



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**La Química de los lodos de
perforación ejemplos y
aplicaciones en Ciencias de la
Tierra**

MATERIAL DIDÁCTICO
Que para obtener el título de
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

RAÚL RUBÍ VILLEGAS

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Ing. Javier Arellano Gil



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017.



Dirección General de Asuntos
del Personal Académico

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la **Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA)**, dentro de las actividades para la elaboración del libro: **“Química para Ciencias de la Tierra: fundamentos y aplicaciones”**, para el proyecto **PAPIME No.-PE103116**.

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico primeramente a Dios, a mis padres y especialmente a mi hijo. A mi madre Brenda Villegas Juárez por motivarme siempre a seguir adelante y no bajar los brazos ante las adversidades que tiene la vida. A mi padre el señor Raúl Rubí Juárez por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado y ser un ejemplo de perseverancia y compromiso con mi familia. A mi esposa Carmen Rangel Gutiérrez por ser un apoyo incondicional en las buenas y en las malas, y por regalarme el mayor regalo que me pudo haber dado, a mi hermoso hijo Raúl Esteban Rubí Rangel, por ser ese motor que me alienta a seguir adelante y superarme día con día para ser un ejemplo a seguir para él. También quiero agradecerle a mi hermano el Lic. Gerardo Rubí Villegas, por los sabios consejos que siempre tuvo conmigo y a alentarme en terminar una carrera universitaria. Quiero hacer una mención especial para mi asesor de este trabajo, el Ingeniero Javier Arellano Gil, por su valioso tiempo y por la dedicación que siempre me brindó a lo largo de estos meses, ya que sin su ayuda no hubiera culminado el presente trabajo. Por último y no menos importante, quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por la formación que me brindó a lo largo de estos años de estudio profesional.

Contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. LOS LODOS DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS	4
1.1 Introducción	4
1.2 Antecedentes.....	5
1.3 Tipo de materiales a elaborar	5
1.4 Objetivos	5
1.5 Planteamiento del problema.	6
1.6 Metas.	6
1.7 Metodología	6
CAPÍTULO 2. IMPORTANCIA Y FUNCIONES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.....	8
2.1 Importancia y utilidad de los lodos de perforación.	8
2.2 Teoría básica de las emulsiones.....	15
2.3 Pruebas de las propiedades de campo.....	17
2.4 Conceptos fundamentales de los lodos de perforación.....	18
Cuestionario #1.....	22
CAPÍTULO 3. TIPOS DE LODOS DE PERFORACIÓN.	24
3.1 Neumáticos.....	24
3.1.1 Aire seco.....	24
3.1.2 Niebla.	25
3.1.3 Espumas.....	25
3.1.4 Lodos aerados.	25
3.2 Lodos base agua.	26
3.2.1 Lodos iniciales.....	26
3.2.2 Lodos bentoníticos.	27
3.2.3 Lodos tratados con fosfatos.....	27
3.2.4 Lodos gel-químicos.	28
3.2.5 Lodos tratados con lignitos y lignosulfonatos.	28
3.2.6 Lodos cálcicos.....	28
3.2.7 Lodos con adición de cal.....	28

3.2.8 Lodos con adición de yeso.	29
3.2.9 Lodos de polímeros de bajo contenido de sólidos no dispersos.	29
3.2.10 Lodos salados.....	29
3.3 Lodos base aceite:.....	30
3.3.1 Lodos de aceite que tienen menos del 5% de agua.	31
3.4 Emulsión inversa.....	31
3.5 Lodos biodegradables.....	31
Cuestionario #2.....	32
CAPÍTULO 4. LA QUÍMICA DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.....	34
4.1 Fases de los lodos.....	34
4.1.1 Fase continua de los lodos.	34
4.1.2 Fase discontinua de los lodos.	35
4.1.3 Fase sólida de los lodos.....	35
4.2 Consideraciones químicas básicas.....	36
4.2.1 Características químicas de los componentes de los lodos de perforación.	38
4.2.2 Arcillas.....	38
4.2.3 Origen de las arcillas.	39
4.3 Agentes densificantes.	49
4.3.2 Carbonato de calcio.	50
4.3.3 Galena.....	51
4.4 Polímeros.....	51
4.5 Aditivos sólidos misceláneos.	52
4.6 Materiales que se utilizan cuando hay pérdida de circulación.	53
4.7 Interacción química.	53
4.8 Fosfatos.....	53
4.8.1 Pirofosfato de sodio ácido (SAPP).	53
4.8.2 Fosfato tetra - sódico (TSPP).	54
4.8.3 Sal de roca (cloruros).....	54
4.8.4 Anhidrita y Yeso.....	54
4.8.5 Cemento.	55
4.8.6 Carbonato de sodio.....	55
4.8.7 Bicarbonato de sodio.	56
4.8.8 Cal.....	57

4.9 Medida de la dureza total.	57
4.10 Anaranjado de metilo.	58
4.11 Fenolftaleina.	59
4.12 Gases solubles.	59
4.13 Propiedades químicas de los lodos.	60
4.13.1 pH y control de la alcalinidad.	60
4.13.2 Alcalinidad.	62
4.13.3 Alcalinidad pf.	64
4.13.4 Alcalinidad Mf.	64
4.14 Reacciones químicas de los componentes Ca^{2+} y Mg^{2+}	65
4.14.1 Precipitación del Ca^{2+} y Mg^{2+} en los lodos de perforación.	65
4.15 Cloruros.	66
4.16 Análisis de un lodo de perforación con alcalinidad alta.	67
Cuestionario #3.	68
CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LA BENTONITA EN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.	70
5.1 Bentonita.	70
5.2 Mecanismos de hidratación de la bentonita.	72
5.2.1 Mecanismo en superficie.	72
5.2.2 Mecanismo de retención de la humedad.	73
5.2.3 Mecanismo en la estructura tetraedral.	73
5.3 Condiciones de equilibrio entre la bentonita y el agua.	74
5.3.1 Dispersión.	74
5.3.2 Floculación.	74
5.3.3 Defloculación.	74
5.3.4 Agregación.	74
5.4 Relación de las condiciones de equilibrio.	74
5.5 Estados de la bentonita.	75
5.5.1 Dispersado-defloculado.	75
5.5.2 Dispersado-floculado.	77
5.5.3 Agregado-floculado.	78
5.5.4 Agregado-defloculado.	78
5.6 La atapulgita como sustituto de la bentonita en los lodos de perforación.	79

Cuestionario #4.....	79
Conclusiones.....	81
Bibliografía.....	83
GLOSARIO.....	84
Adjunto 1 Material didáctico para los capítulos "Los lodos de perforación de pozos petroleros" e "Importancia y funciones de los lodos de perforación".....	85
Adjunto 2: Material didáctico para los capítulos "Tipos de lodos de perforación" y "La Química de los lodos de perforación".....	95
Adjunto 3: Material didáctico para el capítulo "Importancia de la bentonita en los fluidos de perforación" y conclusiones.....	104

RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad, de disponer de material didáctico que sirva de apoyo a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, sobre las aplicaciones de la Química en Ciencias de la Tierra, por lo que en el presente trabajo se aborda el tema "la Química de los lodos de perforación de pozos petroleros, con ejemplos y aplicaciones". Al profundizar en el tema de los lodos de perforación, nos es posible conocer de una manera más profunda su naturaleza, la gran utilidad que tienen en la industria petrolera, es decir, podemos comprender de una mejor forma la Química y las propiedades de los lodos; así como los fenómenos físicos y químicos relacionados. Por otra parte, el mayor conocimiento de los lodos de perforación nos brinda como estudiantes la oportunidad de aplicar las ciencias básicas a las Ciencias de la Tierra. Este trabajo consta de un trabajo escrito, con unidades teóricas, preguntas y cuestionarios resueltos y una serie de presentaciones que se encuentran en formato digital y que formarán parte del material didáctico que estará disponible en la plataforma educativa de la Facultad de Ingeniería.

ABSTRACT

The present work arises from the need, to have didactic material that serves as a support to the students of the Faculty of Engineering of the UNAM, on the applications of Chemistry in Earth Sciences, reason why in the present work it is approached. The theme "The Chemistry of Drilling Sludge from Oil Wells, with examples and applications." By going deeper into the issue of drilling muds, it is possible for us to know in a deeper way its nature, the great utility they have in the oil industry, that is, we can better understand the chemistry and properties of sludge ; As well as related physical and chemical phenomena. On the other hand, the greater knowledge of the drilling muds gives us as students the opportunity to apply the Basic Sciences to the Earth Sciences. This work consists of a written work, with theoretical units, questions and questionnaires solved and a series of presentations that are in digital format and that will be part of the didactic material that will be available in the educational platform of the Faculty of Engineering.

TRABAJO ESCRITO

El presente trabajo escrito consta de las siguientes partes:

- 1) Desarrollo y explicación de lo más relevante de la Química de los lodos de perforación.
- 2) Figuras e imágenes que brindan un mejor apoyo visual.

- 3) Ejercicios en los que se pone de manifiesto la relación entre la Química y las Ciencias de la Tierra.
- 4) Apartados en donde se abordan algunos casos prácticos de la Química de los lodos de perforación relacionados con las Ciencias de la Tierra.

PRESENTACIONES

El propósito fundamental de las presentaciones consiste en disponer de material didáctico en formato digital con textos, imágenes, ejercicios y situaciones reales que se relacionan con la Química de los lodos de perforación.

CAPÍTULO 1. LOS LODOS DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

1.1 Introducción

La creciente demanda de energía en el mundo moderno ha incentivado el desarrollo de nuevas tecnologías, para mejorar la búsqueda y explotación eficiente de nuevos yacimientos de hidrocarburos, que al desarrollarlos permitan satisfacer la gran demanda de aceite y gas convencional y no convencional de todos los países. Para poder satisfacer todos los requerimientos de la sociedad, es necesario ir en busca de nuevas alternativas tecnológicas que nos permitan obtener hidrocarburos de una manera más fácil y sencilla, pero sobre todo, a bajo costo. Con el transcurso del tiempo, la volatilidad de los precios del petróleo se ha disparado de una manera alarmante, a tal grado que en años recientes se logró superar la barrera de los 100 dólares por barril, y en meses recientes se han caído los precios de una manera abrupta; sobre todo por las medidas tomadas por los países productores de petróleo de incrementar el volumen de explotación creando una sobreoferta de petróleo, la que se ha incrementado por múltiples factores, uno muy importante es la tecnología, que permite mejores diseños y mejores herramientas para la perforación de un pozo petrolero, donde los lodos de perforación son más adecuados y han mejorado sus propiedades con las nuevas tecnologías. Para tener éxito en la perforación, un factor importante es el utilizar un lodo químicamente adecuado que circule en el interior del pozo, que pase a través de la barrena y que sea capaz de regresar a la superficie por el espacio anular (que es el espacio entre el exterior de la tubería de perforación y el interior del agujero o también denominada tubería de revestimiento).

Al perforar un pozo petrolero se generan recortes de formación en tamaños y cantidad según sea la barrena, la velocidad de penetración y el tipo de roca que se esté cortando. El lodo junto con el caudal de bombeo, debe ser capaz de acarrear estos recortes a la superficie dejando limpio el fondo del pozo. Otro de los objetivos fundamentales de los lodos de perforación es controlar las presiones de la formación, ya que, en el subsuelo, toda formación tiene una determinada presión en sus poros denominada presión de poro o presión de formación. Para incrementar o controlar la densidad de los lodos de perforación, la industria petrolera cuenta con una amplia gama de productos químicos, entre los más utilizados se encuentran: la bentonita, carbonato de calcio, cloruro de sodio, cloruro de potasio, y óxido de hierro; cada uno con sus ventajas y desventajas. Otra aplicación relevante de los lodos de perforación, es evitar el calentamiento de la barrena y no dañar el ambiente, que en la actualidad es de suma importancia, sobre todo por las tendencias actuales de disminuir la contaminación ambiental. Los lodos se deben diseñar de tal manera que en su composición intervengan productos que no causen daño al ambiente, o que el daño sea mínimo. Se trata de productos que sean amigables con el ambiente, es decir, que sean productos biodegradables.

1.2 Antecedentes.

En 1833, un ingeniero francés de nombre Flauville se encontraba observando la técnica de perforación con una herramienta operada por un cable, lo que le permitió identificar la presencia de un acuífero, donde el agua que emanaba era muy útil para sacar los recortes del pozo; encontrándose de esta manera, que los fluidos eran de gran utilidad en la perforación de pozos. Al principio, se utilizaron fluidos en movimiento para recuperar los recortes del pozo. Flauville (1833), ideó una instalación para bombear el agua hacia el interior del vástago de perforación y arrastrar los detritos hasta la superficie a través del espacio existente entre el vástago de perforación y la pared del pozo; que más tarde se conocería como el espacio anular; que corresponde al espacio entre el exterior de la tubería de perforación y el interior del agujero. Actualmente, este procedimiento sigue vigente.

El uso de los primeros lodos de perforación utilizados en la industria petrolera, se remonta al año de 1914, cuando se definió por vez primera el concepto de lodo de perforación de la siguiente manera: “una mezcla de cualquier arcilla, la cual queda suspendida en el agua por cierto lapso de tiempo” (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

Este lodo de perforación tiene que reunir ciertas condiciones especiales, para alcanzar su objetivo principal, que es la de mejorar las condiciones de perforación. A continuación, se presenta la definición de lodo de perforación según la American Petroleum Institute (1986): “Es un fluido circulante, que es usado en la perforación rotatoria para ejecutar alguna o todas las funciones requeridas durante la perforación de pozos petroleros”.

1.3 Tipo de materiales a elaborar

El tipo de material a realizar en este trabajo, se encuentra enfocado principalmente en productos didácticos que sean útiles en el proceso de enseñanza aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Petrolera; que dicha información se tenga de primera mano cómo acervo bibliográfico actualizado de fácil consulta, que sea riguroso y con claridad, ya que en muchas ocasiones los materiales de consulta que se encuentran son muy difíciles de entender, y en muchos casos, los estudiantes se quedan con más dudas que con conocimientos útiles. Los materiales didácticos consisten en textos con contenidos temáticos claros e ilustrativos, que proporcionen un mejor panorama de los temas que se desea explicar; este trabajo se encuentra enfocado para alumnos de los primeros semestres de las ingenierías en ciencias de la Tierra que estudian la asignatura de “Química de Ciencias de la Tierra. El trabajo tiene un amplio contenido químico en donde se pretende utilizar textos, presentaciones en power point, así como ejercicios y casos prácticos para que los alumnos tengan un material de consulta que pueda llenar todas sus expectativas a la hora de utilizar la información referente a la composición química de los lodos de perforación.

1.4 Objetivos

Elaborar textos con teoría básica y presentaciones en power point que traten sobre la química y la utilidad de los lodos de perforación. Qué el material elaborado sea

parte de un capítulo del libro de “Química para Ciencias de la Tierra: Principios y aplicaciones”, que se está elaborando mediante el proyecto PE103116.

Elaborar material didáctico sobre los lodos de perforación que contenga ejemplos prácticos que motiven a los estudiantes de Ciencias de la Tierra a mejorar su aprendizaje de Química y, por consiguiente, reducir los índices de reprobación en las asignaturas de Ciencias Básicas.

1.5 Planteamiento del problema.

El presente trabajo pretende responder y aportar información a la comunidad universitaria, en este caso a los alumnos de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, sobre las características, propiedades y la química de los lodos de perforación. También se pretende incrementar el interés del estudio de la Química, mediante textos, material didáctico claro y conciso, para que cuando sea consultado, se tenga información validada y útil que contribuya con el aprendizaje significativo; ya que la mayoría de las veces los libros o los materiales que se encuentran a disposición de la población estudiantil sobre este tema, se encuentran redactados de una manera muy técnica que dificulta su comprensión. Se pretende que el material didáctico elaborado, tenga un enfoque práctico, de utilidad y de fácil acceso para los estudiantes interesados en el tema.

1.6 Metas.

Las metas que se tienen al elaborar el material de apoyo didáctico son variadas, considerando que se elaborarán textos, ilustraciones que formarán parte de un capítulo de un libro, que se encuentra dirigido a alumnos de los primeros semestres de las carreras de Geociencias que se imparten en la Facultad de Ingeniería. Se pretende que el material didáctico, mejore el proceso de enseñanza aprendizaje; y que tenga un contenido adecuado, considerando los aspectos didácticos necesarios para lograr aprendizajes significativos. Se pretende que el material elaborado se encuentre al alcance no sólo de los alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, sino para todas personas que se encuentren interesadas en el tema.

1.7 Metodología

Para la elaboración del trabajo se siguió la siguiente metodología:

a. Búsqueda de la información.

La búsqueda de la información se basó principalmente en libros, revistas científicas y páginas de internet que tratan lo referente a los lodos de perforación.

b. Análisis de la información.

Se analizó la información disponible y se clasificó de acuerdo a su contenido y sus aplicaciones.

c. Síntesis de la información.

En la síntesis de la información se obtuvo, lo más relevante de la química, propiedades, características y aplicaciones de los lodos de perforación.

d. Elaboración de textos.

Se elaboraron textos de los temas: Importancia y funciones de los lodos de perforación, tipos de lodos de perforación, la química de los lodos de perforación y las utilidades de las arcillas en los lodos de perforación; donde se indica lo más relevante de la química, propiedades y características de los lodos de perforación.

e. Elaboración de figuras.

Se elaboraron figuras, gráficos y se editaron imágenes que forman parte del texto con un amplio contenido relacionado con la Química de los lodos de perforación.

f. Elaboración de ejercicios y cuestionarios.

De cada capítulo se tomó en consideración que tuvieran una relación directa con las Ciencias de la Tierra, utilizando un lenguaje adecuado para que al resolverlos se mejore el aprendizaje de la química.

g. Aplicaciones prácticas.

Las aplicaciones prácticas consisten en describir las ventajas y desventajas de utilizar un cierto lodo de perforación, con casos específicos de pozos perforados en México.

h. Redacción de textos claros, concisos y completos.

Se tomó en cuenta el uso de lenguaje técnico y formal que permita una fácil lectura y comprensión de los temas desarrollados.

Organización de la información.

Se integró el contenido de este material didáctico en 5 capítulos considerando un orden lógico y adecuado, con textos figuras y ejemplos representativos. Posteriormente se procedió a la elaboración de presentaciones en Power Point de cada capítulo que podrán utilizar, tanto alumnos, como profesores interesados en el tema, ya que dicho material será puesto en formato digital en internet en las páginas de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, y de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

CAPÍTULO 2. IMPORTANCIA Y FUNCIONES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.

2.1 Importancia y utilidad de los lodos de perforación.

La importancia y la utilidad de los lodos de perforación radican en el hecho de que siempre se utilizan cuando se perforan pozos petroleros, pozos de agua potable y pozos geotérmicos; tanto de exploración como de desarrollo. A continuación, se describen las aplicaciones más importantes y la utilidad que tienen cuando se perfora un pozo petrolero.

En la **figura 2.1**, se observa el sistema de circulación de los lodos en la torre de perforación, pasando de la bomba de lodo, línea de descarga hasta la tubería de perforación.

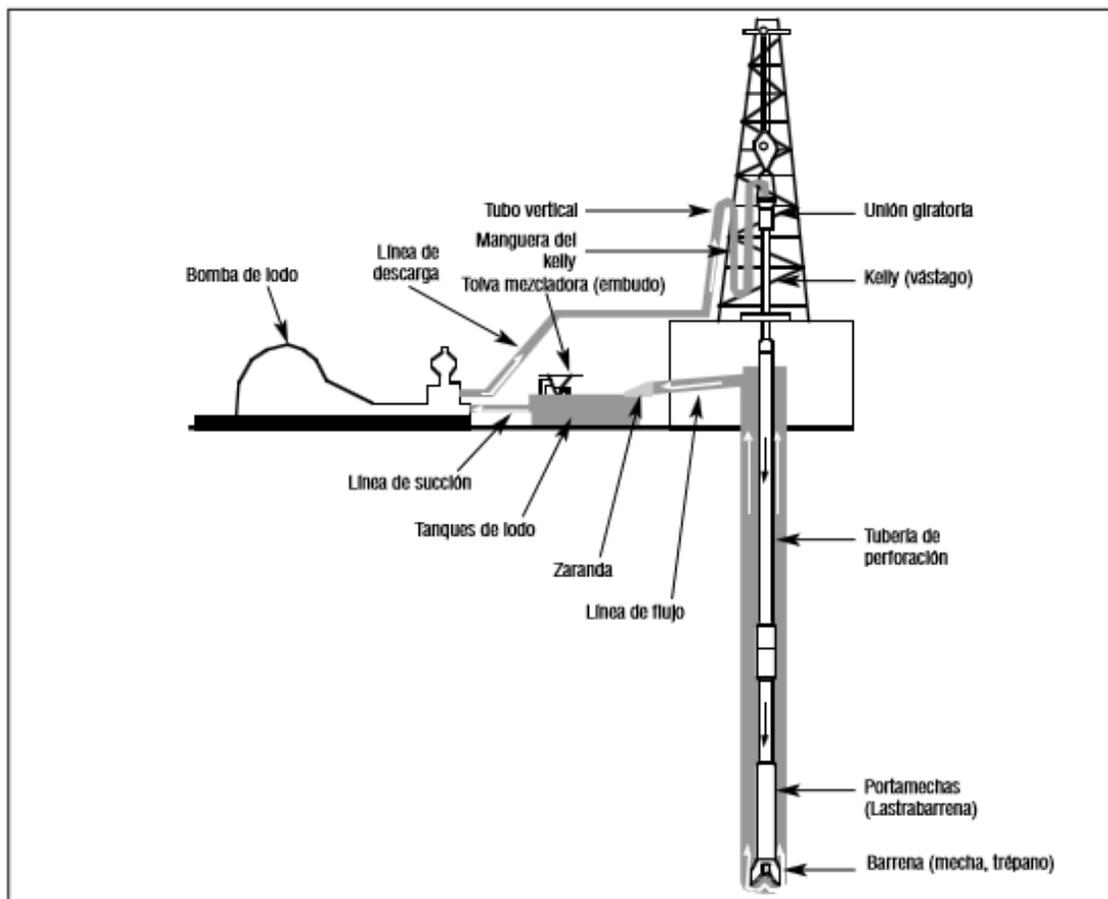


Figura 2.1 Sistema circulación del lodo en la torre de perforación. (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

a) Obtener los recortes de la formación a la superficie.

Al perforarse un pozo, se producen recortes en la formación, cuya cantidad, tamaño, y características están de acuerdo con el tipo de roca, el tipo de barrena, velocidad de penetración etc. La remoción del recorte debe llevarse a cabo de manera continua para que de ese modo se deje a la barrena con el espacio suficiente para que pueda llevar a cabo su función de hacer huecos a cada instante; el lodo junto con el caudal de bombeo debe ser capaz de acarrear dichos recortes a la superficie, para dejar limpio el fondo del pozo. Los lodos deberán proporcionar un flujo adecuado para crear una turbulencia, a través de la barrena para que levante y acarree instantáneamente los recortes perforados; todo esto se realiza mediante un programa hidráulico adecuado, de otra manera, la velocidad de penetración sería reducida debido al remolimiento de los recortes hechos por la barrena. La capacidad de limpieza del pozo es principalmente función del caudal de bombeo, de la densidad del lodo y de la viscosidad respectivamente (*García Hernández, 2014*).

En la **figura 2.2**, se puede observar una barrena cuando se encuentra perforando, dado que en toda perforación se generan recortes de acuerdo al tipo de roca, pero sobre todo de qué tipo de barrena se esté utilizando.

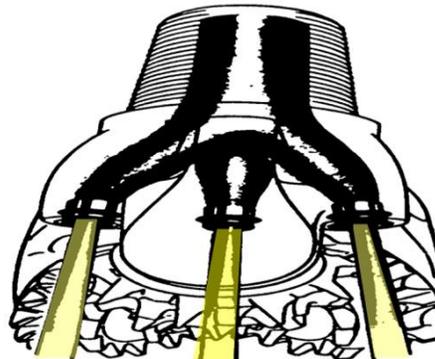


Figura 2.2 Recortes de la formación (Tomada de García Hernández, 2014).

b) Controlar las presiones de la formación.

