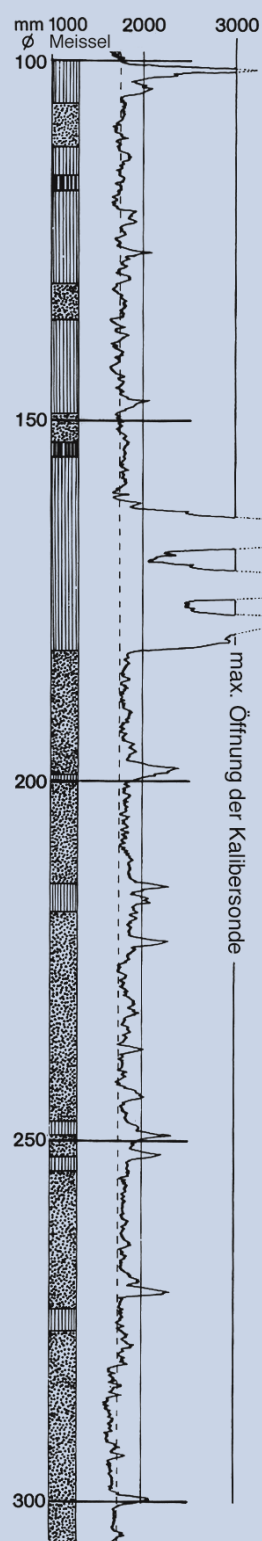
Los polímeros de lodo inhibidores de la arcilla, dado el caso en combinación con cloruro sódico o potásico, dificultan o retardan el desarrollo de las inestabilidades descritas, lo que permite también la perforación de sondeos de diámetro constante bajo condiciones geológicas desfavorables (figura 3).

2.3 Compensación de altas presiones del terreno y acuíferos

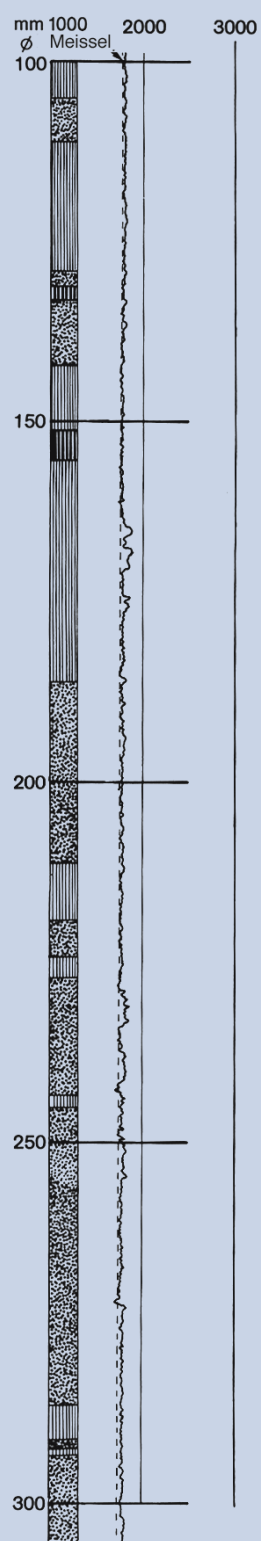
Cuando, durante los trabajos de perforación, se encuentran altas presiones del terreno o acuíferos hay que preparar, mediante el aumento del peso específico del lodo de perforación, una presión de la columna de lodos que impida la entrada de agua subterránea artesiana en la perforación. El incremento será tal que permita la obtención de una diferencia de presión de 2 m de columna de agua, como mínimo.

Como forma de incrementar la densidad del lodo se utiliza creta molida (peso específico 2,6 kg/l) para densidades de lodo < 1,25 kg/l, así como barita (peso específico 4,2 kg/l) para mayores exigencias de densidad (ver hojas de datos en el anexo).