Toda formación en el subsuelo tiene una determinada presión en sus poros, a la que se denomina “presión de poro o presión de formación”, esta presión puede ser normal si su gradiente se encuentra en el rango de 0.433 a 0.465 psi/ft (agua pura, agua salada de 1.07 g/cm³, todo valor por arriba de estos valores se denominan presiones anormales y todo valor por debajo se le denomina presión sub-normal. Si conocemos la profundidad donde se está perforando, se puede determinar la densidad mínima que debe de tener el lodo para que se puede controlar esa presión. La densidad mínima de trabajo que se debe de tener debe estar por arriba de la presión anormal, debido a que se toma la presión hidrostática, más un factor de seguridad que ronda en los 300 psi; de esta manera, se puede calcular la densidad necesaria que debe tener el lodo para controlar la presión de la formación. La presión de 300 psi es un factor de seguridad que tiende a cubrir la disminución de

la presión causada, cuando se saca la herramienta del pozo, la mayoría de las veces genera un efecto en el pistón. Para que se incremente la densidad de los lodos de perforación, la industria petrolera cuenta con una gran variedad de productos químicos, de los cuales, los más usados son los siguientes: la baritina, el cloruro de sodio, el óxido de hierro, cloruro de potasio, el carbonato de calcio; claro está que cada uno de los productos mencionados tiene sus ventajas y desventajas, ya que se debe de tener en cuenta que siempre existen diferencias en las características de las formaciones a perforar (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena, y Reyes Álvarez, 1979*).

En la **figura 2.3**, se puede observar una barrena perforando una formación, con indicios de un brote; esto se debe al desbalance entre la presión de la formación y la presión hidrostática del fluido de control.

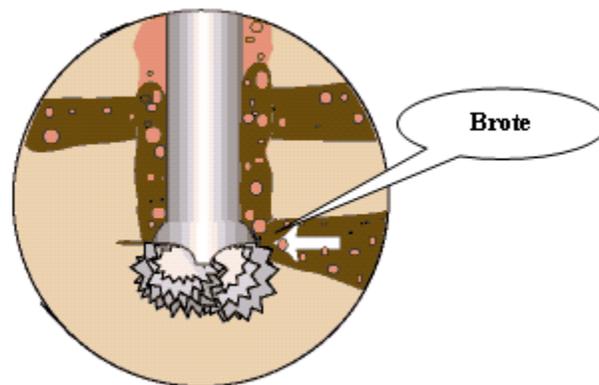


Figura 2.3 Control de las presiones en la formación. (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

c) No dañar las zonas productoras.

La premisa fundamental que se tiene cuando se perfora un pozo petrolero es que debe haber éxito, es decir que el pozo resulte productor de hidrocarburos; esta producción va a depender de muchos factores, uno de los más importantes es el daño a la formación, es decir, que se origine una disminución de la productividad, que puede ser causada por el lodo de perforación. El daño generado puede ser causado por la excesiva cantidad de sólidos, por la incompatibilidad química del lodo con la formación productora, y por la presión a la que se inyecta el fluido. (*García Hernández, 2014*).

d) Estabilizar las paredes de la formación.

Las formaciones que se atraviesan, varían en litología y en sus características físico-químicas, según sea la profundidad en que se encuentre, como también de su posición estratigráfica. La estabilidad de la formación dependerá de sus características litológicas, así como de la profundidad y de las condiciones con las que se esté perforando, como también de las reacciones del lodo con la formación. En gran medida, la estabilidad de la formación depende de la química de los lodos

de perforación; un ejemplo muy práctico que se puede tomar de esto, es que al perforarse formaciones ricas en arcillas, y al entrar en contacto con el agua del lodo de perforación estas toman una gran cantidad de agua, lo que ocasiona un aumento cada vez mayor en su volumen; provocando la disminución del diámetro del agujero, que causa los conocidos arrastres y resistencias de las herramientas que se encuentran en movimiento, cuando se está llevando a cabo la perforación (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

e) Obtener información del fondo del pozo. El lodo que se utiliza al perforar un pozo, proporciona información del fondo del mismo, como la presencia de fluidos, de presiones anormales, que al ingeniero encargado del manejo le es de gran utilidad, ya que de esa manera se podrán interpretar de mejor forma las condiciones que se encuentran en el fondo del pozo (*García Hernández, 2014*).

f) No dañar el medio ambiente.

Durante la perforación de un pozo petrolero se deben tomar medidas de protección del ambiente, por lo que se deben utilizar lodos de perforación que sean amigables con el ambiente, que no generen daños a los ecosistemas, de tal forma se deben utilizar productos biodegradables que no repercutan negativamente en la flora, en la fauna, en los suelos y en el agua subterránea (*McCray, Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

g) Buen funcionamiento de la sarta de perforación.

Los aditivos que usualmente se utilizan en la perforación de pozos son polímeros, los cuales deben de cumplir con funciones específicas; que proporcionan a los lodos de perforación características tales, como la lubricidad que minimiza las fricciones que se tienen con las herramientas de perforación cuando se encuentra en la formación. A medida que se va perforando, la temperatura va incrementándose con la profundidad de la formación. El gradiente de temperatura que se toma como punto de referencia por cada 30 metros perforados, se incrementa en promedio 1°C por lo que el lodo de perforación tiene la función de enfriar el medio a grandes profundidades, extrayendo grandes cantidades de calor de la formación y de las herramientas y por consiguiente enfriar el fondo del pozo (*García Hernández, 2014*).

h) Mitigar la corrosión a la herramienta.

EL lodo de perforación debe tener una composición química que minimice la corrosión que se origina en las tuberías de perforación y en las herramientas que se utilizan. La corrosión la podemos definir como la degradación o el desgaste de los materiales, sobre todo en los metales, que a su vez tratan de alcanzar su estado inicial continuo con referencia al que iniciaron. La corrosión es un mecanismo de óxido-reducción que se lleva a cabo en las superficies metálicas que es originada por la acción de los lodos de perforación (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

i) Enfriar y lubricar la barrena.

Durante la perforación se produce considerable calor debido al contacto y fricción de la barrena con la formación, además de que con la profundidad se incrementa la temperatura debido al gradiente geotérmico natural de la Tierra. El calor que se produce es transmitido al lodo, el cual por circulación es llevado a la superficie, donde finalmente se disipa. El lodo de perforación también lubrica la barrena y reduce la fricción con la formación y con la sarta de perforación. La mayoría de los lodos de perforación contienen diferentes aditivos (bentonita, polímeros etc.), que ayudan a reducir la fricción al enfriar y lubricar la barrena y la sarta de perforación (*Benítez Hernández, Garaicochea Petirena y Reyes Álvarez, 1979*).

En la **figura 2.4**, se observa el enfriamiento y lubricación de la barrena, ya que durante la perforación se produce un calor considerable debido a la fricción de la barrena y la herramienta con la formación, que tienen una temperatura natural llamada gradiente geotérmico.

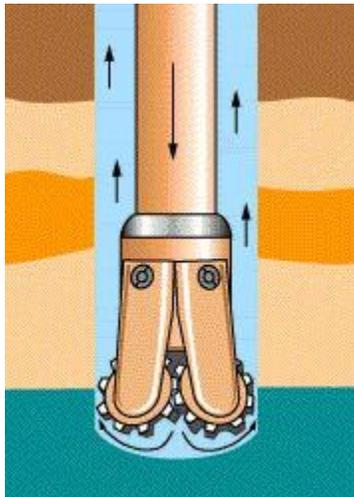


Figura 2.4 Enfriamiento y lubricación de la barrena. (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

j) Transmisión de potencia hidráulica a la barrena.

El lodo de perforación es el medio por el cual se transmite la potencia hidráulica a la barrena, considerando que es un fluido cuya viscosidad en el entorno de la barrena se aproxima a la del agua, ya que por sus características y al entrar en movimiento se disminuyen las pérdidas de presión por fricción y aumenta la potencia hidráulica disponible en la barrena; esto se debe a que mientras más baja viscosidad tenga el fluido, menos pérdidas por fricción en las paredes del pozo se tendrán, como consecuencia, es más fácil el movimiento y por lo tanto, aumentará el rendimiento de la potencia hidráulica disponible (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

k) Control de las presiones en la formación.

La densidad del lodo de perforación debe ser adecuada para poder contener cualquier presión de la formación, con lo que se evita o disminuye el flujo de los

fluidos de la formación hacia el pozo, además de dar un cierto margen de seguridad, cuando se efectúa un viaje de la tubería. Sin embargo, la densidad no debe ser tan alta para crear excesivas presiones diferenciales, las cuales disminuirán la velocidad de penetración ya que podrían causar una pérdida de circulación; o un posible pegamiento de la tubería (McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011).

I) Ayuda en la toma de registros eléctricos.

El lodo debe suministrar un medio apropiado para evaluar las formaciones a través de los registros geofísicos de pozo, como sucede con los registros eléctricos. Para tomar los registros eléctricos se requiere que los lodos sean un medio conductor que permita obtener las propiedades eléctricas de los diferentes fluidos de la formación. La evaluación apropiada de la formación se dificulta enormemente si la fase líquida de los lodos de perforación se ha desplazado al interior de la formación, o bien si el lodo altera las propiedades físicas y químicas del agujero (García Hernández, 2014).

En la **figura 2.5**, se puede apreciar la toma de un registro geofísico de pozo, la cual es una representación gráfica de una característica de una formación atravesada por un pozo en función de la profundidad.

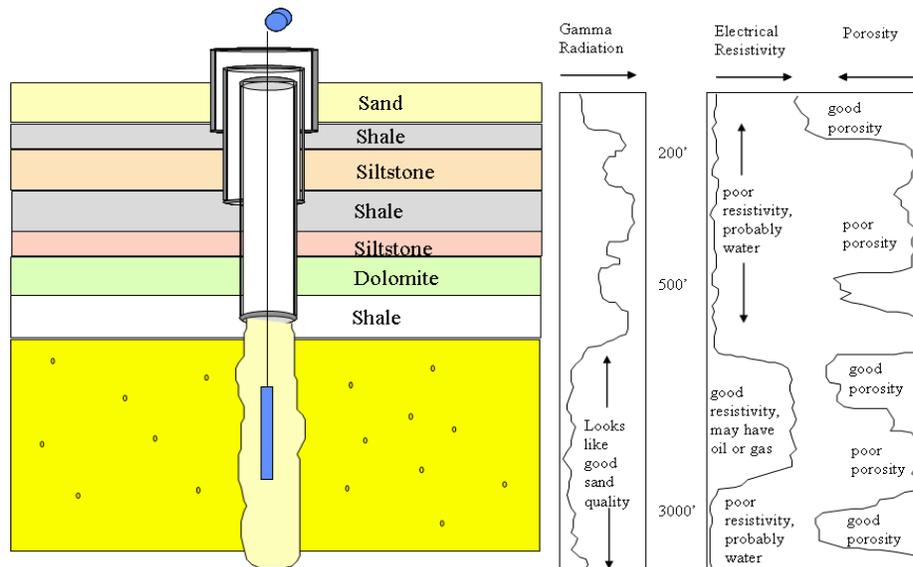


Figura 2.5 Toma de registros geofísicos. (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

m) Sustentación de la sarta de perforación.

El lodo de perforación tiene entre otras funciones, la de sustentar la sarta de perforación y la de revestimiento; todo esto se lleva a cabo por medio de un empuje ascendente en la tubería que, al encontrarse sumergida en el lodo de perforación, dependerá de la profundidad a la que se encuentre la tubería y de la densidad del fluido sustentante. Cuando el lodo que se tiene es aire, el empuje es casi nulo, debido a la baja densidad del aire; pero en el caso de un pozo en donde la tubería se encuentra sumergida en lodo, el empuje puede ser considerable y se deberá tomar en cuenta para la realización de un análisis real de todas las variables que se encuentran involucradas en el pozo. Para la determinación de la sustentación de la sarta por el lodo de perforación, se debe tomar en cuenta la tensión en una determinada sección de la tubería (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

n) Suspensión de los recortes.

Los lodos de perforación son fluidos no Newtonianos, que presentan la mayoría de las veces un comportamiento característico, tanto en condiciones dinámicas como en el estado de reposo, que es totalmente distinto al comportamiento que tienen los fluidos Newtonianos. Los lodos de perforación tienen características y propiedades que los hacen muy especiales e importantes, ya que tienen la función de mantener en suspensión a los sólidos correspondientes con fragmentos de roca de las formaciones perforadas, todo esto con el objetivo de evitar que se depositen en el fondo del pozo y puedan obstruir la perforación de las rocas. Otro concepto de suma importancia y que juega un papel fundamental en la suspensión de sólidos es la tixotropía, que es la acción que tienen los lodos de perforación de generar energía cuando se encuentran en un estado estático o de total reposo (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

La suspensión de los recortes se efectúa primeramente cuando la circulación de los lodos es detenida por un tiempo determinado durante un viaje de la tubería o por cualquier otra causa. Los recortes que no han sido removidos deberán quedar suspendidos, ya que si no se caerán al fondo y causarán problemas al meter nuevamente la tubería de perforación y al reanudar la perforación. Si no se mantienen en suspensión, se puede reducir la velocidad de perforación al producir un atascamiento de la barrena con los recortes que se quedaron asentados. La velocidad de asentamiento de una partícula a través de los lodos, depende de la densidad de la partícula, así como de la densidad, la viscosidad y la gelatinosidad o tixotropía del lodo. La gelatinosidad proviene del asentamiento al reducir el grado de caída de las partículas; sin embargo, altas gelatinosidades dependen de altas presiones de bombeo. Para poder iniciar la circulación después de que se detuvo la misma, se deberán programar acciones que eviten problemas, considerando las propiedades que convengan para un cierto objetivo específico; en algunas ocasiones se puede dejar de perforar y circular antes de sacar la tubería de perforación con la finalidad de limpiar el agujero de recortes y contar con el asentamiento durante y después del viaje de la tubería de perforación (*García Hernández, 2014*).

En la **figura 2.6**, se pueden observar los recortes suspendidos a la hora de perforar, cabe mencionar que durante la perforación se generan una gran cantidad de recortes que si no se eliminan pueden pegarse a la tubería y generar un atascamiento de la misma.

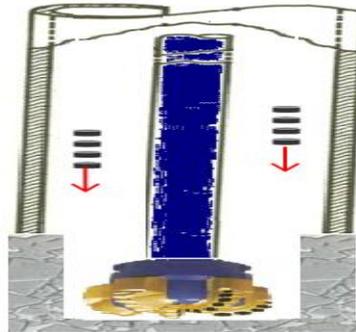


Figura 2.6 Suspensión de los recortes. (Tomada de García Hernández, 2014).

2.2 Teoría básica de las emulsiones

La teoría de las emulsiones considera que las emulsiones son representadas como la dispersión de un líquido miscible en otro líquido inmisible o viceversa. Un ejemplo de este fenómeno es el aceite en agua, o el agua que se encuentra contenida en el aceite. El primer caso se refiere cuando la fase continua es agua y la fase dispersa o interna es el aceite, hasta que se pueda obtener la unión de las burbujas que se encuentran contenidas en el aceite, se dice que se tiene una emulsión de agua que se encuentra contenida en el aceite (que es mejor conocida como la fase dispersa en el agua). Se han realizado diversos estudios de investigación para lograr una película interfacial, esta película es la que aporta una mayor estabilidad a la emulsión, ya que tiene una mejor resistencia y compatibilidad con los lodos de perforación en la teoría de las emulsiones.

En la mayoría de las emulsiones, el aceite se presenta como la fase dispersa y el agua corresponde a la fase continua; cabe mencionar que las emulsiones inversas como el agua son representadas como la fase dispersa; todo esto se puede lograr gracias a que el agua se puede representar como un emulsificante adecuado, que tiene la capacidad de prevenir que las partículas dispersas vuelvan a juntarse para que puedan formar una fase, y de esa manera poder reducir la tensión interfacial que se encuentra presente, proporcionando una gran estabilidad a la emulsión. Para poder lograr con este cometido, el emulsificador debe presentar gradualmente una película de agua que se encuentre alrededor de las gotas y que pueda tener las características de fuerza y vigorosidad (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

En la **figura 2.7**, se observa la fase externa del aceite, así como las gotas del agua y el emulsificante, en donde el aceite es representado como la fase dispersa y el agua como la fase continua.

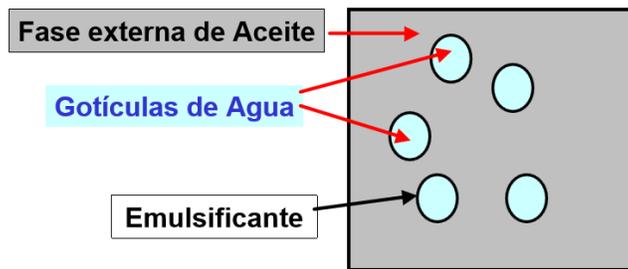


Figura 2.7 Fase externa del aceite. (Tomada de García Hernández, 2014).

En otras emulsiones, las gotas tienden a estabilizarse, esto se logra a través de los iones que se encuentran presentes en la solución y que se debe primordialmente a la absorción. El resultado de las partículas que se encuentran cargadas eléctricamente es que se pueden repeler unas con otras y esto se debe al fenómeno de ionización. La formación de la emulsión, en este caso, el aceite en el agua (que se representa como una fase directa), o del agua que se encuentra presente en el aceite (denominada fase inversa), se debe primordialmente a la solubilidad relativa del emulsificante que se puede encontrar entre las 2 fases. Para todo esto, se puede utilizar un surfactante que sea soluble en agua, como es el caso del Oleato de Sodio, en donde se formará una emulsión directa; porque se reduce la tensión interfacial que se encuentra presente en los lodos de perforación; ya que en el lado de la interfase se encuentra el agua, presentada como la interfase: aceite/agua; de esta forma la interfase presenta una figura curveada, en donde se puede observar a la gota de aceite rodeada por el agua. Por otra parte, se pueden emplear los oleatos de calcio, y el magnesio, que son solubles en aceite, pero no en agua; de esta manera se obtienen las denominadas emulsiones inversas.

Existe una gran variedad de emulsificantes que tienen mayor aplicación en los lodos de perforación base agua, estos son: ácidos grasos, ésteres y éteres, todos estos son sulfonatos y sulfatos. Existen varios métodos para romper una emulsión directa, uno de los más conocidos es cuando se agrega un emulsionante o emulsificante de agua en aceite, la emulsión se invertirá si se le agrega una cantidad grande de emulsionante. Con la ayuda que proporciona la tecnología se pueden elaborar emulsiones estables que tienen una gran importancia en los lodos de perforación, y que son de utilidad en la industria petrolera en general. Todo este proceso se puede llevar a cabo mediante la adsorción de los sólidos que se encuentren divididos como el almidón, carboximetilcelulosa (CMC), las arcillas y algunos materiales coloidales que se encuentran normalmente en la interfase aceite/agua. También se pueden utilizar partículas sólidas que tienen el objetivo de rodear a las gotas que se encuentran dispersas para prevenir un inminente choque.

Con el objetivo de formar emulsiones estables, las partículas que se encuentran presentes deben tener una apariencia de humectación en el aceite, es decir, que sean ligeramente humectantes en agua, de tal manera que puedan coexistir en ambas fases, por ende, se puede establecer que las emulsiones más estables son las que tienden a formar un ángulo de 90° . Los agentes que se encuentran dispersos en estos aditivos coloidales, tal es el caso de los lignosulfonatos presentan una solución alcalina, que tienen como objetivo trabajar como emulsionantes mecánicos, es decir, se forman emulsiones directas que son mucho más estables, poniendo solamente el aceite que se encuentra presente en la emulsión. En los lodos, las emulsiones mecánicas no son muy estables, como las que se presentan en las emulsiones químicas. Cuando se tiene la suficiente estabilidad, la emulsión por sí sola tiende a estabilizarse; agregándose solamente pequeñas cantidades de emulsionantes químicos que se presentan en las emulsiones inversas (Benítez Hernández, Garaicochea Petirena y Reyes Álvarez, 1979).

En la **figura 2.8**, se ilustra de forma esquemática a los lodos base aceite, que son lodos cuya fase continua o externa corresponde al petróleo o los minerales que se tengan, sus propiedades se encuentran influenciadas por la relación aceite/agua. La imagen nos muestra cuando se perforan formaciones con lodos base aceite, ya que en estos casos se tienen recortes que quedan suspendidos en la superficie.

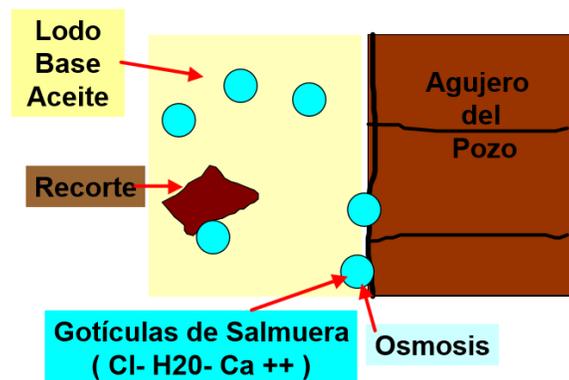


Figura 2.8 Lodo base aceite. (Tomada de García Hernández, 2014).

2.3 Pruebas de las propiedades de campo

Las propiedades que se encuentran presentes en los lodos de perforación, y que se mencionan con frecuencia, deben ser determinadas mediante pruebas de campo que tienen una gran importancia para la investigación; aunado a todo esto, se debe profundizar de una manera más detallada en las propiedades que se encuentran presentes y que deben ser estudiadas en el laboratorio. A continuación, se presentan algunas propiedades, que son importantes; y que el encargado de los lodos de perforación debe tener en consideración cuando los requiera.

Existen pozos petroleros que tienen una profundidad menor a los 2,000 m., esto puede producir la pérdida de agua; pruebas de las alcalinidades y la del filtrado respectivamente. No es de suma importancia que se deba de tener un estudio detallado de la contaminación por carbonato de calcio en el área, por alcalinidad y por filtrado. Cuando se presente una contaminación con los lodos de perforación, en este caso por la presencia de sulfatos o por sulfuros en las formaciones conocidas, (con ácido sulfhídrico), se debe de tener un monitoreo rutinario a fin de poder prevenir accidentes que puedan poner en riesgo la integridad física de los trabajadores; así como de un posible daño a los ecosistemas, la flora, la fauna y el medio ambiente en general.

Cuando se llegue a dar el inconveniente de la pérdida de agua a alta presión, alta temperatura y alto contenido del azul del metileno de los lodos de perforación, se debe de contar con un equipo adecuado para su determinación, a manera de que se puedan prevenir incidentes a la hora de la perforación (*García Hernández, 2014*).

2.4 Conceptos fundamentales de los lodos de perforación.

A continuación, se describen los principales conceptos y características de los lodos de perforación:

Densidad del lodo. Una de las características principales de los lodos de perforación es la densidad, que tiene por objetivo ayudar al mantenimiento de los fluidos que se encuentran en el yacimiento durante el proceso de la perforación. Aunado a esto la densidad desempeña la función de ayudar al mantenimiento de la presión que se necesita en el yacimiento; la máxima densidad del lodo requerida en la perforación de los pozos petroleros se encuentra sujeta por el gradiente de presión. Los lodos de perforación pueden tener un rango de densidades que pueden variar de 1.07 a 2.50 (g/cm^3). Las unidades más comunes que intervienen con la densidad son las: libras por galón (lbs/gal), kilogramos por centímetro cúbico (kg/cm^3), siendo esta, la que más se utiliza en los trabajos que se realizan en el campo (*García Hernández, 2014*).

Los fluidos de perforación deben de mantener una presión hidrostática que sea ligeramente superior o igual a la presión que se encuentra en la formación; para que de esta forma se eviten posibles daños a la formación, o al descontrol del pozo. En años anteriores se utilizaron una gran variedad de sustancias que fueron utilizadas principalmente como agentes que incrementaban la densidad de los lodos de perforación, tales materiales fueron: óxido de hierro, la barita, el carbonato de calcio y la sílica amorfa. De estos materiales, solo la barita se sigue utilizando en la actualidad, debido a su alta densidad y a su bajo costo (*García Hernández, 2014*).

Esta propiedad, generalmente se encuentra expresada en términos de la masa por la unidad de volumen. Adicionalmente, se desea que el lodo de perforación tenga una densidad tan baja como la que presenta el agua; para que se puedan obtener excelentes velocidades de penetración y poder disminuir las pérdidas de circulación.

Cuando se tiene un lodo de perforación con una densidad que sea dos veces y media más de la del agua; se ayuda a prevenir posibles derrumbes en las formaciones, que son ocasionadas por las formaciones deleznable y poco cohesivas. Como una regla de oro que se tiene para la obtención de la velocidad de penetración, la densidad del lodo deberá encontrarse en un valor que sea mínimo, para que se pueda tener un equilibrio de la presión presente en la formación; y que se pueda tener un sobre balance, para cumplir con las condiciones de seguridad para los sondeos en los pozos, durante los viajes que se tienen en las tuberías, y los denominados viajes de la perforación.

Se pueden tomar como excepciones para esta regla, cuando se está perforando, que se tenga la baja permeabilidad de las formaciones que se encuentran sobrepresionadas, donde se pueden observar formaciones plásticas o hidratables, ya que éstas tienden a cerrarse sobre el agujero que está siendo perforado. En este caso, lo ideal sería perforar con la ayuda de un preventor rotatorio en la superficie, para poder aminorar el flujo que se encuentra en las formaciones. Para un segundo caso, se tiene que prever el ajuste detallado de las propiedades de los lodos de perforación; ya que en la mayoría de las ocasiones tienden a aumentar la densidad para evitar futuros derrumbes en las formaciones cuando se está perforando. Esto depende única y exclusivamente de las formaciones que han sido perforadas; así como de la velocidad de penetración, y del uso adecuado del equipo superficial, para poder contrarrestar los sólidos que se encuentran presentes en las formaciones.

Los siguientes factores pueden influir en un cambio significativo en la densidad de los lodos de perforación:

a) Aire o gas en el lodo:

Suele suceder que, en los equipos de perforación, cuando se presenta la denominada línea de flujo, el lodo de perforación es presentado con un corte de aire o de gas. Todos estos factores que se presentan son de suma importancia y deben ser tomados en cuenta para conocer las diversas causas que se tienen, cuando el gas o el aire se encuentran presentes en los lodos de perforación. Estos factores deben ser previstos con anterioridad, ya que son de suma importancia y como consecuencia, la densidad del lodo disminuye al jugar un papel de gran relevancia, para que una situación de esta magnitud pueda ser controlada en la formación, o en todo caso en el campo. Existen muchos factores que se deben de tomar en consideración, como el decremento de la presión hidrostática que se tiene cuando el gas se mezcla con los lodos. Cada burbuja del gas tiende a expandirse desde su volumen original que presentan las condiciones de fondo, que se tienen cuando el gas entra en contacto con los lodos de perforación.

b) Presión hidrostática:

La presión hidrostática puede ser definida como la presión ejercida por una columna de fluido, a una profundidad vertical dada, que actúa en todas direcciones. La expresión matemática que se tiene de esta ecuación se encuentra denotada como: La presión hidrostática es igual al gradiente de presión por la profundidad vertical

desde un punto, esta condición también modifica la densidad de los lodos de perforación (*McCray, Arthur v. y Cole Frank, 2014*).

$$P = \rho gh + P_o$$

Viscosidad API. Es una medida de oposición interna que presentan los fluidos al desplazarse en forma directa a la presión y temperatura del yacimiento. Los lodos de perforación tienen características muy especiales en sus flujos no lineales (denominados tixotrópicos), y que la mayoría de los casos se requiere de más de un término de viscosidad para poder definir el comportamiento viscoso. Los lodos de perforación deben tener las propiedades adecuadas de viscosidad para lograr una óptima potencia hidráulica a la barrena a la hora de perforar, considerando que el agujero debe estar limpio en el espacio anular. Se necesita de una baja viscosidad efectiva para que los lodos de perforación puedan proporcionar la función de desprender los recortes al llegar a la superficie; todo esto aunado a que deben tener la suficiente gelatinosidad para poder movilizar a los recortes sólidos que se encuentran en suspensión.

La manera de medir la viscosidad es con el embudo March (viscosímetro de March), con él se puede determinar la densidad en unos cuantos segundos y todo esto puede ser evaluado en un rango normal que va de los 45 a los 75 segundos para los lodos que se denominan base agua, y hasta de 160 segundos para los lodos de emulsión inversa. La viscosidad tiende a aumentar a medida que se modifica la composición química del lodo por los contaminantes que son introducidos en el pozo o cuando el contenido de sólidos se incrementa; en estos casos, la viscosidad también tiende a aumentar. Por otra parte, la viscosidad disminuye cuando la temperatura aumenta (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

Viscosidad plástica. Es la oposición de los fluidos que se encuentran en movimiento y que es causada principalmente por la fricción mecánica. Las unidades con la que se calcula la viscosidad plástica se encuentran en centipoise (cp). La fricción es producto del volumen de los sólidos que se encuentran contenidos en los lodos de perforación y de la cantidad de líquido que se encuentra presente y que rodea a los lodos, más el esfuerzo cortante que se encuentra contenido en el propio líquido. La viscosidad plástica aumenta a medida que se incrementa el número de sólidos que se encuentran contenidos en el sistema. El control que se tiene de los lodos de perforación es de alto y bajo peso, muy valioso para poder alcanzar altos estándares de penetración de los lodos en las formaciones productoras de aceite o gas (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

Punto de cedencia. Es una medida de las fuerzas de atracción entre las partículas bajo ciertas condiciones dinámicas de flujo; es la fuerza que ayuda a mantener el fluido que se encuentra en movimiento. Las unidades del punto de cedencia son libras/100 pies cuadrados (lb/100 ft²). El punto de cedencia se encuentra

relacionado con la capacidad de la limpieza que tienen los fluidos bajo ciertas condiciones dinámicas y que sufren generalmente un incremento por la acción de los contaminantes presentes como el calcio, el carbonato de calcio, y sobre todo por los sólidos contaminantes que se encuentran en la formación, también se utilizan los adelgazantes químicos cuando hay un exceso de agua y de sólidos arcillosos. Cuando el fluido tiende a deshidratarse debido a las altas temperaturas (*García Hernández, 2014*).

Resistencia o fuerza de gel. La resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo ciertas condiciones estáticas. Las mediciones más comunes de esta propiedad se pueden calcular en un lapso que va de los 10 segundos hasta los 10 minutos; y se pueden tomar en cualquier intervalo de tiempo. La resistencia o fuerza del gel permite el buen funcionamiento de las bombas y una adecuada velocidad de circulación. El conocimiento de esta propiedad es muy importante para prevenir las dificultades que se presentan cuando los lodos se encuentran en circulación, ya que la resistencia a la gelatinización debe ser suficientemente baja para que las arenas y los recortes puedan ser depositados en los tanques de decantación (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

Filtrado API. También se le denomina pérdida de agua. Es la cantidad de agua que proviene del lodo que se filtra hacia las formaciones permeables y que debe mantenerse lo más bajo posible para poder tener una buena estabilidad en el agujero para evitar daños a la formación, se conocen básicamente 2 tipos de filtración: la filtración estática y la filtración dinámica; la primera ocurre cuando el lodo no se encuentra en movimiento, mientras que la filtración dinámica ocurre cuando el lodo de perforación fluye a lo largo de la superficie filtrante. El control del filtrado API consiste en la prevención de una pérdida excesiva del filtrado hacia la formación (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

En la imagen **2.9**, se ilustra de forma muy esquemática la filtración estática de un lodo base agua a temperatura ambiente y a una presión diferencial de 100 psi.



Figura 2.9 Prensa con filtro API. (Tomada de www.google.com.mx/url?,2016).

CUESTIONARIO #1

1.) ¿Qué es la viscosidad API?

Es una medida de la oposición interna que presentan los fluidos al desplazarse en forma directa a la presión y temperatura del yacimiento. Los lodos de perforación tienen características muy especiales en sus flujos no lineales (denominados tixotrópicos), y que en la mayoría de los casos se requiere de más de 1 término de viscosidad para poder definir el comportamiento viscoso.

2.) Menciona cuáles son las ocho funciones principales de los lodos de perforación.

El enfriamiento y lubricación de la barrena.

La transmisión de la potencia hidráulica a la barrena.

El transporte y acarreo de los recortes

El control de las presiones en la formación

La estabilidad de las paredes del pozo

La ayuda en la toma de los registros geofísicos eléctricos

La sustentación de la sarta de perforación

La suspensión de los recortes

3.) ¿A qué se le denomina resistencia o fuerza de gel?

La resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo ciertas condiciones estáticas. Las mediciones más comunes de esta propiedad se pueden calcular en un lapso que va de los 10 segundos hasta los 10 minutos; y se pueden tomar en cualquier intervalo de tiempo. La resistencia o fuerza del gel permite el buen funcionamiento de las bombas y una adecuada velocidad de circulación. El conocimiento de esta propiedad es muy importante para prevenir las dificultades que se presentan cuando los lodos se encuentran en circulación, ya que la resistencia a la gelatinización debe ser suficientemente baja para que las arenas y los recortes puedan ser depositados en los tanques de decantación.

4.) Explique brevemente qué es el filtrado API.

Es la cantidad de agua que proviene del lodo que se filtra hacia las formaciones permeables y que debe mantenerse lo más bajo posible para poder tener una buena estabilidad en el agujero para evitar daños a la formación, se conocen básicamente dos tipos de filtración: la filtración estática y la filtración dinámica; la primera ocurre cuando el lodo no se encuentra en movimiento, mientras que la filtración dinámica ocurre cuando el lodo de perforación fluye a lo largo de la superficie filtrante. El control del filtrado API consiste en la prevención de una pérdida excesiva del filtrado hacia la formación.

5.) Explique brevemente qué es el punto de cedencia.

Es una medida de las fuerzas de atracción entre las partículas bajo ciertas condiciones dinámicas de flujo; es la fuerza que ayuda a mantener el fluido en movimiento. Las unidades del punto de cedencia son libras/100 pies cuadrados ($\text{lb}/100 \text{ ft}^2$). El punto de cedencia se encuentra relacionado con la capacidad de la limpieza que tienen los fluidos bajo ciertas condiciones dinámicas y que sufren generalmente un incremento por la acción de los contaminantes presentes como el calcio, el carbonato de calcio, y sobre todo por los sólidos contaminantes que se encuentran en la formación; también se utilizan los adelgazantes químicos cuando hay un exceso de agua y de sólidos arcillosos, cuando el fluido tiende a deshidratarse debido a las altas temperaturas.

CAPÍTULO 3. TIPOS DE LODOS DE PERFORACIÓN.

Los lodos de perforación se dividen en 3 grandes grupos generales: (neumáticos, base agua y base aceite), que son los más utilizados en la industria petrolera en general, siendo los lodos base agua y los lodos base aceite los que se emplean mayoritariamente a la hora de perforar los pozos petroleros, los lodos neumáticos tienen una gran relevancia, pero son utilizados en menor proporción.

3.1 Neumáticos.

Son aquellos lodos que son utilizados en situaciones donde la perforación con fluidos líquidos no es adecuada. Estos lodos corresponden a aire, espumas, lodos aerados, se utilizan principalmente para perforar formaciones muy porosas o formaciones subnormalmente presurizadas.

3.1.1 Aire seco.

El aire seco es la sustancia con la que se pueden obtener altos valores en la velocidad de penetración cuando se perforan pozos petroleros. La aplicación del aire seco se aplica para agujeros inestables y formaciones en donde la producción de agua es abundante y donde el factor económico juega un rol preponderante a la hora del análisis de cuan rentable es el proyecto. La mayor amenaza que se puede presentar con el aire seco, es la presencia del gas metano que puede ocasionar explosiones y derrumbes si no se toman las condiciones necesarias de seguridad. La composición química del aire seco es: Oxígeno (O₂): 20.98%, dióxido de carbono (CO₂): 0.04%, nitrógeno (N): 78.06%, otros 0.92% (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

En la **figura 3.1**, se pueden observar las diferentes sustancias con las que se puede perforar en las formaciones petroleras, en el caso de los lodos de perforación neumáticos; tal es el caso del aire o gas, niebla, espuma, líquido gasificado y líquido.

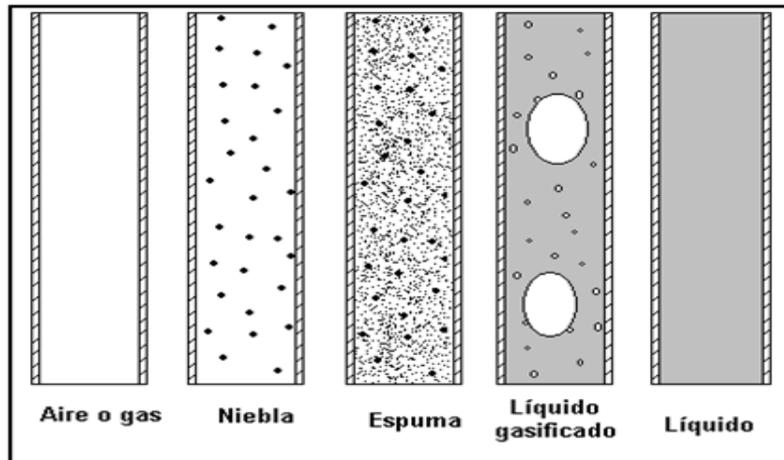


Figura 3.1 Diferentes sustancias que se utilizan en la perforación de pozos petroleros (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

3.1.2 Niebla.

La perforación que se lleva a cabo con niebla en las formaciones geológicas, se da cuando el aire seco se mezcla con pequeñas cantidades de agua y surfactantes, que la mayoría de las veces son inyectados a grandes velocidades, cuando existe la presencia de aire. La niebla es de mucha utilidad en la perforación de pozos petroleros cuando existen formaciones que contienen pequeñas cantidades de agua en las formaciones productoras. Uno de los factores a tomar en cuenta, es que pueden ocurrir derrumbes subterráneos y ese es un riesgo que se debe evaluar (García Hernández, 2014).

3.1.3 Espumas.

Las espumas son elaboradas, con una combinación de agua y surfactantes espumosos, la que se inyecta con la presencia de corrientes de aire; que propicia la creación de una mezcla viscosa. Por otra parte, hay espumas estables que se elaboran inyectando un alto contenido de lodos de perforación con surfactantes. La capacidad que tienen los lodos elaborados con espuma es la de acarrear eficientemente a los recortes, dada su alta viscosidad, aunado a la velocidad anular que se presenta en las formaciones. Realizando una comparación con el aire, la espuma ejerce una presión mayor sobre las formaciones. La composición química de la espuma es: Polioliol (Polioxipropilenglicol) 55% al 70% y TDI (Di-isocionato de Tolueno) 25% al 35% (McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011).

3.1.4 Lodos aereados.

Los lodos aerados son el resultado de la elaboración de la inyección de aire más una mezcla gelatinosa. Tienen una gran utilidad en la perforación de formaciones que presentan una baja presión y cercanas a la superficie terrestre; su uso debe ser cuidadoso ya que, si se utilizan a mayor profundidad, se pueden presentar casos de pérdida de la circulación en algunas formaciones (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

3.2 Lodos base agua.

Los lodos base agua, son lodos de perforación en donde el agua dulce o el agua salada son la fase líquida principal; además de la presencia de la fase mojante o externa. Las categorías generales de los lodos base agua son: agua dulce, agua de mar, cal, potasio y el silicato. Los componentes principales de estos lodos son el agua, la barita y la bentonita.

En la **tabla 3.2**, se muestran los niveles de pH que se utilizan con cemento en los lodos de agua dulce, agua salada o salobre, agua salada saturada; así como la pérdida del filtrado.

	POLY-SAL™	MY-LO-JEL™	CMC (reg.)	CMC (LV)	SP-101®	RESINEX®	POLYPAC® UL
Bajo pH lodo de agua dulce	A	A*	E	E	E**	A	E
Alto pH lodo de agua dulce	A	E	E	E	E**	A	E
Lodo de agua salada o agua salobre	A	A*	E	E	NU	E	E
Lodo de agua salada saturada	E	E	A	A	NU	NU	B
Lodo tratado con cal	E	E	B	B	NU	E	B
Lodo KCl	E	E*	E	E	NU	A	E
Lodo yeso	B	A*	E	E	NU	E	E
E — Excelentes resultados		NU — No usado					
B — Buenos resultados		* Se necesita preservativo					
A — Resultados aceptables		** El calcio soluble debería ser mantenido al nivel más bajo posible					
Observación: Cuando se desea una pérdida de filtrado extremadamente baja, el almidón da mejores resultados que la CMC. Cuando se desea obtener mejores calidades de suspensión, CMC o POLYPAC dará mejores resultados que el almidón o SP-101. Cuando concentraciones extremadamente altas de sales están presentes, el almidón, SP-101 o POLYPAC UL darán mejores resultados que la CMC.							

Figura 3.2 Pérdida filtrado lodos base agua (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

3.2.1 Lodos iniciales.

Estos lodos son utilizados en la perforación del agujero del tubo conductor, su composición es el resultado de una mezcla viscosa de bentonita y de atapulgita que tiene por composición química: SiO₂: 61.82%, Al₂O₃: 13.62%, Fe₂O₃: 1.87%, TiO₂: 1.67%, CaO: 1.72%, MgO: 8.56%, Na₂O: 0.13%, K₂O: 0.78% y la pérdida de calcinación 11.14%; proporcionan una buena capacidad de acarreamiento y tienen gran importancia en la limpieza de los agujeros de gran diámetro. Estos lodos son desechados después de culminar con la perforación del agujero del tubo conductor, ya que en general no se cuenta con el equipo que pueda tener la función de recuperar volúmenes importantes (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

3.2.2 Lodos bentoníticos.

Son aquellos lodos de perforación que son utilizados en pozos someros y en áreas que no presentan complicaciones a la hora de realizar la perforación. Una de las funciones más importantes es la mejora en la capacidad de acarreo durante la perforación, además de que se eliminan problemas que pudiesen surgir en las formaciones, si solo se utilizara agua. La composición química de los lodos bentoníticos es: SiO_2 : 49.40%, Al_2O_3 : 14.95%, TiO_2 : 0.78%, CaO : 7.76%, MgO : 2.35%, Fe_2O_3 : 7.85%, Mn : 0.02%, SO_3 : 0.1%, Na_2O : 1.25%, K_2O : 0.78%, P_2O_5 : 0.020% y PPL: 13.5% (García Hernández, 2014).

En la **figura 3.3**, representa de una forma sencilla pero muy ilustrativa las fases, tanto la fase continua como la fase discontinua; sobre todo como se encuentran relacionadas y separadas tanto el aceite como el agua.

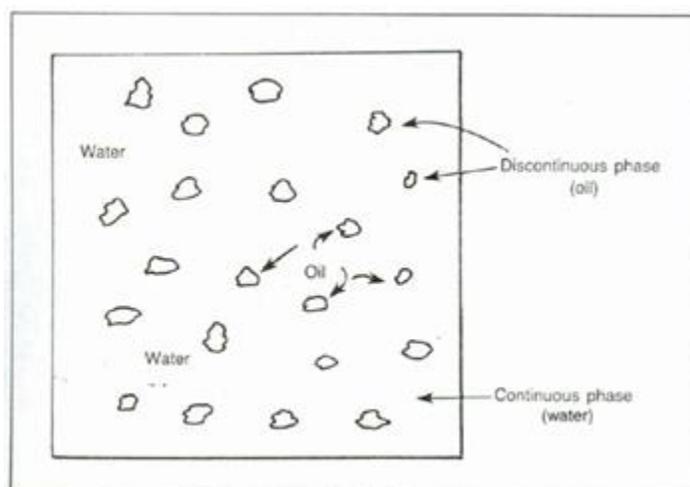


Figura 3.3 Fase continua del agua y fase discontinua del aceite (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

3.2.3 Lodos tratados con fosfatos.

Estos lodos, son de origen inorgánico y tienen la función de reducir la alta viscosidad de los lodos bentoníticos que presentan contaminantes sólidos en las formaciones productoras; en general, son inestables, ya que no soportan temperaturas mayores a los 150° F, sin embargo, tienen un alto grado de eficiencia cuando son utilizados como dispersantes químicos, ya que solo se necesitan cantidades muy pequeñas para controlar el flujo en las formaciones; además es importante considerar que resisten temperaturas muy altas en el fondo del pozo, por lo que juegan un papel muy importante en zonas con gradientes geotérmicos altos, además de que son eficientes y de bajo costo. La composición química de los fosfatos es: P_2O_5 : 11.17%, SiO_2 : 1.78%, Materia orgánica y agua: 70.70%, sales alcalinas 2.48%, CaO : 10.93% (McCray Arthur V. y Cole Frank, 2014).

3.2.4 Lodos gel-químicos.

Los lodos de perforación denominados gel-químicos, corresponden a la mezcla de bentonita con pequeñas cantidades de adelgazante, que tienen la función de reducir la viscosidad. Estos lodos tienen muchas similitudes con los lodos tratados con fosfatos, teniendo la siguiente composición química: P_2O_5 : 11.17%, SiO_2 : 1.78%, Materia orgánica y agua: 70.70%, sales alcalinas 2.48%, CaO : 10.93%. La mayor ventaja de estos lodos, es que pueden ser usados a mayores profundidades y no como los fosfatos, que solo se utilizan en formaciones de poca profundidad (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

3.2.5 Lodos tratados con lignitos y lignosulfonatos.

Estos lodos de perforación son lo último en la vanguardia tecnológica ya que toman como base a los lodos gel-químicos, los que a medida que la presencia de sólidos va incrementándose se tienen que agregar cantidades mayores de lignosulfonatos para poder controlar el punto de cedencia, lo que permite contar con una mejor consistencia. Estos lodos son tratados con lignitos y lignosulfonatos, para que presenten una mayor resistencia a la contaminación por el calcio cuando se tiene un incremento de cloruros. Los lodos con lignitos y lignosulfonatos se pueden tomar como punto de partida para la elaboración de lodos de perforación con una densidad muy elevada; puedan tener una estabilidad a temperaturas mayores a los 400° F, considerando que los lignitos sirven principalmente para contrarrestar el filtrado; por otra parte los lignosulfatos son ingredientes químicos más efectivos en el adelgazamiento de los fluidos de perforación (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

3.2.6 Lodos cálcicos.

Los lodos cálcicos, tienen una gran aplicación en la perforación de pozos que tienen capas de un espesor muy reducido en anhidrita y en zonas donde el flujo de agua salada tiene una gran presencia; también se utilizan cuando se tienen lutitas deleznales. En estos lodos, las arcillas sódicas (como la bentonita), son arcillas que sufren una transformación y pasan a ser arcillas cálcicas (*García Hernández, 2014*).

3.2.7 Lodos con adición de cal.

Los lodos con adición de cal, son preparados principalmente con sosa cáustica, cal hidratada, más la suma de adelgazantes orgánicos, encontrados muy comúnmente en los lodos bentoníticos. La composición química de estos lodos es: SiO_2 : 49.40%, Al_2O_3 : 14.95%, TiO_2 : 0.78%, CaO : 7.76%, MgO : 2.35%, Fe_2O_3 : 7.85%, Mn : 0.02%, SO_3 : 0.1%, Na_2O : 1.25%, K_2O : 0.78%, P_2O_5 : 0.020% y PPL: 13.5%. Estos lodos, pueden llegar a resistir contaminantes que se encuentran muy por encima de las 50,000 partes por millón de sal (30,000 cloruros); por otra parte cuando son

expuestos a altas temperaturas tienden a presentar una alta gelatinosidad y una solidificación muy rápida.

3.2.8 Lodos con adición de yeso.

Los lodos con la adición de yeso, son utilizados en la perforación de formaciones con anhidrita y yeso, fundamentalmente se presentan en aquellas formaciones que tienden a tener intercalaciones de sal y lutita. Este lodo, se elabora a partir de lodos naturales con la adición del sulfato de calcio (CaSO_4) más los lignosulfonatos.

3.2.9 Lodos de polímeros de bajo contenido de sólidos no dispersos.

Tienen como objetivo fundamental separar a los sólidos que se encuentran contenidos en los lodos de perforación; los que se pueden recubrir y ser floculados, con lo que se facilita su desplazamiento, con lo que se propicia una mejora sustancial en la estabilidad; además contribuye a mejorar las características de perforación que se encuentran presentes en las formaciones.