Registro continuo del diámetro de la perforación en dos sondeos (figura 3)



REGISTRO A:
 Perforación con agua o bien
 (agua + bentonita)



REGISTRO B:
 Perforación con agua o bien
 (agua + polímero)

Ejemplo de cálculo de la densidad del lodo necesaria en caso de sobrepresión artesiana:

Profundidad del acuífero artesiano: 50 m

Presión del agua a los 50 m: 5,0 bares

Sobrepresión artesiana a ras de suelo: 0,5 bares / 5 mca

Densidad necesaria del lodo para compensación de la sobrepresión y creación de una presión diferencial de 2 mca (0,2 bares).

Densidad del lodo (kg/l) =

$\frac{\text{Sobrepresión artesiana} + \text{Diferencial de presión necesario}}{\text{Presión del agua en la zona de aporte}} + 1,0$

Densidad del lodo (kg/l) = $\frac{0,5 + 0,2}{5,0} + 1,0$

Densidad del lodo (kg/l) = 1,14 kg/l

Incremento de peso del lodo:

$$t/m^3 = \frac{W3 \times (W2 - W1)}{W3 - W2}$$

W1 = Densidad inicial del lodo kg/l

W2 = Densidad de lodo requerida kg/l

W3 = Densidad del aditivo para incrementar el peso kg/l

Hay que tener en cuenta que los lodos cuya densidad se ha incrementado tienen que mostrar una mayor capacidad de transporte, por lo que el medio para incrementar el peso no debe sedimentarse, sino que tiene que mantenerse uniformemente distribuido en el lodo. La base para que este sistema funcione es la bentonita activa.

2.4 Protección del acuífero a explotar mediante el lodo de perforación

La necesaria sobre presión hidrostática de la columna de lodo en comparación con la presión del agua subterránea en el acuífero provoca, como se ha descrito, la penetración del lodo en el área próxima a la perforación y la formación de una zona impermeable. A fin de conseguir el que el agua del acuífero fluya libremente hacia el sondeo durante su explotación, es necesario lavar previamente esta zona impermeable. Por ello, en la medida en que sea posible, habrá que utilizar de forma controlada un lodo de polímeros pobre en materiales sólidos. La pequeña proporción de material sólido, junto con el uso de polímeros en el lodo que reduzcan la filtración hace que se forme un cake de poco espesor, fácilmente eliminable.

En la práctica, a este respecto, es fundamental controlar el buen funcionamiento del polímero utilizado, especialmente durante la perforación en la zona del

acuífero. Para ello, entre otros parámetros, es necesario controlar el tiempo de filtración mediante el test del **tiempo de filtración del agua** (ver anexo de equipos de control de lodos).

Valor adecuado para un lodo de perforación protector del acuífero, según DVGW hoja W 116:

Tiempo de filtración del agua: > 1000 s

Para sondeos > 500 m se recomienda además el control directo del comportamiento de la filtración mediante la prueba del agua a presión, según norma API.

Valores indicativos:

Agua a presión, según norma API < 10 ml

Espesor del cake < 1 mm

Para que el lodo se mantenga en buen estado y proteja el acuífero a explotar, hay que tener cuidado de que, durante este proceso, no se produzca ninguna recarga excesiva con finos procedentes de los materiales perforados. Los lodos ricos en materiales sólidos, a causa del incremento de su propio peso, según muestra la experiencia, penetran mucho en el acuífero, y forman cakes gruesos, que son difícilmente eliminables.

En tanto lo permita el estado de la perforación, en la zona que a explotar (DVGW hoja W 116), el lodo no debería sobrepasar el siguiente valor límite::

Valor indicativo de densidad de lodo: < 1,10 kg/l

En el caso de que la densidad del lodo sobrepase este valor hay tomar las medidas correctoras adecuadas, entre ellas la verificación de los cálculos realizados. En este contexto también hay que comprobar si está agotada la capacidad de absorción de la balsa/depósito de lodos y hay que proceder a vaciados provisionales. Aunque se respete el valor límite mencionado pueden aparecer además otros problemas, por ejemplo una rápida velocidad de ascensión



Sistema de depósitos de lodos para un control efectivo de materiales sólidos.

de los lodos podría ser responsable de una capacidad de transporte demasiado elevada.