Los principales lodos de perforación de este tipo, son los denominados polímeros de bajo contenido de sólidos no dispersos, que son elaborados con la utilización de polímeros con bentonita, por lo que se evita el uso de dispersantes, por lo que se elaboran con bentonita de polímeros floculantes, con una concentración mínima de sólidos. Comúnmente se pueden preparar con la utilización de los polímeros reductores con poco recubrimiento, más floculantes; todo esto se lleva a cabo en formaciones bentoníticas. La composición química representativa de estos lodos es: SiO_2 : 49.40%, Al_2O_3 : 14.95%, TiO_2 : 0.78%, CaO : 7.76%, MgO : 2.35%, Fe_2O_3 : 7.85%, Mn : 0.02%, SO_3 : 0.1%, Na_2O : 1.25%, K_2O : 0.78%, P_2O_5 : 0.020% y PPL: 13.5%. Los lodos de perforación de éste tipo permiten contener las altas velocidades de perforación que se encuentran presentes, gracias a las propiedades tixotrópicas. En el caso de que los lodos contengan polímeros, se vuelven estables a cualquier temperatura, dado que casi no existe presencia de sólidos (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

3.2.10 Lodos salados.

Se tienen los siguientes 2 tipos principales:

Lodos de baja salinidad (1% de NaCL o <10,000 ppm).

Estos lodos presentan altas velocidades de filtración y enjarres gruesos, y se caracterizan por tener una baja salinidad, por lo que utilizan reactivos orgánicos para su control. Presentan un pH generalmente de 8.0; aunque pueden tener valores de pH mayores a 9.5, con lo que se controla la fermentación de los agentes reductores que se encuentran presentes en el filtrado. Son de utilidad para contrarrestar la presencia de una alta salinidad, la que puede ser producida por el agua de mar, la sal añadida (NaCL) o la sal que se encuentra disuelta y que proviene muy comúnmente de formaciones salinas.

Lodos salados saturados.

Se utilizan principalmente en la perforación de los domos salinos, donde se presentan diversos problemas como es el caso del agrandamiento del agujero causado por la utilización de lodos base agua. Con la utilización de estos lodos, se controla el filtrado antes de llegar a la perforación de los domos salinos; todo esto se lleva a cabo por medio de los agentes de control de la filtración; la filtración se reduce lo máximo posible hasta 1 cc según la API. El control de las propiedades de los lodos salados saturados consiste en agregar agua salada para poder reducir de forma considerable la viscosidad de la atapulgita, cuya composición química es: SiO₂: 61.82%, Al₂O₃: 13.62%, Fe₂O₃: 1.87%, TiO₂: 1.67%, CaO: 1.72%, MgO: 8.56%, Na₂O: 0.13%, K₂O: 0.78% y la pérdida de calcinación 11.14%, también se usan para poder tener un aumento en la sustentación, posteriormente se deben agregar agentes reductores que puedan controlar el filtrado, proveniente de las formaciones.

3.2.11 Lodos salados de aplicación especial.

Estos lodos se elaboran a partir de polímeros, los cuales tienden a aumentar la viscosidad en el agua salada. Algunos de ellos tienen una aplicación principal en la reparación de los pozos petroleros o en las operaciones que se realizan costa fuera y en áreas que puedan tener una alta viscosidad. Estos son muy parecidos a los lodos convencionales, solo que se agregan aditivos que sirven para estabilizar a las lutitas (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

3.3 Lodos base aceite:

Son aquellos lodos cuya fase continua o externa corresponde a petróleo crudo o minerales de éste. Sus propiedades se encuentran influenciadas por la relación aceite/agua, el tipo de emulsificador, la concentración y el contenido de los sólidos. Estos lodos constituyen una emulsión de agua en aceite, es decir, una emulsión inversa donde la fase dispersa es el agua y la fase continua al igual que el filtrado es el aceite (*García Hernández, 2014*).

En la **figura 3.4**, se puede observar cómo la fase dispersa se encuentra en mayor proporción y la fase continua, el aceite, se encuentra en menor medida. La mayoría de las veces la fase continua es líquida (en este caso aceite).

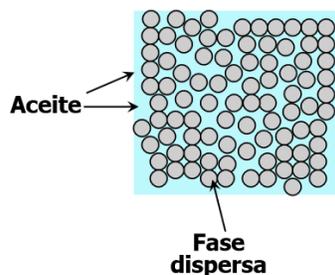


Figura 3.4 Fase dispersa del aceite (Tomada de García Hernández, 2014).

3.3.1 Lodos de aceite que tienen menos del 5% de agua.

Estos lodos tienen como función principal, prevenir las contaminaciones de agua que se presentan frecuentemente en las formaciones productoras, tienen mucha utilidad en el muestreo de las formaciones que se encuentran en un estado nativo, son inertes a los contaminantes que se presentan, tal es el caso del ácido sulfhídrico (H_2S), anhídrita, y de las secciones salinas presentes en estas formaciones. Los lodos de aceite se preparan normalmente cuando el crudo ha sido desgasificado previamente.

3.4 Emulsión inversa.

La emulsión inversa de agua en aceite, ocurre cuando se presenta al agua como la fase dispersa, y al aceite (generalmente se utiliza diésel), como una fase continua. Existen valores muy superiores al 40% en donde el agua contenida se puede dispersar y ser emulsificada en el aceite. Esta emulsión tiene muchas propiedades y características en los lodos base aceite, ya que el aceite es la fase continua y el filtrado se presenta de forma exclusiva como aceite. Presentan una gran estabilidad cuando son expuestos a altas temperaturas, además de que las contaminaciones químicas que se presentan no tienen repercusión en esta emulsión. Cabe hacer énfasis que la emulsión inversa, puede ser ajustada a la relación aceite-agua. El uso de la emulsión inversa y de los lodos de perforación base aceite necesitan medidas de protección ambientales (George R. Gray y Hch Darley, 1980).

Como se puede observar en la **figura 3.5**, en la primera foto, la fase dispersa es el aceite y la fase continua es el agua, en la segunda imagen la fase dispersa es el agua y la continua es el aceite; la tercer foto nos muestra un sistema múltiple en donde se puede encontrar tanto la fase dispersa como la fase continua en una sola imagen.

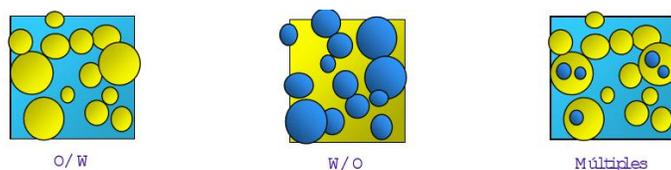


Figura 3.5 Emulsión inversa del agua y del aceite (Tomada de George R. Gray y Hch Darley, 1980).

3.5 Lodos biodegradables.

Los lodos de perforación 100% biodegradables pueden ser divididos en 3 grupos, los cuales se enuncian a continuación:

Espesantes. El principal producto utilizado es el celutrol mix plus, es un agente 100% biodegradable, sirve para el control del filtrado; es una mezcla de polímeros que ayuda al control de las filtraciones que muy comúnmente ocurren en las

formaciones permeables. Debe ser mezclado con bentonita en una relación de 11 a 1, es decir, 11 partes de bentonita y 1 parte de celutrol mix plus. Con este producto se aumenta la estabilidad en el pozo, por otra parte ayuda a economizar el uso de la bentonita. Para tener un buen manejo de la viscosidad de este aditivo se puede tener un encapsulador de arcillas ya que como agente viscosificante permite tener un alto rendimiento en la expansión de las arcillas, porque presenta un alto poder de encapsulación.

Lubricantes. Son grasas 100% vegetales, sirven para mejorar las condiciones de la perforación de las herramientas, tanto en la parte interna como externa de las uniones. Existe un lubricante denominado sm lube que ayuda a la lubricación de la tubería de perforación, ya que son grasas 100% biodegradables.

Aditivos. Son agentes parafinantes que sirven para la prevención de las obstrucciones de las tuberías y de las barrenas, para inhibir a las arcillas y sellar los pozos cuando existen problemas de no retorno; así como para suplantar en un 100% a la bentonita, o al agente tixotrópico goma gel (*impomin mud systems, 2012*).

CUESTIONARIO #2

1.) Mencione los lodos de perforación más utilizados en la industria petrolera.

- a) Lodos neumáticos
- b) Lodos base agua
- c) Lodos base aceite

2.) ¿Cuáles son los lodos aereados?

Los lodos aereados son el resultado de la elaboración de la inyección de aire más una mezcla gelatinosa. Tienen una gran utilidad en la perforación de formaciones que presentan una baja presión y cercanas a la superficie terrestre; su uso debe ser cuidadoso ya que si se utilizan a mayor profundidad, se pueden presentar casos de pérdida de la circulación en algunas formaciones.

3.) Mencione el nombre de los lodos de perforación base agua, que tienen gran repercusión en la industria petrolera.

- a) Lodos iniciales
- b) Lodos bentoníticos
- c) Lodos tratados con fosfatos
- d) Lodos gel – químicos
- e) Lodos tratados con lignitos y lignosulfonatos
- f) Lodos cálcicos
- g) Lodos con adición de sal
- h) Lodos con adición de yeso

- i) Lodos de polímeros con bajo contenido de sólidos no dispersos
- j) Lodos salados
- k) Lodos de baja salinidad
- l) Lodos salados saturados
- m) Lodos salados de aplicación especial

4.) Explique cómo se elaboran las espumas de los lodos de perforación e indique su composición.

Las espumas son elaboradas, con una combinación de agua y surfactantes espumosos, las que se inyectan con la presencia de corrientes de aire; que propicia la creación de una mezcla viscosa. Tienen la capacidad de acarrear eficientemente a los fluidos, dada su alta viscosidad, aunado a la velocidad anular que se presenta en las formaciones. La composición química de las espumas es: Polirol (Polioxipropilenglicol) 55% al 70% y TDI (Di-isocionato de Tolueno) 25% al 35%.

5.) Describa brevemente las principales características de los lodos base aceite.

Son aquellos lodos cuya fase continua o externa corresponde a petróleo crudo o a sustancias relacionadas. Sus propiedades se encuentran influenciadas por la relación aceite/agua, el tipo de emulsificador, la concentración y el contenido de los sólidos. Estos lodos constituyen una emulsión de agua en aceite, es decir, una emulsión inversa donde la fase dispersa es el agua y la fase continua, al igual que el filtrado, es el aceite.

CAPÍTULO 4. LA QUÍMICA DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.

La gran variación en la composición química que se tiene de los lodos de perforación se explica por su gran variedad de casos diferentes que se tienen al perforar un pozo en la industria petrolera, por lo que se tiene información tanto de sus propiedades como de sus aplicaciones. Al realizar un estudio de la química de los lodos, se deben de considerar una gran cantidad de variables. En este capítulo se describen las fases de los lodos, que corresponden con la fase continua, la discontinua y la sólida. Se describen las consideraciones químicas básicas, sobre las arcillas y la forma como se clasifican; también se trata lo referente a los agentes densificantes, los polímeros, así como las interacciones químicas y las reacciones que se llevan a cabo.

4.1 Fases de los lodos.

Un lodo de perforación es una suspensión de sólidos, líquidos y gases contenidos en un líquido, en el cual todos esos materiales se encuentran suspendidos y son la fase continua del lodo. Las partículas sólidas o los glóbulos líquidos suspendidos constituyen la fase discontinua del lodo. El agua es la fase continua y las arcillas son la fase discontinua o interna, en los lodos constituidos principalmente de agua y arcillas. Por otra parte, en el caso de que se tenga una emulsión inversa, el petróleo es la fase continua y los glóbulos contenidos en el agua son la fase discontinua. El aumento en la concentración de la fase continua tiende a adelgazar a los lodos de perforación y por otra parte, el filtrado proviene en su mayor parte de la fase continua; mientras que el revoque se forma a partir de la fase discontinua. La fase continua de un lodo siempre es líquida; en cambio en la fase discontinua se pueden hallar sólidos, líquidos y gases (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

4.1.1 Fase continua de los lodos.

La fase continua presente de un lodo de perforación base agua, es siempre agua, considerando que las sales disueltas en el agua son parte también de la fase continua, estos son principalmente los cationes Na^+ (sodio) y Ca^{2+} (calcio) y el anión OH^- (oxhidrilo); son de suma importancia en el comportamiento de los lodos base agua. Si la concentración de los iones Na^+ o Ca^{2+} es demasiado alta, estos tienden a provocar una inhibición de la hidratación de las arcillas añadidas al lodo. Por otra parte, si esos cationes entran en la fase continua de un lodo en el cual las arcillas ya se encuentran hidratadas, se produce una floculación instantánea; posteriormente se lleva a cabo la deshidratación de las arcillas. Los cationes K^+ (potasio) y NH_4^+ (amonio), son añadidos deliberadamente a la fase continua de ciertos lodos, en donde se producen resultados muy similares.

La concentración de los iones oxhidrilo que se encuentran presentes en los lodos, se refleja en la medición de la alcalinidad Pf y en el pH; cuantos más iones oxidrilo se encuentren presentes, mayores serán la Pf y el pH. Los iones oxidrilo tienden a mejorar la dispersión en las arcillas, también reducen el efecto de muchos contaminantes e inhiben la corrosión. La sal común de un lodo de perforación base agua se toma como ejemplo, ya que la sal se disuelve por completo, y se ioniza en el agua, hasta llegar al punto de saturación; en este nivel de saturación, la sal se mantiene en estado sólido y se dispersa como sólido en la fase discontinua del lodo (*García Hernández, 2014*).

4.1.2 Fase discontinua de los lodos.

En la fase discontinua de los lodos de perforación, los glóbulos de petróleo que se encuentran emulsionados en un lodo base agua, tienden a viscosificar al lodo y a reducir su densidad. El petróleo del lodo puede añadirse o puede ser aportado por las formaciones perforadas; lo más común es cuando se tienen cantidades significativas de petróleo en un lodo de base agua, se trata de petróleo añadido deliberadamente para reducir la fricción mecánica, en otros casos, también se utiliza para reducir la filtración a través de las paredes y en otras condiciones para liberar la tubería que se encuentra aprisionada por el efecto de la presión diferencial. El agua emulsionada en un lodo base aceite se hace más viscoso, por lo que, la proporción petróleo/agua en un lodo base aceite debe ser cuidadosamente controlada. La entrada de agua a la formación en este tipo de lodos se hace mucho más viscoso y por otra parte, si es suficientemente abundante desestabilizará la fase discontinua de los lodos.

El aire o el gas que penetran, se distribuyen uniformemente en los lodos, provocando que sean más espesos y que tengan una considerable disminución en su densidad (todo esto debido a la comprensibilidad de los gases); cabe mencionar que la reducción de la densidad del lodo en el pozo no es igual a la que puede presentarse en la superficie. La mayoría de las veces, el aire penetra en el lodo de perforación como consecuencia de las operaciones que se llevan a cabo en la superficie (mezcla, conexiones, etc.); todas las formaciones perforadas pueden liberar gas en el lodo. La mayoría de los sólidos atraen moléculas de líquidos provenientes de la fase continua. La bentonita se hidrata en los lodos de agua dulce hasta alcanzar un volumen de aproximadamente 10 veces del que tenía en su estado seco, esta agua denominada “rígida” forma parte de la fase discontinua; lo que influye en la eficacia de la bentonita como emulsionante (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.1.3 Fase sólida de los lodos.

Los sólidos juegan un papel muy importante en la condición, mantenimiento y densidad de los lodos, ya que, se les asigna una fase aparte, aun cuando todas las partículas sólidas que hay en un lodo pertenecen a su fase discontinua. La inestabilidad de los lodos de perforación aumenta a medida que el porcentaje de sólidos (en volumen) se eleva. Los diversos tratamientos químicos pueden incrementar la capacidad de un lodo para tolerar sólidos, pero sólo hasta cierto

punto. Los sólidos que se hidratan o que tienen numerosas cargas eléctricas de superficie expuestas, se denominan sólidos activos en los lodos base agua. Otros sólidos, como por ejemplo la barita, son prácticamente inertes. La mayoría de los sólidos (con la excepción de algunos aditivos especializados de lodos base aceite), son inertes. Cuando el nivel total de sólidos no es excesivo puede, contener un exceso de sólidos activos.

El tamaño de las partículas sólidas en los lodos, es de gran importancia, ya que por ejemplo, las partículas menores de 2 micrones de diámetro se clasifican como coloides (un micrón es un millonésimo de metro; hay aproximadamente 25,400 micrones en una pulgada). Su tamaño hace que sean muy sensibles a las cargas eléctricas de superficie, y por lo tanto, las partículas coloidales tienden a parecer como los sólidos más activos. Las partículas cuyo tamaño es superior a 74 micrones son clasificadas como arenas API. La abrasividad de esas partículas da como resultado el desgaste de las bombas, de las barrenas y de las herramientas en general. El término limo se emplea habitualmente para describir a las partículas que miden más de 2 micrones pero menos de 74. La velocidad de penetración decrece a medida que aumenta el número de partículas sólidas en los lodos de perforación. Por consiguiente, un sólido es deseable solamente en el caso de que su contribución sea positiva a las propiedades del lodo, en este caso se justifica su presencia cuando el sólido es eficiente durante la perforación. La barita y la bentonita, si se usan en forma apropiada, satisfacen ese criterio, ya que otros sólidos que se aportan durante la perforación generalmente no lo satisfacen. Por consiguiente, los sólidos de perforación que se obtienen como recortes son indeseables y deben ser eliminados del lodo, cuando éste retorna a la superficie y se coloca en los separadores diseñados para realizar este proceso de forma eficiente (*Benítez Hernández, Garaicochea Petirena y Reyes Álvarez, 1979*).

4.2 Consideraciones químicas básicas.

La concentración de los sólidos en los lodos de perforación, puede controlarse principalmente por medio del empleo apropiado del equipo para la remoción mecánica de sólidos, o mediante la dilución con agua, sin embargo, la fase acuosa es más compleja y se necesitan controles mucho más complicados para retener los balances iónicos deseables. El control del balance iónico de la fase acuosa se complica sobre todo por el hecho de que los ensayos químicos realizados en dicha fase son solamente de naturaleza semi-cuantitativa. Por consiguiente, siempre queda una duda sobre cuán exactos o precisos son los resultados. La mayoría de los ensayos químicos proveen de información suficiente para la interpretación del comportamiento químico de los lodos, sin embargo, en algunos casos ocurre un desequilibrio sin que los ensayos químicos reflejen información adecuada sobre la existencia de posibles causas del problema.

Este fenómeno se observa comúnmente en los análisis para carbonatos y bicarbonatos, donde la causa de la dificultad en los ensayos se debe al tipo de ambiente alcalino en que se encuentran las sustancias. Si la alcalinidad presente en un lodo fuera atribuible sólo a los iones oxhidrilos, sería más fácil relacionar las

pruebas químicas con el control de la viscosidad deseable, más la pérdida de filtrado, la inhibición, la corrosión y la solubilidad de los dispersantes orgánicos, sin embargo, esta situación origina que la composición química de los lodos de perforación resulte mucho más compleja, debido a la interacción y reacción de varios iones con los sólidos.

Se considera que la composición química en la fase acuosa por sí sola no es capaz de dar una predicción correcta del comportamiento iónico de los sistemas en los lodos de perforación, por lo que, para proporcionarnos una mejor comprensión química del agua, es necesario considerar la estructura atómica antes de realizar otra cosa. Es importante señalar que el átomo puede ser definido como la partícula de menor tamaño de un elemento que puede entrar en una combinación química, además de que los átomos están compuestos de dos unidades principales: el núcleo que comprende el centro del átomo y las órbitas de los electrones en las cuales giran estos últimos. El número atómico comprende dos partes: los protones, que se encuentran conformados por partículas con carga eléctrica positiva y los neutrones que son partículas con carga igual a cero.

En la **figura 4.1**, se observa cómo en la estructura del átomo, el núcleo proporciona casi toda la masa del elemento, mejor conocido como su masa atómica. La masa atómica se redondea al entero más cercano y representa el número de neutrones y de protones contenidos en el núcleo. Para ilustrar estos conceptos se examina un átomo muy común.

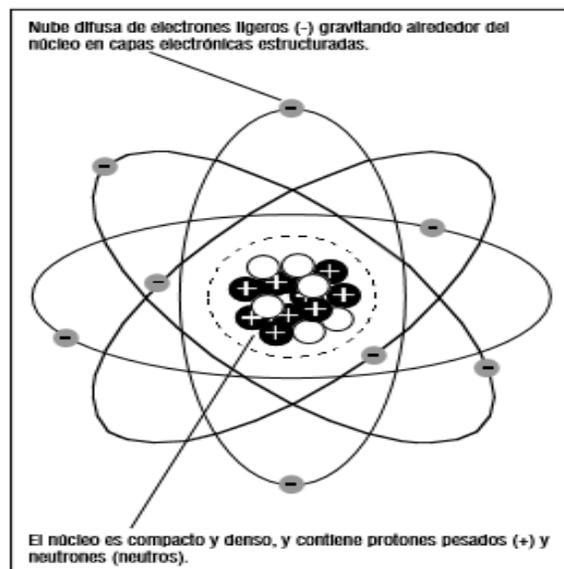


Figura 4.1 Estructura del átomo (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

Carbono: masa atómica= 12

Número atómico= 6

Número de neutrones= $12 - 6 = 6$

Los electrones son partículas atómicas con cargas eléctricas negativas. El número de electrones en las órbitas o capas es igual al número de protones y al número atómico. Por consiguiente, la carga total de un átomo es igual a cero. Los electrones se encuentran distribuidos en diferentes órbitas. La tabla periódica nos permite determinar dos factores importantes con respecto a los diversos átomos: la valencia y la serie de reactividad. La valencia se encuentra determinada por el número de electrones que hay en la capa de la tabla. En general, si la última capa contiene menos de 4 electrones, por lo que funciona como prestadora de electrones y se localiza en la parte izquierda de la tabla periódica; por ende, si la capa externa contiene más de cuatro electrones, recibe electrones en préstamo y su valencia es negativa. Estos átomos se encuentran localizados en la parte media de la tabla periódica.

Una reacción química es un cambio en el que los átomos y las moléculas presentan propiedades químicas que son diferentes de las que poseían antes que ocurriera la reacción. Cuanto menor sea el número de electrones que un átomo debe prestar o recibir, mayor es su actividad química. Por esa razón, el hidrógeno, el flúor y el cloro se incluyen entre los más reactivos. Esta denominada serie de reactividad permite determinar cuáles átomos reaccionarán de una mejor manera (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.2.1 Características químicas de los componentes de los lodos de perforación.

4.2.2 Arcillas.

Las arcillas son sedimentos finos que se encuentran dispersos, se componen por una gran variedad de partículas de minerales laminares formados principalmente por silicatos aluminicos hidratados y que en general presentan impurezas de otros minerales acompañantes, cuyo tamaño de partícula es menor a 0.00390 mm. La arcilla que más se utiliza en los lodos de perforación es la montmorillonita que comúnmente se llama bentonita, ya que es la roca de la que procede y que se compone esencialmente de ese mineral (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

Los principales tipos de arcillas que se utilizan en los lodos de perforación y que se utilizan en la industria petrolera son:

Arcillas en forma de aguja no hinchables: la atapulguita y la sepiolita.

Arcillas laminares no hinchables: Illita, clorita y la caolinita.

Arcillas laminares muy hinchables: Montmorillonita sódica (bentonita).

El grupo de minerales clasificados como arcillas juegan un papel fundamental en muchas áreas en cuanto a la tecnología de los lodos de perforación. Químicamente hablando, el grupo de las arcillas pueden clasificarse como silicatos de aluminio. Desde el punto de vista físico, las arcillas se describen como una mezcla heterogénea de minerales que se encuentran finamente divididos (2 micrones o menos) de minerales tales como: cuarzo, feldespato, calcita, pirita y otros materiales

sedimentarios compuestos principalmente de sílice, aluminio y agua. Como los elementos que constituyen a las arcillas forman el 80% de la masa de la Tierra (8.1% de aluminio, 27.7% de sílice y 46.6% de oxígeno), es muy notorio que en la mayoría de las formaciones que se perforan, se tengan minerales de arcillas. El tipo y la cantidad de los minerales que se encuentran presentes son factores muy importantes en las propiedades mecánicas y químicas de la roca.

La selección de los fluidos de perforación debe tomar en cuenta posibles reacciones de los lodos con la formación, tomando en consideración que estas reacciones tienen un fuerte impacto en la estabilidad del agujero. Por lo tanto, un buen entendimiento de la química de las arcillas es de suma importancia en el proceso de la selección de un lodo de perforación y por consiguiente son de gran utilidad para lograr la estabilidad del agujero. La mayoría de los yacimientos que se encuentran en areniscas contienen una determinada cantidad de minerales de arcillas; estos pueden reaccionar con los lodos que los van a contactar de una manera tal que los puedan bloquear en forma parcial o a veces total, reduciendo de esa manera la productividad de la formación. Los sólidos arcillosos son agregados a los lodos de perforación con el propósito de incrementar y controlar su viscosidad. Existen arcillas comerciales tales como la bentonita y la atapulgita, que se han utilizado por muchos años para obtener las propiedades de flujo deseadas.

En algunas ocasiones, la combinación de las arcillas comerciales y los procedentes de la formación conducen a tener viscosidades muy altas; en estos casos se debe de tratar al sistema con una cantidad de productos químicos denominados dispersantes y adelgazantes. Es de suma importancia entender la química de estos aditivos para poder tomar las medidas más acertadas y lograr las propiedades que se requieren de los lodos de perforación (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

4.2.3 Origen de las arcillas.

Los minerales de las arcillas son cristalinos en su naturaleza, por lo que la estructura atómica de estos cristales es un factor primordial en la determinación de sus propiedades. La identificación y la clasificación se realiza mediante análisis con rayos x, espectro de adsorción y el denominado análisis térmico diferencial. La mayoría de las arcillas presentan una estructura semejante a las micas, es decir, se hallan formadas por láminas de cristales dispuestos cara a cara como un mazo de barajas, donde una placa individual se encuentra compuesta por átomos dispuestos tetraedral u octaedral. Estos paquetes pueden presentar diferentes configuraciones. En el arreglo octaedral, el oxígeno o los hidroxilos forman 2 hileras compactas coordinadas con un centro que puede ser hierro, aluminio o magnesio. Si bien el tamaño coloidal de sus partículas hace que todas las arcillas sean activas en lodos base agua, el grado de actividad varía de una a otra, por lo que también varía el efecto viscosificante de diferentes arcillas (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

El rendimiento API de las arcillas se define como el número de barriles de lodo de 15 centipoises que se pueden producir por la adición de una tonelada de arcilla seca con agua dulce, aunque también se pueden evaluar en agua saturada de sal como ocurre con las atapulgitas.

En la **tabla 4.1**, se describen algunas propiedades y la composición química de las arcillas más utilizadas en los lodos de perforación.

ARCILLA	FÓRMULA QUÍMICA	PROPIEDADES
Caolín	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	<p>Color: blanco, raya blanca</p> <p>Sistema cristalino: triclinico</p> <p>Dureza: 1, densidad: 2.6 g/cm^3</p>
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}\{(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}\}$	<p>Color: blanco, raya blanca</p> <p>Sistema cristalino: monoclinico</p> <p>Dureza: 1-2 densidad: 2.8 g/cm^3</p>
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}, (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	<p>$n\text{H}_2\text{O}$ Color blanco</p> <p>Raya blanca, Sistema cristalino: triclinico</p> <p>Dureza: 1-2, densidad: 1.7-2 g/cm^3</p>

Sepiolita	$Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	Color: blanco, raya blanca. Sistema cristalino: ortorrómbica Dureza: 2, densidad: 2 g/cm ³
Atapulgita	$(Mg,Al)_2Si_4O_{10}(OH) \cdot 4(H_2O)$	Color: blanco, gris-verde Sistema cristalino: monoclinico prismático Dureza: 2-2.5 densidad.
Clorita	$(Mg,Fe)_3 (Si,Al)_4 O_{10} (OH)_2 \cdot (Mg,Fe)_3 (OH)_6$	Color: gris-blanco Sistema cristalino: ortorrómbico Dureza: 2-2.5 densidad: 2.6 g/cm ³

Tabla 4.1 Tipos de arcillas, fórmulas químicas y sus propiedades (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

La montmorillonita y la atapulgita son las arcillas más activas y por consiguiente las más utilizadas en la elaboración de los lodos de perforación.

La bentonita.

Es un excelente agente reductor de la pérdida del filtrado, ya que las partículas hidratadas de la bentonita se deforman muy fácilmente. Las láminas de las partículas hidratadas se superponen entre sí contra la pared del pozo durante la filtración. El revoque que se produce es resistente, delgado, compresible y muy eficaz para reducir la invasión de filtrado hacia las formaciones. La bentonita es siempre útil en reducir la pérdida de filtrado, aun cuando no se hidrate, eso se debe al tamaño coloidal de sus partículas y a su forma de plaquetas planas, cuando se floclula un lodo de agua dulce, la bentonita no contribuye mucho al control de la pérdida del filtrado. La adición de cationes en los lodos de agua dulce que contengan arcillas con montmorillonita, tienden a producir una floclulación inmediata, en la cual las partículas de arcilla cargadas negativamente, se floclulan por contacto con los cationes introducidos. Las partículas de la arcilla forman flóculos irregulares al agruparse; el carácter irregular de los flóculos no facilita la depositación de un buen revoque. Con la floclulación, se produce un aumento en la viscosidad del lodo, después de cierto tiempo, cuando se tienen cationes presentes en cantidades suficientemente grandes, los mismos se introducen entre las láminas de las partículas individuales de arcilla; así se produce la deshidratación de las arcillas y la viscosidad del lodo disminuye considerablemente.

En algunos casos, un fenómeno diferente puede ocurrir originando al final, resultados similares cuando se cambia la viscosidad inicial; aunque los resultados pueden ser similares, se debe de tomar en cuenta que el resultado se debe a diferentes iones y a localizaciones diferentes de las cargas; estas mismas arcillas que poseen una superficie con carga negativa presentan láminas extensas y continuas tal como se encuentran en los depósitos de la naturaleza. Sin embargo, en un lodo, esas láminas se rompen por corte mecánico, como sucede por ejemplo, en la trituración. Esta ruptura de las láminas de sílice-aluminio-sílice deja expuestas las valencias de ligadura en los bordes de las plaquetas. Además el borde de las partículas de la ligadura catiónica tendrá la influencia de la carga positiva de los cationes. De esta manera, los bordes de las partículas de arcilla presentan a menudo una capa positiva de cargas.

Los aniones tales como: CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} etc., pueden encontrar sitios para tratar de equilibrar sus cargas. El resultado es una atracción entre las partículas de la arcilla y los aniones en sus bordes, por consiguiente, se obtiene un aumento de la viscosidad, ya que se produce una asociación con agua por parte de las partículas agregadas de arcilla. Esta condición puede observarse la mayoría de las veces en las perforaciones, ya que es necesario ejecutar un estudio basado en minuciosas pruebas con el fin de efectuar un diagnóstico correcto, ya que su comportamiento es muy similar a los de la floclulación catiónica, sin embargo, a pesar de la similitud y de las dificultades para diferenciar ambas condiciones, el tratamiento apropiado es completamente diferente (García Hernández, 2014).

Caolín.

El caolín **figura 4.2**, es un mineral de arcilla, y tiene por composición química $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, se trata de un mineral tipo silicato estratificado, presenta una lámina de tetraedros que se une a través de átomos de oxígeno en una lámina de octaedros. El caolín también es definido como una designación petrográfica de varias mezclas de la caolinita, Dickita, Nacrita y silicatos de alúmina que la mayoría de las veces son gelatinosos puros e hidratados. Este mineral presenta un aspecto terroso, un tacto árido y casi siempre es susceptible de la plasticidad cuando se le añade agua. Forma parte de la familia de las arcillas ya que está asociado a los mismos procesos de formación. (George R. Gray y Hch Darley, 1980).

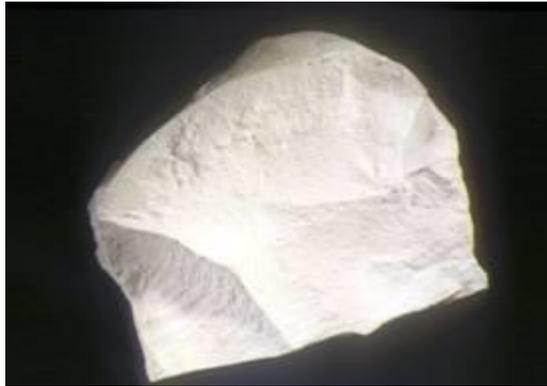


Figura 4.2 Caolín (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2016).

Illita.

Es un mineral **figura 4.3**, de la clase 9 de los silicatos, según en la clasificación de Strunz, pertenece al grupo de las micas. Las características principales que definen a la illita es que no es una arcilla expansiva. Estructuralmente es bastante similar a la moscovita con algo de magnesio, silicio y hierro; posee ligeramente aluminio pero en menor cantidad y potasio interlamina. La fórmula química que define a la illita es $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}\{(\text{OH}_2),\text{H}_2\text{O}\}$; además presenta una considerable sustitución iónica. Se produce como agregados de pequeños cristales monoclinicos grises a blancos, debido a su pequeño tamaño, la identificación certera usualmente requiere de varios análisis de difracción de rayos X. La illita es un producto de la alteración de la moscovita y el feldespato en ambiente de meteorización hídrica y térmica. Es común en sedimentos de rocas arcillosas sedimentarias, y en rocas metamórficas. Se puede diferenciar de la glauconita por los diversos análisis de rayos X que se llevan a cabo (Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).



Figura 4.3 Illita (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2016).

Montmorillonita.

La montmorillonita cuya composición química es: $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Es una arcilla hidrofílica, siendo la cálcica o bentonita el viscosificador más importante para los lodos base agua dulce y es probablemente el agente más importante entre los que se emplean para el control de la pérdida del filtrado. La American Petroleum Institute (API) establece ciertos estándares que se deben de cumplir con la bentonita comercial para que pueda ser empleada en los lodos de perforación, donde se especifica que deben tener un rendimiento no inferior a 90 bbl/ton de agua dulce, con una pérdida de filtrado API no mayor a $13.5 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$ y un punto de cedencia no mayor a 3 veces la viscosidad plástica. Por consiguiente el material seco no debe contener más del 10% de humedad y no más del 4% de la bentonita. El propósito de estos estándares es asegurar la pureza, la finura de grano y un manejo adecuado del producto (F.H.Hatch, 1912).

En la **figura 4.4**, se puede observar la estructura de la montmorillonita así como el intercambio de cationes que se encuentran presentes en su estructura.

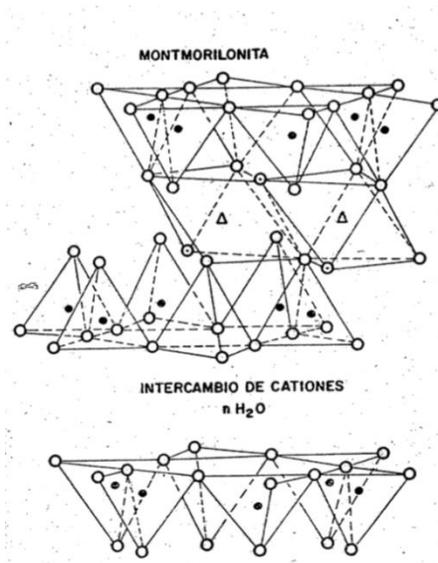


Figura 4.4 Estructura de la montmorillonita (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

La montmorillonita cálcica.

Cuando en la arcilla hay abundancia de calcio es llamada sub-bentonita, la que se caracteriza porque se hincha dos o cuatro veces su volumen original al ponerla en agua dulce. La sub-bentonita se utiliza a veces para mejorar la distribución del tamaño de las partículas en los lodos con el objetivo de reducir la pérdida del filtrado. La bentonita rinde 90 a 100 barriles/m en agua dulce; mientras que la sub-bentonita rinde solamente 40 a 50 bbl/ton. La montmorillonita se encuentra conformada por láminas planas y delgadas, cada una de las láminas tiene tres capas: una laminilla de aluminio con dos láminas de sílice constituyendo una estructura tipo sándwich. Por efecto de los agentes atmosféricos y del tiempo, el silicio en las láminas externas se reemplaza por aluminio trivalente, y el aluminio de la lámina interna es reemplazado por un metal divalente como el magnesio.

Esta sustitución da como resultado que la lámina o plaqueta original tenga un fuerte desbalance negativo, que es parcialmente compensado por los cationes como el sodio Na^+ y el calcio Ca^{2+} que mantienen a las láminas unidas entre sí. Estos cationes determinan el tipo de la montmorillonita, sin embargo, pueden ser reemplazados por otros cationes. Cuando los iones sodio que se encuentran presentes en la bentonita son reemplazados por los iones calcio, el producto se convierte en sub-bentonita, con la consecuente reducción en su habilidad para retener agua.

En la **figura 4.5**, se observa cómo las partículas de la montmorillonita poseen cargas positivas y negativas en el borde de las plaquetas, por lo que son el producto de la

ruptura de láminas más grandes. Algunos dispersantes actúan como neutralización de uno u otro de esos dos tipos de cargas. Las partículas se repelen entonces entre sí, evitando la formación de enlaces de la estructura dentro del lodo.

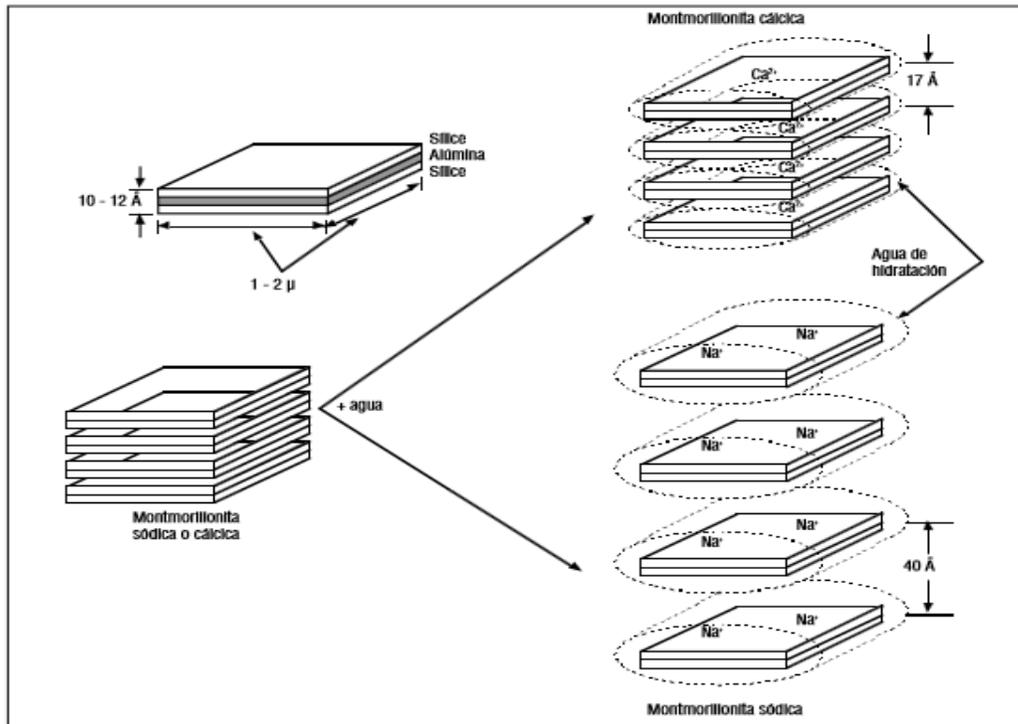


Figura 4.5 Hinchamiento de la montmorillonita sódica y cálcica (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013)

Cuando se coloca la montmorillonita seca en agua dulce, algunas de las moléculas de agua se fijan entre las láminas de la arcilla, produciendo la hidratación. El número de moléculas de agua se fijan en función de qué tan próximas estén las láminas por efecto de los cationes de ligadura y de la energía de la hidratación de los propios cationes. La bentonita se hidrata fuertemente porque los iones sodio unen las láminas de arcilla en forma muy débil, permitiendo que se fije una gran cantidad de agua entre las láminas. La montmorillonita cálcica no se hidrata tanto porque los iones calcio unen las láminas entre sí con mucho menor espacio intermedio. Si se añade montmorillonita seca al agua salada, los cationes presentes en el agua presentan un desequilibrio negativo natural de esas arcillas y la hidratación es mínima (*F.H.Hatch, 1912*).

Sepiolita.

La sepiolita **figura 4.6**, es un mineral del grupo 8 de los filosilicatos, su fórmula química es: $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$. Cristaliza en el sistema ortorrómbico y posee una dureza de 2 en la escala de Mohs; además presenta características tales como fractura concoidea, exfoliación ausente, un brillo opaco y presenta también una raya blanca. La composición química en la red cristalina, es la responsable de la enorme porosidad de la sepiolita, en realidad, es como una esponja rígida cuyo interior está atravesado por una enorme cantidad de tubos y galerías que hacen disminuir al

mínimo la densidad del mineral y permiten que, sorprendentemente, flote en el agua. La formación de este mineral se produce en dos situaciones diferentes, aunque ambas están relacionadas con la infiltración del agua entre los sedimentos del suelo. La primera de ellas tiene lugar en la superficie. El agua rica en magnesio se filtra en el suelo y va depositando su carga mineral; al desecarse debido a cambios en la climatología de la región forma lo que se conoce como paleosuelos o suelos antiguos formados en buena medida por sepiolita. La segunda situación es algo distinta, ya que el material rico en magnesio no es el agua que se infiltra sino la arcilla que forma el estrato geológico. Este proceso de formación se produce a mayor profundidad que el anterior, pero también depende de las condiciones de aridez reinantes en la zona (*García Hernández, 2014*).



Figura 4.6 Sepiolita (Tomada de www.google.com.mx/url, 2016).

Atapulgita.

La atapulgita, **figura 4.7**, es una arcilla con estructura catenaria, formada por un alumino-silicato de magnesio hidratado, cuya aplicación principal en los lodos de perforación es la de funcionar como un viscosificante para los lodos que contienen demasiada sal, ayudando a que la bentonita se pueda hidratar de una forma apropiada. Es un excelente viscosificante pero, a diferencia de la bentonita, no contribuye al control del filtrado. Una buena atapulgita rinde aproximadamente 150 bbl/ton. Físicamente la atapulgita tiene una estructura similar a bastoncillos, en lugar de tener una estructura plana, en forma de plaquetas. Bajo una presión de corte, los bastoncillos tienden a partirse longitudinalmente. La atapulgita no capta agua intersticial como lo hace la bentonita, por ende, no se hidrata de la misma manera y los poli-electrolitos que son los dispersantes no tienen el mismo efecto que en los sistemas con bentonita (*F.H.Hatch, 1912*).

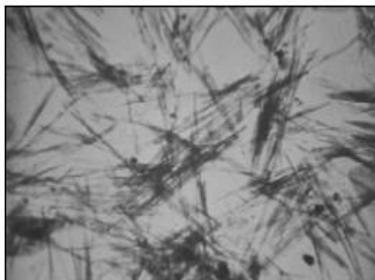


Figura 4.7 La atapulgita (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

Las especificaciones de la API indican que la atapulgita rinde por lo menos 100 bbl/ton en agua saturada de sal, donde la humedad no debe exceder el 16% y no debe quedar retenida más de 8% en un análisis de granulometría húmeda realizada con malla 200. La sepiolita es una arcilla de la misma familia de la atapulgita dentro de las arcillas, se ha empleado en la perforación de algunos pozos ya que se comporta más o menos igual que la atapulgita, pero tiene ventajas especiales a temperaturas muy altas (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

Clorita.

En la **figura 4.8**, se puede observar al mineral denominado clorita, que pertenece al grupo de los silicatos hidratados de magnesio, hierro y aluminio, de aspecto micáceo. Se forma en las rocas ígneas por la alteración de los minerales ferromagnesianos primarios, como los anfíboles, micas (biotita, flogopita) etc. En dicha transformación las micas tienden a perder todo el potasio; todas sus características distintivas son de bajo relieve, color verde pálido o incoloro, se encuentra en la naturaleza en tonos grises y azules. Su fórmula química es: $(Mg,Fe)_3 (Si,Al)_4 O_{10} (OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3 (OH)_6$. (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).



Figura 4.8 Clorita (Tomada de www.google.com.mx/url, 2016).

4.3 Agentes densificantes.

Los llamados materiales densificantes, son materiales sólidos de alta densidad que cuando se encuentran finamente divididos son utilizados para aumentar la densidad de los lodos de perforación. El agente densificante más importante en los lodos de perforación es la barita, y en segundo lugar se emplean sales solubles. La saturación con cloruro de sodio (sal común) aumenta la densidad del agua a 10

lbm/gal (también conocido como ppg), no obstante si la saturación se lleva a cabo con cloruro de calcio la densidad lograda será de 11.8 ppg. Más adelante se pueden alcanzar densidades de 16. ppg con cloruro de zinc o con bromuro de calcio, pero estos materiales químicos son muy caros para utilizarse en los lodos de perforación. La ventaja de las sales solubles como agentes densificantes es que con el aumento de la densidad se logra un alto contenido de sólidos en los lodos de perforación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el efecto de las adiciones de sales sobre otras propiedades químicas afecta los resultados. En algunas ocasiones la densidad deseada se consigue al utilizar una combinación de sales y otros agentes densificantes.

4.3.1 Barita.

La barita es un mineral no metálico cuya fórmula química es $BaSO_4$, se le conoce también como baritina o espato pesado; es un material inerte, no tóxico y que tiene un alto peso específico, llegando hasta 4.5 gr/cm^3 , siendo esta última característica de donde proviene su nombre que es de origen griego que significa baros, pesado. Una de las especificaciones API para que se use barita en los lodos de perforación es que su peso específico debe ser inferior a 4.20. Los metales alcalino-térreos solubles no deben exceder de 250 ppm en la dureza total; al menos el 5% se debe quedar retenida en la malla 325 y no más del 3%, en la malla 200 en el ensayo de granulometría húmeda (*Klein Corneli y Hurlbut Cornelius, 1997*).

En la **tabla 4.2**, se observa la composición química de la barita así como el porcentaje de cada elemento.

COMPONENTES	PORCENTAJE
CaO	0.26%
SiO ₂	5.03%
Al ₂ O ₃	1.26%
Fe ₂ O ₃	0.63
SO ₃	31.26
MgO	0.07
K ₂ O	0.29
Na ₂ O	0.17
Mn ₂ O ₃	0.05
BaO	59.89
BaSO ₄	91.15

Tabla 4.2 Composición química de la barita (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

La principal aplicación de la barita es en la industria de la perforación de pozos petroleros por su alta densidad, además de que al ser mezclada no produce chispas, esto permite, que durante la perforación no existan riesgos de explosión por las fricciones, sobre todo cuando se tienen “bolsas de gas”. Los compuestos del bario también tienen otras aplicaciones de utilidad en la industria de la perforación, ya que se utilizan lubricantes para las barrenas. La barita como mineral se tritura y se muele para su uso en los lodos de perforación, donde el tamaño de sus partículas es de suma importancia, considerando que las partículas grandes requieren un lodo mucho más espeso para que pueda quedar en suspensión, además de que favorece su movimiento. Las partículas de grano muy fino, no son tan importantes, porque originan la formación de una gran superficie total de sólidos, lo que se manifiesta en la fase líquida, ya que puede existir una alta viscosidad y una resistencia de gel excesivamente alta (*Klein Corneli y Hurlbut Cornelius, 1997*).

4.3.2 Carbonato de calcio.

Durante la perforación de pozos, es común encontrar secuencias de carbonatos que aportan partículas sólidas que se incorporan a los lodos de perforación, reducen notablemente la permeabilidad de las zonas productoras; esto con el paso del tiempo afecta de forma notable la producción de los pozos. El carbonato de calcio (CaCO₃), es un compuesto químico muy abundante en la naturaleza, formando calizas como uno de los componentes principales de las secuencias sedimentarias de todo el mundo y es el principal componente de conchas, moluscos, corales y

demás organismos. Es el componente primordial de minerales como la calcita, la aragonita y de rocas como la caliza y sus variedades.