Esto puede comprobarse de un modo relativamente sencillo por la medición del tiempo de vaciado del embudo de Marsh (ver anexo de equipos de control de lodos):

Valores indicativos recomendados:

Tiempo de vaciado: 38 - 45 s

Tiempo de vaciado del resto: 28 - 35 s

Con estos tiempos de vaciado se obtienen por lo general capacidades de transporte suficientes para extraer los detritus y, asimismo, se facilita su sedimentación en la balsa/depósito de lodos. Viscosidades mayores (mayores tiempos de vaciado) sin equipamiento adicional para control de sólidos (cribas / separador de arena / separador de limo / limpiador de fango) originan una rápida colmatación, con las consecuencias negativas descritas.

Generalmente, es necesario anotar en hojas normalizadas, durante el proceso de perforación (ver anexo de hoja de control de datos), todos los parámetros del lodo de perforación, incluyendo los tipos y cantidad de aditivos y agua añadidos.

3.0 Preparación de las diferentes mezclas de lodos

La elección del lodo de perforación está determinada, por regla general, por los siguientes parámetros:

- Estabilidad del terreno
- Permeabilidad del terreno
- Distribución de presiones en el terreno
- Método de perforación

La utilización de agua sin aditivos como lodo de perforación se limita a casos aislados, como por ejemplo perforaciones en terrenos consolidados, estables y poco permeables (terrenos rocosos). En arenas y gravas sueltas estratificadas, sólo con agua no se consigue una estabilidad suficiente de la perforación. La aplicación de agua o lodo con bentonita pura en terrenos arcillosos o con sedimentos cohesivos debería utilizarse también con limitaciones. En este caso la carencia de propiedades inhibitoras y el elevado tiempo de filtración provocan generalmente un rápido aumento de los sólidos en suspensión en el lodo, a la vez que se produce el hinchamiento de las arcillas, la disminución del diámetro de la perforación y posibles desprendimientos. Además los poros libres del acuífero se van colmatando con los sólidos en suspensión (arena, limo, arcilla), lo que no sucede cuando se utilizan correctamente los aditivos apropiados.

En el caso de perforaciones en terrenos predominantemente arcillosos se recomiendan como únicos aditivos los polímeros PAA o CMC. En este caso se puede renunciar al uso de bentonita, ya que en el proceso de perforación se dispersan pequeñas cantidades de la arcilla perforada en el lodo, que en combinación con el polímero forman un buen cake impermeabilizante.

3.1 Preparación de lodos para sondeos en sedimentos predominantemente arcillosos

1 m³ de agua
+ 2 kg de CMC puro
o bien + 6 kg de CMC técnico
o bien + 2 kg de PAA de alta viscosidad

Al perforar capas de arena/grava y arcilla sucesivas, especialmente cuando las arenas y gravas se encuentran en los primeros metros de la perforación, hay que utilizar un lodo a base de bentonita y polímero. Por lo general sólo se usa bentonita en los primeros metros de la perforación. Posteriormente sólo es necesario añadir polímeros, ya que al perforar las capas arcillosas se producen suficientes sólidos espesantes que se mantienen en el lodo de perforación.



Espumante para perforaciones por roto percusión en terrenos duros.

3.2 Preparación de lodos – aplicación en los primeros metros de perforaciones en arena y grava

1 m³ de agua
+ 20 kg de bentonita
(dejar en remojo por lo menos 1 h)
+ 1,5 kg de CMC puro de alta viscosidad
o bien + 4,0 kg de CMC técnico de alta viscosidad

En sondeos artesianos hay que utilizar lodos con bentonita y polímeros, incrementando su peso con creta molida hasta alcanzar la densidad requerida (ver la tabla 3 del anexo). Si se necesita aumentar la densidad del lodo para compensación de la presión del agua subterránea por encima de 1,25 kg/l, hay que agregar además barita.