En los lodos de perforación se presenta como un componente inactivo, pero que se disuelve en los ácidos; sin embargo las partículas del carbonato de calcio se pueden alojar, en los poros de las zonas productoras y son removidas muy fácilmente con ácido para obtener una óptima producción. La aplicación principal del carbonato de calcio en los lodos de perforación es que se utiliza como un agente densificante de eficacia muy baja, ya que presenta una baja densidad. Presenta una densidad de 2.7 g/cm^3 . Cabe destacar que el carbonato de hierro o siderita (FeCO_3) presenta una densidad de 3.8 g/cm^3 y es más pesado que el carbonato de calcio, tiende a presentar propiedades que son muy similares, sin embargo, su costo es muy elevado en comparación con el carbonato de calcio (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

4.3.3 Galena

La galena es un mineral que pertenece al grupo de los sulfuros, formando cristales cúbicos, octaédricos y cubo-octaédricos; su dureza de acuerdo a la escala de Mohs, es de 2.5 a 3. La disposición de los iones en el cristal es la misma que la que se presenta en el cloruro de sodio (NaCl). Su fórmula química es (PbS), químicamente se trata de sulfuro de plomo, aunque puede presentar cantidades variables de impurezas. Este mineral es de suma importancia cuando se necesitan densidades superiores a las que se pueden obtener con la barita. La galena es un sulfuro de plomo nativo, tiene un peso específico de 6.5 a 6.7. Su empleo reduce el volumen total de sólidos requeridos en los lodos de perforación densos y permite la obtención de lodos con densidades de hasta 35 ppg. Por otro lado, la magnetita es un óxido de hierro con un peso específico de 5,1, es otro sólido con una alta densidad que se utiliza cuando se requiere utilizar lodos de perforación con densidades extremadamente altas (*García Hernández, 2014*).

4.4 Polímeros.

Los polímeros son macromoléculas (generalmente orgánicas que se forman con la unión de pequeñas moléculas denominados monómeros. También se definen como materiales que se constituyen de moléculas formadas por unidades constitucionales que se repiten de una manera ordenada. De acuerdo con esta definición, el término polímero abarca una amplia gama de compuestos o sustancias químicas; algunas de las cuales se presentan en la naturaleza y otras más se producen de forma sintética. En lo que se refiere a los lodos de perforación, los polímeros son compuestos orgánicos que en cantidades muy pequeñas, propician aumentos muy significativos en su viscosidad o que proporcionan un excelente control para la pérdida del filtrado en las zonas productoras. En muchos otros aspectos se han utilizado para encapsular a los lodos de perforación, inhibiendo la hidratación de los sólidos presentes o para flocular a los sólidos de menor tamaño o que presentan partículas muy pequeñas en la línea de descarga; algunos de esos productos son

solubles. Los polímeros se consideran una parte importante de la fase sólida de los lodos de perforación, Los más utilizados son:

4.4.1 Polímero XC.

Este polímero tiene características muy particulares en su manufactura, ya que su composición se debe principalmente a una fragmentación bacteriana, que origina un incremento en su viscosidad en el agua; presenta salinidades muy variables; sólidos coloidales que se describen a continuación, cuando se utilizan polímeros xc, se deben de utilizar métodos que puedan evitar la degradación bacteriana; la temperatura máxima que resisten es muy cercana a los 250° F.

4.4.2 Celulosa drispac.

La celulosa drispac tiene como función principal, reducir la pérdida de agua de los distintos lodos de perforación de agua salada o de agua dulce; también proporciona una gran viscosidad a estos sistemas. Se sabe que se degrada cuando se alcanzan temperaturas mayores a los 300° F (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

4.4.3 Carboximethyl celulosa.

El polímero denominado carboximethyl también es un reductor de la pérdida de agua, ya que proporciona una gran viscosidad a los lodos de perforación, sobre todo a los lodos de agua dulce y a los de agua salada que se encuentren cercanos o muy por encima de las 50,000 ppm de cloro. La carboximethyl celulosa tiende a degradarse a una temperatura de 250° F (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

4.5 Aditivos sólidos misceláneos.

Los aditivos son productos químicos que se agregan a las mezclas, los cuales son utilizados tanto en estado sólido o líquido, aunque los líquidos se dispersan más rápidamente que los sólidos.

4.5.1 Asbesto.

También denominando amianto, su fórmula química es $Mg_6(OH)_8/Si_4O_{10}$, es el nombre de un grupo de minerales metamórficos que generalmente son fibrosos; estos silicatos se encuentran conformados por cadenas dobles. Los minerales de asbesto tienen fibras largas y resistentes que se pueden separar; ya que son muy resistentes para ser entrelazadas y también son muy resistentes a altas temperaturas. Las fibras de amianto de asbesto se adicionan en algunos casos a los lodos de perforación para aumentar la capacidad de arrastre de los recortes que se generan en el fondo del pozo, permitiendo un transporte más eficiente hasta la superficie. Son muy eficaces en combinación con algunas arcillas u otros viscosificantes, o cuando son empleados separadamente, ya que cuando son expuestos a fuerzas de corte, las fibras tienden a quedar suspendidas en los lodos de perforación y presentan la forma de un cepillo irregular, muy similar a la de la atapulgita. En el caso de las fibras de amianto, el haz de fibras presenta un entrelazamiento físico de las fibras, mientras que en el caso de la atapulgita se debe

a la atracción eléctrica entre las agujas. En un lapso corto de tiempo, las fibras de amianto se descargan y se hacen menos efectivas. Se debe de contar con las medidas de seguridad necesarias en el manejo del amianto para evitar la inhalación de sus fibras (*McCray Arthur V y Cole Frank, 2011*).

4.6 Materiales que se utilizan cuando hay pérdida de circulación.

El término pérdida de circulación corresponde con las sustancias que se adicionan a los lodos de perforación cuando estos se pierden en las formaciones del fondo del pozo. Los materiales que comúnmente se utilizan para disminuir la pérdida de circulación son los materiales fibrosos, tales como la corteza de cedro, tallos de caña triturados, fibra mineral y cabello. Estos materiales son principalmente sólidos que se encuentran inertes, que tienden a presentar tamaños de partícula muy grandes, que sirven como una especie de sello en las formaciones, cuyos tamaños se encuentran por encima de los 70 micrones. Cuando el lodo no retorna a la superficie después de haber sido bombeado a un pozo; la pérdida de circulación se produce cuando la barrena encuentra fracturas, vórgulos y cavernas, por donde el lodo fluye dentro de los espacios disponibles. La pérdida de circulación también puede ser causada por la aplicación de más presión del lodo de perforación sobre la formación ya que pueden originar fracturas por donde circula el lodo (*Benítez Hernández, Garaicochea Petirena y Reyes Álvarez, 1979*).

4.7 Interacción química.

La introducción de las sustancias químicas que son agregadas a los lodos de perforación pueden afectar considerablemente las propiedades de los mismos; algunas de estas sustancias químicas se adicionan en la superficie, y otras penetran en los lodos a partir de las formaciones que se han perforado. Las interacciones químicas más importantes se muestran en seguida, presentándose principalmente en los lodos de perforación base agua. Los iones Na^+ (sodio), Ca^{2+} (calcio), OH^- (oxidrilo), CO_3^{2-} (carbonato) y HCO_3^- (bicarbonato) son muy importantes en la química de los lodos de perforación base agua. Para aminorar los efectos nocivos que tienden a presentar este tipo de iones, se emplean dispersantes químicos, la mayoría de estos dispersantes tienen un bajo pH y una baja Pf. Además, cuando se emplean dispersantes se añade sosa cáustica, con el objetivo de mantener el pH.

4.8 Fosfatos

4.8.1 Pirofosfato de sodio ácido (SAPP).

Estos reactivos son los que se utilizan como reductores de la viscosidad, tienen características muy particulares, ya que su masa molar es de 221.97 g/mol y presentan una densidad de 1.87 gr/cm³, todo esto en soluciones que se encuentren previamente diluidas. Los fosfatos tienden a presentar un potencial de hidrógeno (pH) de 4.8. El pirofosfato de sodio ácido es un polvo blanco que tiende a presentar algunas impurezas que son insolubles, también es altamente corrosivo al fierro. El

SAPP, tiende a perder su efecto por causa de la contaminación de la sal, también ocurre degradación del pirofosfato de sodio cuando se tienen temperaturas cercanas a los 150° F (*García Hernández, 2014*).

4.8.2 Fosfato tetra - sódico (TSPP).

El fosfato tetra - sódico (TSPP), tienen por fórmula química: ($\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$), presenta una masa molar es de 266.03 g/mol por otra parte, posee una densidad de 2.5 gr/cm³. La apariencia principal de este producto es que presenta un color blanco con pequeños cristales, que al encontrarse en solución diluida, su potencial de hidrógeno (pH), presenta un valor de 10.2. Este producto tiende a degradarse a los 150° F, y se encuentra en solución al 10% (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.8.3 Sal de roca (cloruros).

La sal de roca o halita, es un tipo de sal denominada cloruro sódico o cloruro de sodio (NaCl), la mayoría de las veces puede penetrar en los lodos de perforación por diversas fuentes; se puede ionizar dando Na^+ y Cl^- en la fase continua, a menos que se haya sobrepasado el punto de saturación. El nivel de sal en los lodos se mide por medio del ensayo de los cloruros, siendo el ion sodio el que ejerce un impacto mayor en los lodos de perforación. Se libera un gran número de iones de sodio cuando se perfora en formaciones salinas; todo esto cuando fluye agua salada dentro del pozo o cuando la sal es añadida desde la superficie. La sal constituye un serio contaminante en los lodos de agua dulce, las partículas de arcilla, que se encuentran cargadas negativamente, se agrupan alrededor de los iones del sodio produciendo aumentos marcados en las viscosidades y en las resistencias de gel y en las pérdidas del filtrado.

La densidad disminuye si el nivel de sólidos disminuye, si existe inhibición, hidratación de las arcillas, dispersantes activos en el lodo o si el aumento de sal es gradual. El tratamiento de la contaminación con sal consiste en la adición de agua, sosa cáustica y de dispersantes. Los dispersantes son del tipo de los lignosulfonatos que son muy eficaces para combatir la contaminación con sal. El impacto que se genera por la contaminación con sal termina o puede hacerse menos intensa si los iones de sodio son retirados de los bordes entre las láminas de las partículas de las arcillas; por ende la viscosidad disminuye y se produce una deshidratación en las arcillas. Por otra parte, la sal disminuye el pH de los lodos de perforación, ya que los iones del sodio desplazan a los iones del hidrógeno en la estructura de las arcillas; y el aumento en la concentración de los iones hidrógeno ocasiona una disminución del pH (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.8.4 Anhidrita y Yeso.

La forma mineral de la anhidrita o sulfato de calcio es (CaSO_4) y la del yeso es ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), éste último es la forma hidratada. La presencia de anhidrita o de yeso en los lodos de perforación influirá en el tipo de lodo a seleccionar para

perforarla, cuando el CaSO_4 se disuelve en un lodo base agua se forman iones Ca^{+2} y SO_4^{-2} . Aunque ambos iones son perjudiciales para las propiedades de los lodos base agua; el Ca^{+2} es el más perjudicial. Puede presentarse comúnmente en los filamentos delgados o en secciones masivas en diversos lugares de la Tierra. Cuando se perforan las formaciones de anhidrita y de yeso, la anhidrita se ioniza en iones en Ca^{2+} y SO_4^{-2} ; esto ocurre en la fase continua del lodo. El incremento de los iones calcio se presenta en el estudio de la dureza total del filtrado, la que se presenta en las soluciones, es representada como la suma total que se tiene, es decir, los iones de calcio (Ca^{2+}) y los iones magnesio (Mg^{2+}), incrementan la dureza total de la solución que se tiene, teniendo en consideración que la dureza total corresponde con el contenido de calcio que se encuentra presente en dicha solución (Klein Corneli y Hurlbut Cornelius, 1997).

4.8.5 Cemento.

El cemento es un conglomerado formado en la mayoría de los casos a partir de una mezcla de fragmentos de caliza y arcilla, tiene la propiedad de endurecerse al entrar en contacto con el agua. En la industria petrolera se utilizan principalmente 2 tipos de cemento, el de origen arcilloso y el de origen puzolánico. El cemento se introduce en los pozos petroleros cuando se instala la tubería de revestimiento (TR), muy comúnmente esta tubería se emplea para corregir algunos problemas en el pozo. En la mayoría de los casos, cuando el cemento se perfora, los iones calcio y los iones oxhidrilo penetran en la fase continua de los lodos base agua. Si el cemento a la hora de perforar se encuentra fresco, se liberan más iones que si hubiera fraguado totalmente; este efecto del cemento sobre los lodos es muy parecido al efecto que tiene la anhidrita. La diferencia principal es que al perforar el cemento, su pH se eleva, mientras que al perforar la anhidrita el pH baja. El tratamiento que se tiene con la contaminación con cemento es el mismo que el de la contaminación con anhidrita, ya que para el caso del cemento, no se añade sosa cáustica; dado que los iones oxhidrilo se suministran por el mismo cemento. La tendencia negativa que toma el cemento cuando se liberan los iones del calcio (Ca^{2+}), se suprime si existe una alta concentración de los iones oxidrilo (OH^-), sin embargo, si la concentración de los iones (OH^-) disminuye entonces los iones del calcio (Ca^{2+}) comienzan a penetrar en los lodos de perforación (McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011).

4.8.6 Carbonato de sodio.

El carbonato de sodio es una sal blanca y translúcida cuya fórmula química es: Na_2CO_3 , se puede encontrar en la naturaleza u obtenerse artificialmente gracias al proceso patentado por el químico francés Nicolás Leblanc. El carbonato de sodio es añadido a los lodos de perforación con el propósito de remover los iones del calcio; ya que cuando el carbonato de sodio penetra en los lodos, se ioniza en Na^+ y CO_3^- en la fase continua; los iones carbonato se combinan con los iones del calcio, de esa manera se obtiene el carbonato de calcio (CaCO_3) que se conoce como una precipitación inerte. Un tratamiento excesivo con carbonato de sodio, deja libre un

exceso de iones carbonato, los que pueden ocasionar una alta viscosidad y una alta resistencia de gel. El incremento en la concentración de los iones carbonato en los lodos implica un incremento en la diferencia entre M_f , que representa el punto final de la alcalinidad del anaranjado de metilo en el filtrado del lodo (Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

4.8.7 Bicarbonato de sodio.

Es un compuesto sólido cristalino de color blanco que es soluble en agua, con un ligero sabor alcalino parecido al del carbonato de sodio (aunque menos fuerte y más salado que este último), con fórmula química (NaHCO_3); se puede encontrar muy fácilmente como un mineral en la naturaleza o se puede producir de manera artificial. El bicarbonato de sodio es una alternativa para ocasionar la remoción de los iones del calcio; cuando son añadidos a los lodos de perforación, tienden a formar la fase continua y se ioniza en los iones Na^+ y HCO_3^- , en el caso de que se encuentran presentes los iones oxhidrilo, el hidrógeno y el carbonato se disocian con sus respectivos iones. El H^+ y el OH^- se combinan para formar agua, esta reacción tiende a disminuir el pH y el Pf del lodo. El CO_3^{2-} se combina con el Ca^{2+} en caso de que se encuentre presente para que de esa manera se forme el carbonato de calcio (CaCO_3) como un precipitado inerte (Klein Corneli y Hurlbut Cornelius, 1997).

En la **gráfica 4.9**, se puede observar el equilibrio que existe entre el carbonato y el bicarbonato; sobre todo cuando el aumento de la salinidad desplaza a las curvas hacia la izquierda en donde el porcentaje se incrementa.

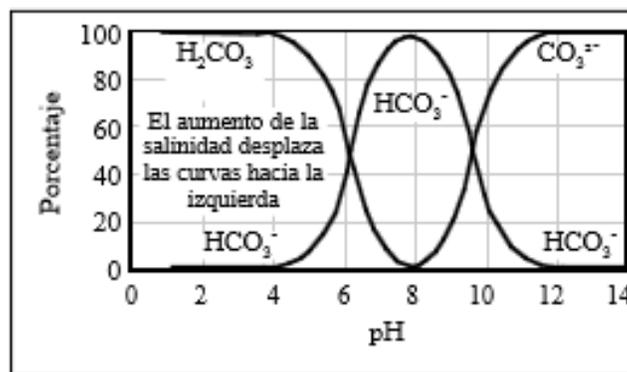


Figura 4.9 Equilibrio carbonato-bicarbonato (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

Si la cantidad de iones oxhidrilo en el lodo es insuficiente, la adición de bicarbonato de sodio no remueve los iones calcio, en cambio, el hidrógeno y el carbonato permanecen unidos como iones bicarbonato; los iones bicarbonato en la fase continua pueden ser considerablemente nocivos para la estabilidad del lodo. En los casos en que haya un adecuado suministro de iones oxhidrilo, se debe evitar un tratamiento que sea excesivo con bicarbonato de sodio, ya que no es favorable que ocurra un aumento de los iones bicarbonato y de carbonato, ya que el aumento de

dichos iones tiende a aumentar la brecha entre ambas determinaciones (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

Cuando se expone a un ácido moderadamente fuerte, se descompone en dióxido de carbono y agua. Lo que ocasiona la reacción química siguiente:



4.8.8 Cal.

Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas y dolomías. La fórmula química de la cal es $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y tiende a ejercer el mismo efecto que el cemento cuando se añade en los lodos de perforación. En los lodos que presentan una alta concentración de iones oxhidrilo, sirve como una fuente potencial de iones Ca^{2+} y OH^- . En los lodos de perforación no es conveniente que existan simultáneamente los iones Ca^{++} y $\text{CO}_3^{=}$ en estado libre, ya que cuando coexisten forman el carbonato de calcio (CaCO_3). Cabe hacer énfasis que no pueden coexistir los iones Ca^{2+} , OH^- y HCCO_3^- en los lodos de perforación. Por consiguiente, la mayoría de las ocasiones se añaden pequeñas cantidades de cal a los lodos cuando se tiene la presencia de carbonato o bicarbonato, por lo que es conveniente realizar las pruebas piloto pertinentes, para lograr que las propiedades del lodo sean las adecuadas (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.9 Medida de la dureza total.

La medida de la dureza total, más las concentraciones que existen de (Ca^{2+}) y del (Mg^{2+}) pueden ser obtenidas de distintas maneras, siendo los más comunes los siguientes: se debe de tener de forma separada la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , esta concentración se puede determinar por el método de titulación (análisis volumétrico); otra forma es por el denominado método “calgamite”, que es una solución que comúnmente se diluye con agua destilada. Cuando se presenta la titulación específica para el Ca^{2+} , esta se puede determinar utilizando el equipo calver 2, donde se puede observar que la diferencia que existe entre la dureza total y el contenido de Ca^{2+} , dará como resultado la concentración de iones Mg^{2+} (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

Los resultados de perforar formaciones con anhidrita con lodos de perforación base agua, son muy similares al que se producen cuando se perforan formaciones o grandes secciones de sal; considerando que un número pequeño de los iones del calcio pueden causar tanto daño como una cantidad mayor de los iones de sodio. La contaminación de la sal es muy dañina en las formaciones con presencia de anhidrita y yeso, al igual que la sosa cáustica, además la adición del agua ayuda para que las propiedades del lodo se recuperen, por lo que los lodos de perforación pueden ser tratados con sustancias químicas que reaccionan con los iones del

calcio y que los remuevan de la fase continua, además hay que tomar en cuenta que los iones del calcio dificultan el control de la pérdida en el filtrado y en las altas temperaturas se puede generar una gelificación excesiva.

El carbonato de sodio y el bicarbonato de sodio propician la precipitación de los iones del calcio eliminándolos de la fase continua de los lodos, los fosfatos complejos, STP (tetrafosfato de sodio) y SAPP (pirofosfato ácido de sodio), sin embargo, un tratamiento en exceso con cualquiera de esas sustancias puede ser muy perjudicial para las propiedades químicas de los lodos. Cuando se tiene conocimiento de la ubicación de capas donde se encuentra presente la anhidrita, el tratamiento de los lodos con sosa cáustica, bicarbonato de sodio o alguno de los fosfatos antes mencionados; reduce el impacto de la anhidrita en las formaciones. Esto se debe a que en los iones del calcio, los contaminantes son removidos de la fase continua a medida que entran en contacto con ella, sin embargo, cuando existen grandes concentraciones de iones calcio en los lodos, la remoción de los iones del calcio es casi ineficiente.

El uso de lodos de perforación base agua inhibidos tienen la capacidad de tolerar a los iones, además el pH del lodo disminuye cuando se perforan grandes secciones de anhidrita. Esto se debe en parte a que además de en los iones calcio también se desplazan los iones hidrógeno en la estructura de las arcillas. Cuando se tienen valores de Pf superiores a 1.0, los iones calcio de la anhidrita se combinan con los iones oxhidrilo para formar la cal; esta reacción tiende a bajar la Pf. La fórmula química del yeso es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, es químicamente idéntica a la composición de la anhidrita, excepto por el agua de la cristalización que se encuentra presente. En muchas ocasiones se perforan formaciones de yeso, especialmente a poca profundidad y algunas veces se añade yeso a los lodos de perforación desde la superficie (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.10 Anaranjado de metilo.

Es un colorante azoderivado, con varios cambios de color rojo a naranja-amarillo. Presenta un pH de 3.1 a 4.4, el nombre completo de este compuesto químico es sal sódica de ácido sulfónico de 4 dimetilaminoazobenceno. Su fórmula química es: $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$, su masa molar es de 327,34 g/mol. La mayoría de las veces presenta un punto final cuando su potencial de hidrógeno (pH) es de 8.3, por ende el cambio de color que presenta, mostrará el punto final de la titulación, dicho proceso se lleva a cabo de la misma manera que con la fenolftaleína, ya que se realiza el mismo procedimiento con la utilización del ácido. El anaranjado de metilo presenta un color amarillo un poco arriba del potencial de hidrógeno de 4.3, el cual cambia a color rosado en su punto final de pH de 4.3; este método de titulación, se puede abreviar con Mf y Mm (que representan al lodo, y al filtrado respectivamente). En este método, todas las alcalinidades que se presentan, deben ser reportadas como un volumen del ácido que se va a utilizar; este volumen es de suma importancia para poder llegar al punto final del indicador (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

La Pf representa la alcalinidad de la fenolftaleína del filtrado del lodo, lo que es muy diferente a Pm, ya que pone a prueba el efecto de solo las bases disueltas y de las sales; sin embargo, la Pm incluye el efecto de las sales disueltas y no disueltas y de las sales en los lodos de perforación.

4.11 Fenolftaleína.

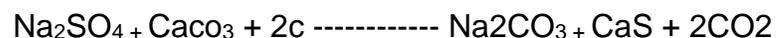
La fenolftaleína, de fórmula química: (C₂₀H₁₄O₄), es un indicador del pH que en disoluciones ácidas permanece incoloro, pero en disoluciones básicas toma un color rosado con un punto de viraje entre pH= 8,2 (incoloro) y pH= 10 (magenta o rosado). Tiene características principales, un cambio en el punto final, cuando su potencial de hidrógeno tiene el valor de 8.3, de esta manera se tornará un color rosado en algunas soluciones con el denominado potencial de hidrógeno (pH) cercano a 8.3. Conforme se va añadiendo el ácido gota a gota, el potencial de hidrógeno va disminuyendo; por otra parte, cuando el pH es de 8.3, el color que presentó al principio de color rosado, irá desapareciendo lentamente. El fenómeno de titulación es observado muy fácilmente con el indicador de la fenolftaleína y se denota como un punto final; todo esto depende de diversos factores. Existen una gran variedad de puntos que tienen vital importancia en el campo, ya que si el filtrado o la muestra del lodo presenta valores Pf o Pm mayores que 0 (0.01), el potencial de hidrógeno que se tenga en esta muestra no debe ser menor que 8.3 (que para fines prácticos se representa como un punto final del indicador). Los valores que se tienen de Pf y Pm se pueden utilizar para tratar de determinar qué cantidad de calcio se encuentra contenido en los lodos de perforación base cálcica (*García Hernández, 2014*).

Si los lodos presentan un pH inferior a 11, las adiciones del carbonato de sodio provocan un aumento del mismo, lo que propicia un contraste con otros tratamientos que se le da a la contaminación con calcio; lo que disminuye el pH de los lodos. A continuación se presentan las reacciones químicas del carbonato de sodio:

Sal común con ácido sulfúrico:



Reacción de la calcinación de Na₂SO₄ con caliza y con carbón:



4.12 Gases solubles.

Los gases que se encuentran presentes en las formaciones productoras, afectan las propiedades químicas de los lodos, en caso de que penetren en ellas. Si los gases se disuelven en la fase continua, los efectos químicos pueden también ser de importancia. El ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el anhídrido carbónico o dióxido de carbono (CO₂), tiende a disminuir el pH de los lodos; por otra parte el dióxido de carbono aumenta el número de los iones del carbonato y del bicarbonato, respectivamente (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.13 Propiedades químicas de los lodos.

4.13.1 pH y control de la alcalinidad.

La determinación y mantenimiento de los valores correctos del pH tienen mayor importancia hoy en día que en años pasados, en cuanto a la formulación de los lodos de perforación. Dicho mantenimiento de los valores del pH generan un impacto directo sobre las propiedades de los lodos de perforación. El pH es una medida del grado de acidez o de alcalinidad que presenta una solución acuosa, la dimensión numérica del pH varía entre 0 y 14 siendo los valores bajos, ácidos, y los valores altos, los valores alcalinos. Una solución que presenta un pH de 7 se le considera neutra; el pH se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno y la ecuación es la siguiente:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Por ejemplo, si se tiene un ácido fuerte que tiene una molaridad de 0,01M, el pH de la solución será de 2; ya que:

$$\text{pH} = -\log 10^{-2}$$

$$\text{pH} = 2$$

La escala del pH se basa en la constante de la disociación del agua; cabe resaltar que en el agua destilada hay pocas moléculas que reaccionan una con la otra para formar iones y esto determinará las propiedades ácidas. Las propiedades básicas se encuentran conformadas por el ion OH^- , la siguiente ecuación describe la relación:



El agua destilada a 25°C se disociará hasta que las concentraciones del H^+ y OH^- sean iguales. Un valor neutro del pH corresponde a:

$$1 \times 10^{-7} \text{ M en ambos iones}$$

El producto que se tiene de las concentraciones es la denominada constante de equilibrio para el agua, también se le conoce como la constante de disociación K_w .

$$K_w = [\text{H}^+] [\text{OH}^-]$$

$$K_w = (1 \times 10^{-7})^2$$

$$K_w = (1 \times 10^{-14})$$

En los lodos de perforación base agua, la fase continua es el agua, en este medio se puede controlar la concentración de las bases o de los ácidos; el pH que tendrá una disolución de una base fuerte, es éste caso (NaOH) cuya concentración de iones OH^- es 10^{-2} M será de:

$$[H^+] = 1 \times 10^{-14} / 1 \times 10^{-2} = 1 \times 10^{-12} \text{ M}$$

$$\text{pH} = -\log (1 \times 10^{-12})$$

$$\text{pH} = 12$$

En la siguiente tabla, se indica la relación entre el valor del pH y la actividad de la solución; por lo tanto, debemos tener en cuenta lo siguiente:

$$[H^+] [OH^-] = K_w = 1 \times 10^{-14} \text{ mol/L}$$

K_w = constante de equilibrio del agua.

Si el producto permanece constante y la concentración del $[H^+]$ aumenta; por lo tanto, la concentración de $[OH^-]$ debe disminuir.

En la **tabla 4.3**, se puede observar la relación entre las concentraciones de H^+ y de OH^- y el pH de una disolución acuosa.

$[H^+] \text{ mol/L}$	pH	$[OH^-] \text{ mol/L}$
1×10^0	0	1×10^{-14}
1×10^{-1}	1	1×10^{-13}
1×10^{-2}	2	1×10^{-12}
1×10^{-3}	3	1×10^{-11}
1×10^{-4}	4	1×10^{-10}
1×10^{-5}	5	1×10^{-9}
1×10^{-6}	6	1×10^{-8}
1×10^{-7}	7	1×10^{-7}
1×10^{-8}	8	1×10^{-6}
1×10^{-9}	9	1×10^{-5}
1×10^{-10}	10	1×10^{-4}
1×10^{-11}	11	1×10^{-3}
1×10^{-12}	12	1×10^{-2}
1×10^{-13}	13	1×10^{-1}
1×10^{-14}	14	1×10^0

Tabla 4.3 Relación entre las $[H^+]$, $[OH^-]$ y el pH (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

La API recomienda 2 métodos para la determinación del pH.

El método colorimétrico, mediante papeles indicadores.

Tiene una precisión limitada a 0.5 unidades

Las condiciones de humedad y temperatura afectan el papel

Las concentraciones de más de 10,000 ppm de cloruros afectan las lecturas.

Los filtrados oscuros afectan la lectura.

El método electrométrico, se puede medir con un electrodo.

Presenta una precisión de 0,02

Se puede calibrar mediante soluciones de pH que sean conocidos. Por lo general, es muy inexacto en las soluciones saturadas de NaCl y KCl (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

En la **figura 4.10**, se puede observar la relación que existe entre el pH y la alcalinidad presentes en el agua y de la gran variación que se tiene cuando el pH es neutro (7) y cuando está en (14).

pH	NaOH (lb/bbl)	Pf (cc 0,02N H ₂ SO ₄)	OH ⁻ (ppm)
7	0,0000014	0,000005	0,0017
8	0,000014	0,00005	0,017
9	0,00014	0,0005	0,17
10	0,0014	0,005	1,7
11	0,014	0,05	17
12	0,14	0,5	170
13	1,4	5	1.700
14	14	50	17.000

Figura 4.10 Relación entre el pH y alcalinidad del agua (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

4.13.2 Alcalinidad.

La alcalinidad de una solución se define como la concentración que presentan los iones solubles en agua y que neutralizan a los ácidos. En otras palabras cualquier ion que proporciona un protón, H⁺, al lodo actuará como un ácido. Cualquier ion que se combina con un protón es un contribuyente a la alcalinidad. A continuación se presentan los siguientes ejemplos:

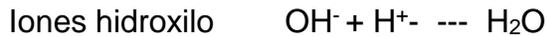


El ácido sulfúrico contribuye con 2 protones al agua.



El ion [OH⁻] se combina con el H⁺ para formar agua, por lo tanto contribuye a la alcalinidad.

Los lodos base agua cuentan con 3 iones que contribuyen a la alcalinidad, a continuación se presentan estos iones:



En estas reacciones, el protón se combina con cada uno de los iones, de esta manera cada ion contribuye a la alcalinidad. Se puede apreciar que la alcalinidad y pH se encuentran sumamente relacionados pero no son lo mismo.

Fuentes de alcalinidad.

Los compuestos más utilizados para el control de la alcalinidad son:

Sosa cáustica (NaOH)

Hidróxido de potasio (KOH)

Cal (Ca (OH)₂)

Todo producto que tienda a contribuir con OH⁻ a los lodos de perforación va a incrementar el pH del mismo. Los carbonatos se pueden encontrar en la naturaleza en el transcurso de una operación. Muchas veces se pueden encontrar en la forma de K₂CO₃ o potasa. Cabe mencionar que si se presenta un influjo de CO₂ puede inducir al carbonato a que presente la siguiente reacción con el agua:



Finalmente, el CO₂ puede generarse por la degradación bacteriana de los productos orgánicos de los lodos de perforación. Vale la pena mencionar que los lodos contienen almidones y diferentes polímeros que se encuentran sujetos a la degradación bacteriana. Finalmente, otra fuente de CO₂ es el agua que se utiliza para la preparación de los lodos de perforación. Toda el agua debe ser analizada para determinar el contenido de CO₂, la cantidad de dióxido de carbono (CO₂), la cantidad del carbonato y las del bicarbonato, que se encuentran presentes en los lodos de perforación, dependen única y exclusivamente del pH que presente el lodo. El rango de los valores del pH a los cuales se detecta el bicarbonato se encuentra entre 7 – 10.30. Cuando se presentan niveles de pH mayores a 10.30 la concentración de los iones de OH⁻ es suficientemente alta como para formar una reacción cuyo contenido final será CO₃²⁻ y agua. Los rangos predominantes del pH para los iones, presenta la siguiente alcalinidad.

pH 4.3 – 6.3 dióxido de carbono, se presenta como un gas en solución.

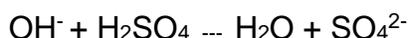
pH 6.3 - 10.3 bicarbonato, presente como un ion en solución.

pH 10.3 + carbonato, como ion en solución.

El conocimiento de la relación entre el pH y la alcalinidad es un factor primordial para la determinación de los diferentes contaminantes que se encuentran presentes en los lodos de perforación. Por ejemplo es prácticamente imposible tener como contaminantes al mismo tiempo CO_2 y HCO_3^- si el pH es de más de 11.5. También es totalmente inaceptable tener una contaminación de CO_3^{2-} si el pH es de 8.5 (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

4.13.3 Alcalinidad pf

Esta titulación se hace sobre el filtrado del lodo; se utiliza fenoftaleina como una solución indicadora y ácido sulfúrico N/50 como la solución tituladora. El punto final de la titulación se produce cuando el color de la muestra cambia de rojo al color original del filtrado, el cambio de color ocurre cuando el pH de la muestra llega a 8.3 reportándose como pf los mililitros de ácido utilizados. A continuación se presentan las 2 reacciones que se producen en la titulación:



En otras palabras, cuando se tiene un pH de 8.3 se cumple lo siguiente: la mayoría del carbonato se convierte en agua. De esta manera se puede concluir que al haber una alta concentración de OH^- de CO_3^{2-} el pf será alto. Para poder determinar cuál es el ion presente y la cantidad de cada uno, se debe de determinar la prueba de Mf. De los 2 iones que se encuentran presentes, el carbonato afectará la titulación Mf, por lo tanto, la Mf presenta la siguiente reacción:



Se puede apreciar que el bicarbonato se convierte en dióxido de carbono al punto final de la titulación donde el pH es de 4.3, una alta concentración del ion carbonato en el Pf producirá una alta concentración de iones bicarbonato en la titulación Mf. La titulación Pf convierte al carbonato en bicarbonato y la titulación Mf convierte al bicarbonato en dióxido de carbono (*George R. Gray y Hch Darley, 1980*).

4.13.4 Alcalinidad Mf.

Al finalizar la prueba Pf se agrega el anaranjado de metilo, también conocido como el verde bromo cresol a la muestra y se continúa la titulación con ácido sulfúrico N/50. Con el anaranjado de metilo, el color de la muestra cambiará de naranja a un rosado salmón, siendo en este momento que el pH de la muestra tiene un valor de 4.3. El resultado se reporta como Mf y será la suma de la cantidad del ácido sulfúrico que se utiliza para determinar el Pf más la cantidad de ácido empleada para poder determinar el Mf. A continuación se presentan algunos ejemplos la titulación de un filtrado con un pH de 10,4.

Pf = 3,2 ml de H_2SO_4 50/N pH = 10,40

Mf = 5,3 ml de H_2SO_4 pH = 8,30 cambio de color rosado a original

pH = 4,30 cambio de color naranja a rosado

Para esta muestra se tomó como ejemplo 5.30 ml de ácido sulfúrico, para de esa forma reducir el pH de 10.4 a 4.3. La alcalinidad Pf es de 3.2 y el Mf de 5.2 ml (3.2 + 2.1). Analizando la Pf y la Mf en cuanto a su composición iónica se tiene: sabiendo que el CO_3^{2-} afecta tanto al Pf como a la Mf es fácil determinar que el ion que se tiene en la Pf es:

OH^- no se halla presente en la titulación Mf.

No pueden existir simultáneamente altas concentraciones de OH^- y CO_3H^- , ya que se produce la siguiente reacción:



Si tanto el Pf como el Mf son altos, el contaminante es CO_3^{2-}

Si el Pf es alto y el Mf bajo, el ion predominante será HCO_3^-

Cuando se tiene un pH más alto a 10,5 y los valores de Pf y Mf son altos, los iones predominantes serán: CO_3^{2-}

Si el pH es menor de 10 con un alto Mf el ion que predomine será: HCO_3^-

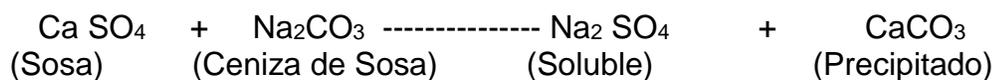
Si el pH es de más de 10 y el Pf es alto con un Mf bajo el ion predominante será: OH^- (Benítez Hernández, Garaicochea Petirena y Reyes Álvarez, 1979).

4.14 Reacciones químicas de los componentes Ca^{2+} y Mg^{2+}

4.14.1 Precipitación del Ca^{2+} y Mg^{2+} en los lodos de perforación.

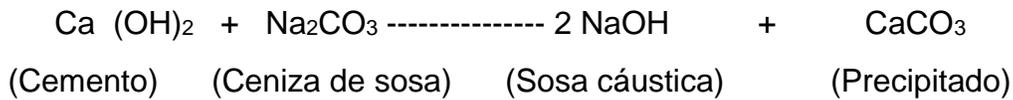
En los lodos, muchas veces se pueden presentar precipitaciones, en este caso se toman como ejemplos los del calcio y del magnesio. Si se tiene una especie de fuente de iones de calcio que tiende a incrementarse por la presencia de agua o por los denominados estratos del yeso, el calcio debe ser precipitado con aditivos, en este caso la sosa caustica. Para que se puede realizar una precipitación adecuada se deben de tener cantidades idóneas que no puedan alterar de manera alarmante las composiciones químicas del calcio y del magnesio; y en este caso la cantidad adecuada de sosa que se requerirá es solo 0.0017 lb de ceniza, por cada barril de lodo que se vaya a ocupar. Como se sabe las unidades son siempre ppm Ca^{2+} .

A continuación, se muestre la reacción química que describe de mejor manera este proceso:

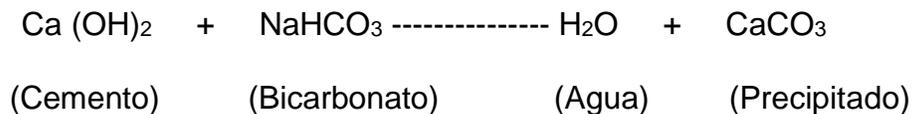


Muchas veces, en la mayoría de los casos, el calcio que se encuentra almacenado y que se tiene es por causa del cemento; los iones que se tengan del hidróxido OH^- , son por causa del cemento, por lo general tienden a formar 2 moléculas de sosa

cáustica (NaOH) por cada molécula que se tenga de cemento; de esta forma se tendrá un pH alto. La reacción química es la siguiente:



Como complemento se puede observar, que la ceniza que se encuentra presente en la sosa cáustica, no se debe de utilizar excesivamente para tratar de eliminar el exceso de contaminación, que es causada principalmente por el cemento; ya que si se tienen sistemas dispersos, en donde se pueden utilizar los adelgazantes químicos para tratar de bajar el potencial de hidrógeno, se deben de tener adelgazantes químicos no cáusticos. Más adelante se mostrará, la manera de suprimir el uso de la ceniza de la sosa cáustica, para esto se puede utilizar el bicarbonato de sodio (NaHCO₃), para que se pueda eliminar de forma eficaz la contaminación causada por la acción del cemento, se debe de contar con la presencia del bicarbonato de sodio, ya que por acción del ion hidrógeno que se encuentra presente, tiende a formar una sola molécula de la denominada sosa cáustica y casi simultáneamente se puede formar una molécula de agua mientras el cemento es eliminado paulatinamente. La reacción química es la siguiente:



Para este caso, los iones magnesio que se encuentran presentes; forman precipitados, con el uso de la sosa cáustica que se encuentra presente en la misma concentración al igual que la ceniza, se elimina de forma eficaz el contenido de calcio que se encuentra en esta solución. El contenido es: (0.0015 lb de sosa cáustica/barril de lodo/ppm Mg²⁺). La reacción que se presenta a continuación representa de mejor manera la precipitación del magnesio:



(George R. Gray y Hch Darley, 1980).

4.15 Cloruros.

En los lodos de perforación, los cloruros que se encuentran presentes pueden originar diversos problemas, a continuación se presentan los casos más comunes: Primero que nada, se toman como referencia las sales que se encuentran disueltas al agregarse el agua (NaCl, CaCl₂ o MgCl₂). Por otra parte, se toman las sales que se encuentran presentes como agregados a los lodos de perforación, como se puede intuir los siguientes agregados que se encuentran presentes en formaciones

tales como los estratos de sal que son perforados, y el denominado flujo de agua salada. Vale la pena mencionar, que la salinidad que se encuentra presente en los lodos de perforación, se puede determinar por medio del método de titulación del filtrado, muchas veces es común tratar de suponer que la mayoría de los cloruros presentes son por causa de la sal que se conoce (NaCl), y por ende del contenido de cloruros que son transformados al contenido de sal.

$$\text{Ppm de sal (NaCl)} = \text{ppm de cloruros (Cl}^-) * 1.65$$

$$\text{Ppm de cloruros (Cl)} = \text{ppm de sal (NaCl)} * 0.606$$

Este método es muy aceptado, siempre y cuando la dureza total y el contenido del potasio que se encuentra en el filtrado esté por debajo de lo estipulado; o en todo caso que tenga una cantidad mínima. Por otra parte, la máxima cantidad de la saturación de cloruros que se pueda encontrar en el agua a 20° C (68° F), es de 188,000 ppm, como se sabe, la máxima cantidad de saturación de la sal es de 311,000 ppm. Los lodos que tengan un alto grado de saturación de sal, así como de la solubilidad de la sal; se incrementarán de una forma muy rápida; todo esto aunado a que la temperatura del pozo va en incremento; y por ende la salinidad que se encuentra en los lodos de perforación, será mucho mayor que la saturación que se tienen registrada a los 20° C. La solubilidad máxima que se puede presentar en los sistemas que son salados depende única y exclusivamente de la temperatura que puedan presentar los lodos, y de la gran solubilidad que pueda tener la sal. La alcalinidad (Pf, Pm, Hf, y P1, P2) en el lodo y el filtrado del lodo. La cantidad de alcalinidad que se encuentra presente en los lodos de perforación y del filtrado, tienen como objetivo principal la denominada titulación de una pequeña muestra con una muy leve cantidad de ácido sulfúrico o del ácido nítrico, en donde al final de la solución se puede indicar (cuando el denominado indicador tiende a cambiar de color, esto indica, que las soluciones que se encuentran son la fenolftaleína y el anaranjado de metilo (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

4.16 Análisis de un lodo de perforación con alcalinidad alta.

Un lodo de perforación base agua, que se encuentre saturado por cal Ca (OH)_2 , y que presente un exceso de sólidos de cal no disueltos; pueden ser mantenidos en reserva. Los lodos calizos se clasifican según su contenido de cal que presenten, contenido bajo de cal 0.5 – 2 lbm/bbl, contenido medio de cal que va de 2 – 4 lbm/bbl, y por su contenido alto en cal, que generalmente es más de 4 lbm/bbl. Todos los lodos calizos tienden a presentar un pH mayor a 12, ya que el filtrado se encuentra saturado por cal. Existen una gran variedad de aditivos para poder contrarrestar la pérdida de los fluidos: almidón, el hidroxipropil almidón, la carboximetilcelulosa (CMC) o la celulosa polianiónica (PAC). Cuando existe la presencia de bentonita prehidratada, se puede mejorar la pérdida de los fluidos y por ende la reología de los lodos de perforación calizos. Recientemente se ha utilizado maltodextrina en los lodos de cal, como defloculante sobre todo en las arcillas; por otra parte, tiende a estabilizar a las lutitas y aumenta la solubilidad del calcio. El KCL se ha utilizado con mucho éxito en la perforación de las lutitas hidratables, dada su capacidad de presentar una alcalinidad alta de lodo, sobre todo

por la cantidad de cal excedente que presenta para neutralizar los gases ácidos, cabe destacar que esta es una de las razones por las que se utilizan éste tipo de lodos de perforación calizos. Las zonas que tienen ácido sulfhídrico (H_2S) se pueden perforar con más seguridad y con grandes cantidades de CO_2 , ya que pueden ser neutralizadas con el exceso de cal (McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011).

CUESTIONARIO #3

1.) Explique brevemente las fases de los lodos de perforación.

Se tienen dos fases, donde las partículas sólidas o los glóbulos líquidos suspendidos constituyen la fase discontinua del lodo. En otros casos, el agua es la fase continua y las arcillas son la fase discontinua o interna, en los lodos constituidos principalmente de agua y arcillas. Por otra parte, en el caso de que se tenga una emulsión inversa, el petróleo es la fase continua y los glóbulos contenidos en el agua son la fase discontinua. El aumento en la concentración de la fase continua tiende a adelgazar a los lodos de perforación y por otra parte, el filtrado proviene en su mayor parte de la fase continua; mientras que el revoque se forma a partir de la fase discontinua. La fase continua de un lodo siempre es líquida; en cambio en la fase discontinua se pueden hallar sólidos, líquidos y gases.

2.) Explique brevemente la fase sólida de los lodos.

Los sólidos juegan un papel muy importante en la condición, mantenimiento y densidad de los lodos, ya que, se les asigna una fase aparte, aun cuando todas las partículas sólidas que hay en un lodo pertenecen a su fase discontinua. La inestabilidad de los lodos de perforación aumenta a medida que el porcentaje de sólidos (en volumen) se eleva. Los diversos tratamientos químicos pueden incrementar la capacidad de un lodo para soportar sólidos, pero sólo hasta cierto punto. Los sólidos que se hidratan o que tienen numerosas cargas eléctricas de superficie expuestas, se denominan sólidos activos en los lodos base agua. Otros sólidos, como por ejemplo, la barita, son prácticamente inertes. La mayoría de los sólidos (con la excepción de algunos aditivos especializados de lodos base aceite), son inertes. Cuando el nivel total de sólidos no es excesivo puede, contener un exceso de sólidos activos.

3.) ¿Cuál es la función principal de la celulosa drispac?

La celulosa drispac tiene como función principal, reducir la pérdida de agua de los distintos lodos de perforación que tienen como base agua salada o agua dulce; también proporciona una gran viscosidad a estos sistemas. Se sabe, con base en estudios realizados, que la celulosa drispac se degrada cuando se alcanzan temperaturas mayores a los $300^{\circ} F$.

4.) ¿Qué son los gases solubles?

Son los gases que se encuentran presentes en las formaciones productoras, que afectan las propiedades químicas de los lodos, cuando penetran en ellas. Si los gases se disuelven en la fase continua, los efectos químicos pueden también ser de importancia. El ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el anhídrido carbónico o dióxido de carbono (CO_2), tiende a disminuir el pH de los lodos; por otra parte el dióxido de carbono aumenta el número de los iones carbonato y del bicarbonato, respectivamente.

5.) ¿Qué es la alcalinidad?

La alcalinidad de una solución se define como la concentración que presentan los iones solubles en agua y que neutralizan a los ácidos. En otras palabras cualquier ion que proporciona un protón al lodo, H^+ , actuará como un ácido. Cualquier ion que se combina con un protón es un contribuyente a la alcalinidad.

CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LA BENTONITA EN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

Las arcillas son sedimentos de grano fino, producto de la alteración química o por haber experimentado un transporte sedimentario muy grande. Se encuentran constituidas, por una gran variedad de partículas, minerales laminares formados principalmente por silicatos alumínicos hidratados que tienden a presentar impurezas de otros minerales acompañantes, cuyo tamaño de partícula es menor a 0.00390 mm. La arcilla que más se utiliza en los lodos de perforación es la montmorillonita, que comúnmente se llama bentonita, ya que es la roca de la que procede.

Los principales tipos de arcillas que se utilizan en los lodos de perforación son:

Arcillas en forma de aguja no hinchables: la atapulguita y la sepiolita.

Arcillas laminares no hinchables: Illita, clorita y la caolinita.

Arcillas laminares muy hinchables: Montmorillonita sódica (bentonita).

5.1 Bentonita

La bentonita es una roca de origen ígneo, compuesta por más de un tipo de minerales, aunque es la esmectita su constituyente principal; es la que le proporciona sus propiedades y características. Su definición data del año de 1988, año en que fueron descubiertas y clasificadas como tales en Fort-Benton, en el estado de Wyoming, USA. La propiedad principal que presentó fue la de hincharse al entrar en contacto con el agua, proporcionando una masa voluminosa y una alta gelatinosidad. Las bentonitas también son llamadas “arcillas activadas”, debido a su gran afinidad en ciertas reacciones químicas asignadas por su excesiva carga negativa.