3.3 Preparación de lodos pesados

1 m³ de agua
+ 20 kg de bentonita
(dejar en remojo por lo menos 1 h)
+ 1,5 kg de CMC puro de alta viscosidad
o bien + 4,0 kg de CMC técnico de alta viscosidad
+ x kg de creta molida
o bien + x kg de barita (para obtener un peso específico > 1,25 kg/l)

En este caso especial se utiliza esta mezcla también como complemento volumétrico.

Complementos volumétricos

Los complementos volumétricos para regular la viscosidad o bien para reducir el contenido en materiales sólidos (densidad) del lodo en circulación, deben prepararse con lodos de polímeros puros, o bien con pequeñas proporciones de bentonita (cuando sólo se perfora arena / grava) excepto en el caso de lodos pesados.

3.4 Preparación de lodos – complemento volumétrico

1 m³ de agua
+ 20 kg de bentonita
(dejar en remojo por lo menos 1 h)
+ 1-2 kg de CMC puro de alta viscosidad
o bien + 3-6 kg de CMC técnico de alta viscosidad



inyector para la mezcla de lodos con polímeros

La secuencia de preparación de los productos a mezclar debe ser la siguiente: En primer lugar, sin excepciones, se verterá la suspensión de bentonita en agua libre de polímeros. Previamente hay que mantener la suspensión como mínimo 1 h para que las partículas se hidraten. Por último se añaden los aditivos poliméricos.

Para la mezcla de los productos, a fin de evitar grumos en el lodo, se han desarrollado inyector que se instalan en el circuito de la bomba de lodos existente (ver más arriba). Si sólo hay que añadir pequeñas cantidades de polímero puede realizarse introduciéndolo en puntos de circulación turbulenta en el circuito.



Equipo universal de perforación Prakla con sistema de depósitos de lodos

4.0 Pruebas de lodos de perforación

Embudo de Marsh para determinación de la capacidad de transporte de lodos.

- Cerrar el extremo inferior del embudo y llenarlo, a través del tamiz, con lodo hasta que la superficie de éste toque el borde inferior del tamiz (1500 ml).
- Destapar el extremo inferior y medir con un cronómetro el tiempo que tarde en vaciarse de 1000 ml de lodo = tiempo de vaciado AZ.
- A continuación averiguar el tiempo de vaciado de los 500 ml de lodo que todavía se encuentran en el embudo, y anotarlo como tiempo de vaciado del resto (RAZ)

Valores indicativos:

AZ	38 – 45 s
RAZ	28 – 35 s

Equipo anular con papel filtrante para medición del tiempo de filtrado del agua

- Poner un papel de filtro sobre la plataforma del equipo anular
- Colocar el anillo metálico centrado sobre el papel de filtro
- Rellenar hasta el borde con el lodo de perforación que se quiere probar la abertura cónica del anillo
- Poner en marcha el cronómetro cuando la primera gota traspase el papel de filtro
- Medir el tiempo transcurrido hasta que todo el papel de filtro esté empapado (visible en la parte externa del anillo) = Tiempo de filtrado del agua

Valor recomendado > 1000 s

Hidrómetro / aerómetro para la determinación del peso específico del lodo

- Llenar con el lodo que se va a examinar el vaso que se encuentra en el extremo inferior del hidrómetro. Juntar vaso e hidrómetro, sin que entre aire
- Sumergir el hidrómetro en un tubo lleno de agua
- Leer la densidad del lodo directamente en la posición de inmersión del hidrómetro

Valor recomendado para lodo no pesado: < 1,10 kg/l

¹ Papel de filtro tipo Schleicher y Schüll 2040 a, diámetro 50 mm



Embudo Marsh con medidor



Equipo anular con papel filtrante para medición del tiempo de filtrado del agua, cronómetro



Báscula de lodos e hidrómetro



PELLETS DE BENTONITA MASILLA SELLANTE