La bentonita tiene una estructura de capas, el ion predominante en su estructura es el aluminio; que puede ser reemplazado por otro ion metálico formando una gran variedad de minerales, generalmente compuesta por montmorillonita; existen los siguientes 2 tipos principales:

5.1.1 Bentonita sódica:

Es un tipo de montmorillonita que se encuentra en forma natural y que contiene un alto nivel de iones de sodio, misma que se hincha al mezclarse con el agua.

5.1.2 Bentonita cálcica:

Es una montmorillonita en la que el ion intercambiable predominante es el calcio, ésta no presenta la capacidad de hinchamiento.

Las arcillas que son utilizadas en los lodos de perforación, se caracterizan principalmente por tener una gran variedad de minerales, sin embargo, el más utilizado corresponde con la montmorillonita de sodio, que proporciona una gran cantidad de alternativas que repercuten principalmente con la pérdida de agua, que es una característica muy peculiar de gran utilidad en los lodos de perforación de agua dulce. Por sus características químicas, la bentonita brinda una gran viscosidad, que corresponde a uno de los aspectos más importantes que presenta ese conjunto de minerales que originan el aumento de su volumen de una manera muy importante.

En la **figura 5.1**, se describe la estructura de la montmorillonita, que se compone estructuralmente de una capa central que contiene aluminio y magnesio que se encuentran entrelazados de una forma octaédrica en forma de óxidos e hidróxidos; dicha capa central se encuentra rodeada por otras 2 capas. Sus capas externas se encuentran formadas por óxidos de silicio que se encuentran conformados tetraédricamente.

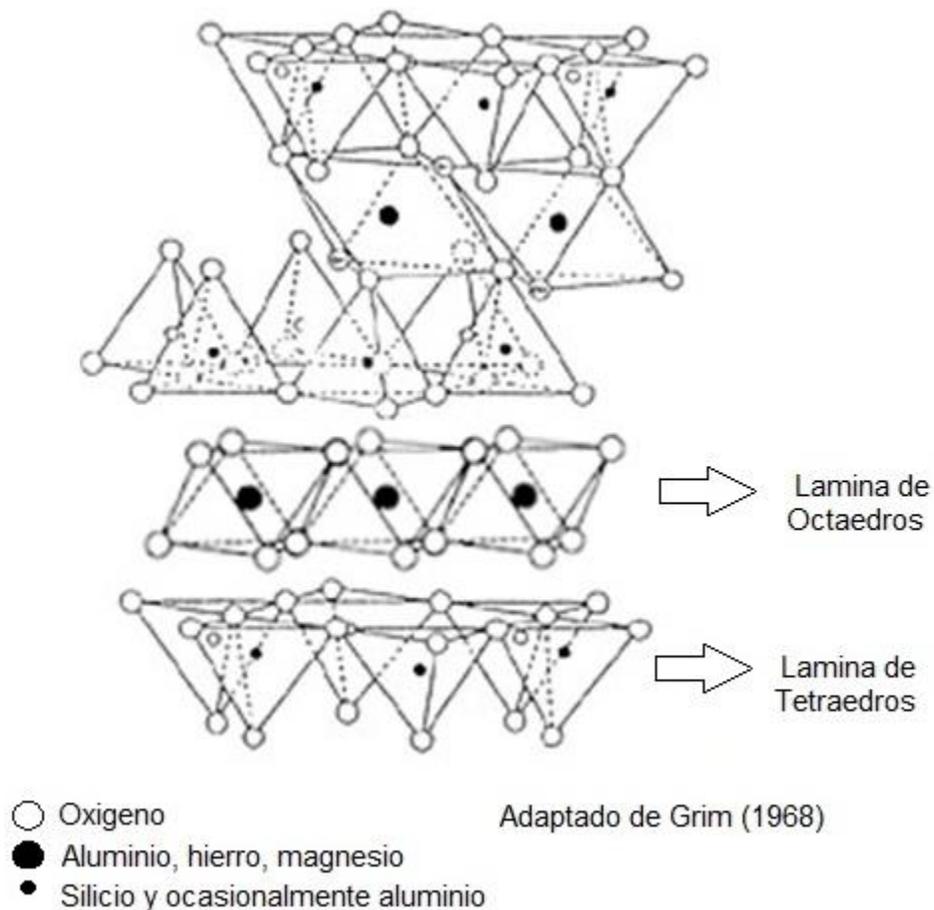


Figura 5.1 Estructura de la montmorillonita. (Tomada de www.google.com.mx/url, 2016).

Al fenómeno con el cual la bentonita tiende a aumentar su volumen, se le conoce como “hidratación de la bentonita”, ya que los minerales de que se compone presentan generalmente 3 capas ensanchables. Un caso particular que favorece el

incremento de este fenómeno, es que la capa tetraedral del silicio es reemplazada por el aluminio; no obstante hay casos particulares, en donde la hoja octaedral presenta un reemplazamiento de aluminio por una gran variedad de elementos químicos tales como: litio, zinc, hierro, magnesio; estos átomos presentan baja carga positiva, lo que favorece que ocurran reemplazamientos de los átomos que presentan una carga positiva más alta o más elevada. El resultado de este reemplazamiento es que se presenta un déficit de cargas positivas, lo que puede ser compensado por la absorción de cationes. Cuando existe presencia de agua, la compensación de los cationes (+), que se encuentran en las capas superficiales, favorece que se produzca un intercambio de cationes cuando estos se encuentran en solución. La gran variedad de cationes que se encuentran en solución son denominados cationes intercambiables, cuando se encuentran en solución existe una gran variedad de capas que favorecen la hidratación cuando hay presencia de agua dulce, además de que los cationes intercambiables se ubican en todos los lados de las capas de las unidades que permiten que se presenten en la gran variedad de conjuntos; el mayor intercambio de cationes se presenta principalmente en las superficies externas de las partículas. Una forma que permite conocer más sobre la bentonita se realiza la prueba de azul de metileno, (methylene blue test, MBT), que corresponde con un ensayo que determina la cantidad de materiales que son similares a la arcilla contenidos en un lodo de perforación base agua, según la cantidad de colorante de azul de metileno que es absorbido por la muestra. Los resultados obtenidos son reportados como (MBT), también como lbm/bbl, o como bentonita equivalente, cuando se realiza conforme a las especificaciones API. Este es un parámetro muy importante que se toma como referencia de la medida de este intercambio de cationes y que tiene un uso muy significativo para tratar de conocer la reactividad de las arcillas (*García Hernández, 2014*).

5.2 Mecanismos de hidratación de la bentonita.

Existen tres mecanismos de hidratación de la bentonita, el primero ocurre en la superficie y es de tipo residual. El segundo es el de la retención de la humedad y el tercer mecanismo es la hidratación de la superficie de las capas de la estructura tetraedral del sílice, que a continuación se describe.

5.2.1 Mecanismo en superficie.

Este mecanismo corresponde a la hidratación que se presenta cuando la montmorillonita entra en contacto inicialmente con el agua, ya que este fluido penetra en todas las unidades de las capas que se presentan como conjunto, posteriormente, ocurre una adsorción en las partes superiores e inferiores de todas las capas estructurales que se tienen en la unidad. Este proceso de hidratación se controla por el volumen de arcilla y por el tipo de cationes existentes; tomando en cuenta el aporte de sólidos que se tenga sobre todo en las lutitas hidratables que se están perforando, y que se encuentran contenidas en las arcillas (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

En la **gráfica 5.2**, se aprecia como el aumento de la viscosidad es igual a la adición de la bentonita prehidratada cuando se le agrega sal; y por otra parte la disminución de la viscosidad es igual a la adición de bentonita seca cuando se encuentra en una solución salina.

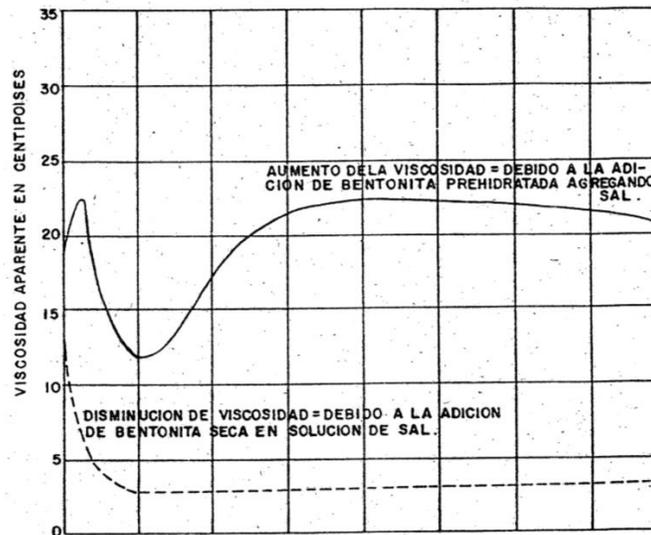


Figura 5.2 Mecanismo en superficie. (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

5.2.2 Mecanismo de retención de la humedad.

El mecanismo denominado retención de la humedad se origina principalmente por el fenómeno conocido como “la rotura por unión de agua”, donde el agua se va absorbiendo por los bordes y las esquinas de los cristales que forman a las arcillas, lo que ocasiona que se vayan distribuyendo progresivamente las cargas de los iones que no se encuentran saturados. Este proceso se lleva a cabo en el lapso en que las partículas de arcilla se rompen, dando como resultado las fuerzas de corte, que favorecen que el agua entre en contacto, ya que se va introduciendo por todos los espacios interestructurales. La bentonita al permanecer en estado de reposo presenta una hidratación mucho mayor de lo normal; además de presentar una viscosidad mucho mayor (George R. Gray y Hch Darley, 1980).

5.2.3 Mecanismo en la estructura tetraedral.

Este mecanismo se presenta generalmente en la superficie de las capas de la estructura tetraedral que se presenta en el sílice. El proceso se lleva a cabo cuando se tiene suficiente agua entre las hojas cristalinas, ya que el agua se introduce muy rápidamente, además de que existe un intercambio de cationes que tienen como objetivo la separación de la superficie del sílice. En el proceso, ocurre la separación de la carga equivalente de los cationes presentes, ya que existe una fuerza que se ejerce en la superficie del sílice. A medida que esta fuerza va incrementándose, el

agua entra más fácilmente por las hojas y por esta razón, las arcillas de las lutitas se hidratan (*Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979*).

5.3 Condiciones de equilibrio entre la bentonita y el agua.

Las condiciones de equilibrio entre la bentonita y el agua pueden ocurrir por la dispersión, floculación, defloculación y la agregación, que se describen a continuación:

5.3.1 Dispersión.

La dispersión corresponde con el proceso que siguen las placas que se encuentran en la bentonita; este fenómeno que se lleva a cabo después de que las placas han sido separadas por procesos tales como la hidratación y la agitación. En la dispersión existen fuerzas de repulsión principalmente en las caras de las placas.

5.3.2 Floculación.

Este fenómeno se produce cuando las placas presentes en la bentonita tienden a moverse borde con borde o borde con cara, ya que se establecen grupos y paquetes en donde las placas originan una enorme fuerza de atracción. La floculación también se define como el proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan como sustancias coloidales en presencia de agua; esta condición propicia su decantación y posterior filtrado.

5.3.3 Defloculación.

Es el fenómeno que consiste en la separación de las partículas de la arcilla debido a la neutralización de sus cargas eléctricas por la acción de los lignosulfonatos y de los lignitos. Las partículas pueden separarse individualmente o en grupos de 2 o 3 unidades por cara.

5.3.4 Agregación.

Es el fenómeno contrario a la dispersión, en donde las placas presentes en la bentonita, se encuentran aglomeradas, de esa manera se tendrán paquetes o grupos de paquetes que serán agregados (*García Hernández, 2014*).

5.4 Relación de las condiciones de equilibrio.

Las arcillas pueden presentarse en las formaciones que se están perforando, por lo que en algunos casos aparecen de forma natural y pueden aparecer en más de uno de los estados descritos, si contamos con un lodo de perforación dispersado-defloculado, agregado-floculado, agregado-defloculado o cuando se presenta un

sistema dispersado-defloculado, la bentonita se podrá agregar al agua, para posteriormente ser agitada, agregándosele la cantidad adecuada de dispersante; esta cantidad es suficiente para neutralizar las fuerzas de atracción presentes en las placas. Cuando se requiere añadir una sal que sea monovalente, como el cloruro de sodio, este puede ser agregado al sistema dispersado-defloculado, con lo que se tendrá un sistema dispersado-floculado dada la gran similitud que presentan los estados.

Por otra parte, si se tuviera un sistema dispersado-defloculado, se tendrá la denominada sal divalente, cuyo ejemplo más representativo es el yeso común y corriente, en donde las placas que se encuentran en la arcilla forman una gran variedad de paquetes débilmente unidos unos con otros, además de que pueden estar sincronizados con las placas que se encuentran cara a cara, borde a borde y borde cara; como consecuencia se tiene un sistema agregado-floculado. Para poder tener un mejor entendimiento de este sistema agregado-floculado, se debe de seguir un tratamiento, donde los cromolignosulfonatos juegan un papel de suma importancia, ya que su tarea principal es la de actuar como defloculantes. En el caso de que se agreguen los cromolignosulfonatos al sistema agregado-floculado, se origina una mayor resistencia a la sal; por otra parte, si se quiere tener un compuesto que pueda precipitar al ion divalente y contar con un dispersante; se tendría un sistema defloculado-dispersado (*McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011*).

5.5 Estados de la bentonita

Existen cuatro estados que permiten el uso eficiente de la bentonita en los lodos de perforación, que corresponden con: dispersado-defloculado, dispersado-floculado, agregado-floculado y agregado-defloculado, los que se explican a continuación:

5.5.1 Dispersado-defloculado.

En este sistema, existe una gran cantidad de partículas de arcilla, caracterizándose porque la mayoría son muy pequeñas, lo que les permite mezclarse con las fuerzas reactivas, por lo que las placas son neutralizadas parcialmente.

a) Viscosidad plástica.

Es un parámetro del modelo plástico de Bingham, en donde "PV" presión-volumen, es la pendiente de la línea de esfuerzo cortante/velocidad de acorte arriba del umbral de fluencia plástica. La PV representa la viscosidad de un lodo cuando se extrapola a una velocidad de corte infinita sobre la base de las matemáticas del modelo plástico de Bingham. Una PV baja indica que el lodo es capaz de perforar rápidamente debido a la baja viscosidad del lodo que sale de la barrena. Es el estado de la materia que tiene un nivel más alto que los demás estados que se presentan; Por lo que los lodos de perforación poseen un mejor desplazamiento y tienen una mejor movilidad en este estado.

En la **gráfica 5.3**, se muestra que la pendiente es igual a la viscosidad plástica y la intersección es igual al punto de cedencia de los valores del flujo plástico de Bingham.

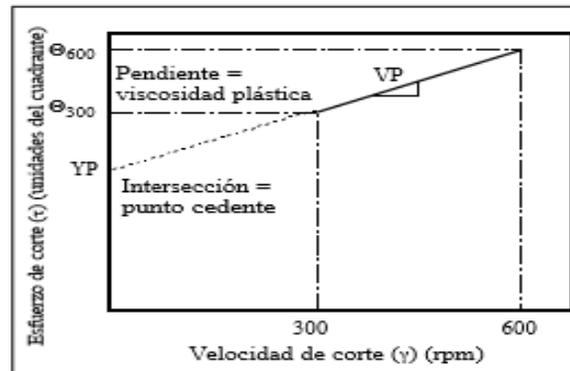


Figura 5.3 Valores del flujo plástico de Bingham. (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

b) Gelatinosidad.

La Gelatinosidad es una propiedad que adquieren algunos fluidos de perforación que se constituyen de una estructura de gel cuando se encuentran estáticos, regresando luego al estado del fluido cuando se le aplica un esfuerzo de corte; la mayoría de los lodos de perforación base agua presentan esta propiedad. En este estado, la gelatinosidad se caracteriza principalmente por presentar un estado bajo, pero progresivo, cuando se presenta la condición a cero minutos es baja, por otra parte, cuándo se tienen 10 minutos presenta un nivel alto.

c) Punto de cedencia.

El punto de cedencia se define como el esfuerzo mínimo de corte que debe aplicarse a un fluido para que comience a desplazarse. Sus unidades son: $\text{lb}/100 \text{ pies}^3$. Esta propiedad presenta un nivel bajo si se tiene demasiado dispersante en los lodos de perforación, por lo tanto, mientras más bajo se encuentre el punto de cedencia, los lodos de perforación presentarán menos esfuerzo al ser desplazados.

d) Filtrado.

El filtrado es el líquido que pasa a través del medio, dejando el revoque en el medio. Los lodos de perforación se estudian en el laboratorio y se hacen pruebas que permiten determinar la tasa de filtración y las propiedades del revoque de la filtración. Las propiedades del revoque son de suma importancia, porque el revoque se puede acumular en las zonas permeables del pozo, lo que puede provocar un atascamiento de la tubería y otros problemas durante la perforación. El filtrado en este sistema siempre será mínimo, dadas las condiciones prevalecientes de los 4 estados; no obstante, será el más bajo de los 4, todo esto se debe principalmente a que las partículas del filtrado son muy pequeñas. Cabe mencionar que la compactación presente entre las placas de las arcillas, es la más baja de los 4 estados; ya que, si se agrega más bentonita, la compactación se dispersará con

mayor facilidad y se tendrá un incremento en la gelatinosidad y la viscosidad (George R. Gray y Hch Darley, 1980).

5.5.2 Dispersado-floculado.

Cuando existe la adición de un ion monovalente, por ejemplo, el cloruro de sodio (NaCl), para el sistema dispersado-floculado; ocasiona que las placas sean atraídas en un determinado lapso de tiempo para constituir grupos, lo que origina un aumento en la compactación de la arcilla. En este sistema de hidratación dispersado-floculado, cuando se adiciona bentonita, se reduce visiblemente la sal que se encuentra en solución. La disminución que presenta la viscosidad, se debe principalmente al efecto que ejercen los iones de sodio, dado que los cloruros impiden que la hidratación aparezca, el efecto del aumento de la concentración de la sal tiende a generar una lechada en la bentonita que se encuentra previamente hidratada, la lechada tiende a tener una estabilización y una determinada concentración de sal. Se tendrá una viscosidad establecida, debido a los efectos de los iones de sodio y de los cloruros que se encuentran presentes y que han sido estabilizados; por otra parte, las partículas en las arcillas siguen una orientación establecida (Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

En la **figura 5.4**, del sistema dispersado defloculado y del sistema dispersado floculado, se muestra que tan bajo y que tan alto es el gel en el filtrado y en el enjarre, dado que se aglutinan las sustancias coloidales que se encuentran presentes en el agua.

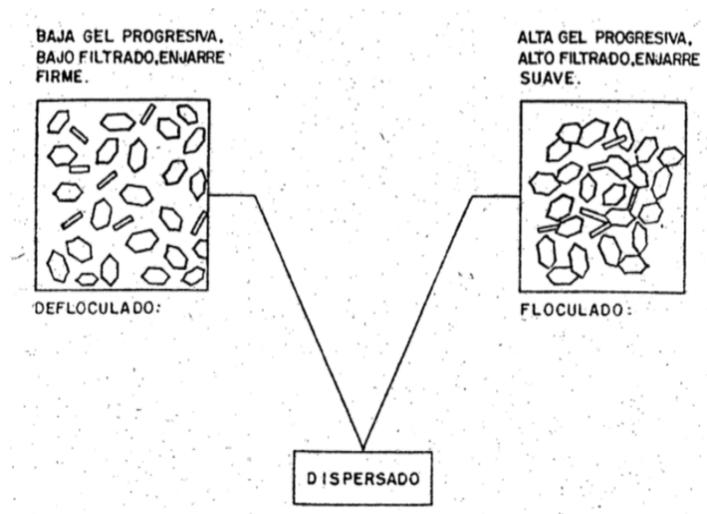


Figura 5.4 Sistema dispersado defloculado y floculado. (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

5.5.3 Agregado-floculado.

Este sistema es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales que se encuentran presentes en el agua; facilitando de esta manera su decantación y posterior filtrado. Cuando se tiene la adición de un ion divalente, generalmente yeso para este sistema, la adición de iones divalentes y polivalentes, tienden a causar paquetes de placas, que se agrupan cara con cara y borde con borde, o borde con cara; incrementándose la compactación que se presenta en la arcilla.

En la **figura 5.5**, se aprecia cómo las sustancias coloidales, en este caso los sólidos de perforación, se encuentran entrelazados unos con otros.

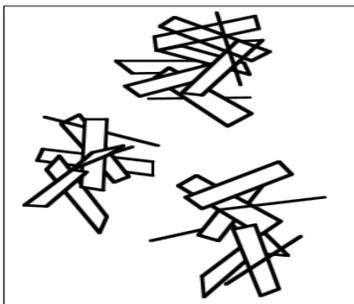


Figura 5.5 Floculación de los sólidos de perforación. (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

5.5.4 Agregado-defloculado.

Se tiene un lodo base agua con arcilla cuya viscosidad ha sido reducida por un tratamiento químico, en donde las sustancias químicas utilizadas en este sistema agregado-defloculado no son dispersantes. Los lodos de perforación después de haber sido defloculados exhiben mejores cualidades del revoque en el filtrado cuando se presenta este sistema y una menor resistencia de gel; la calidad del revoque de filtración se mejora porque cuando se defloculan las arcillas que se encuentran presentes las plaquetas se desprenden la una de la otra y pueden permanecer planas formando un revoque de filtración delgado y de baja permeabilidad. No siempre se puede reducir la resistencia al gel, esto puede ser ajustado con la cantidad de defloculante que se adiciona en cada tratamiento. Por último, se debe de tomar en cuenta que si la resistencia al gel es demasiado baja; la suspensión y la capacidad de corte del lodo se deterioran (McCray Arthur V. y Cole Frank, 2011).

En la **figura 5.6**, del sistema agregado defloculado, se aprecia como el filtrado es alto y el enjarre es suave. Por otra parte, en el sistema agregado floculado se muestra un proceso similar tanto en el filtrado como en el enjarre.

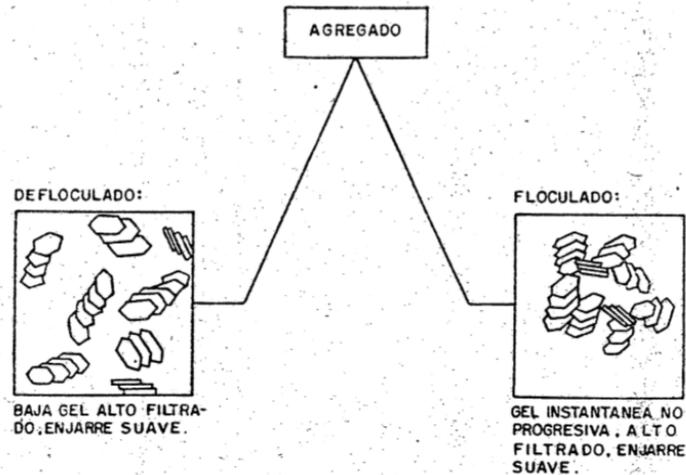


Figura 5.6 Sistema agregado defloculado y agregado floculado. (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petrirena y Reyes Álvarez, 1979).

5.6 La atapulgita como sustituto de la bentonita en los lodos de perforación.

La atapulgita es una arcilla, cuya aplicación principal es en los lodos de perforación; ya que funciona como un viscosificante con los lodos que tienen exceso de sal. Por otro lado ayuda a que la bentonita pueda hidratarse de una mejor forma, es conocida por ser un excelente viscosificante, pero no contribuye al control del filtrado. La atapulgita es utilizada principalmente en los lodos de perforación base agua para tener una viscosidad con baja velocidad de corte para la elevación de los recortes de perforación en el espacio anular, así como para la suspensión de la barita. La atapulgita no capta el agua intersticial como lo hace la bentonita; por lo tanto, no se hidrata de la misma manera, también puede ser utilizada como un aditivo en los lodos de perforación base aceite, en donde esta arcilla se recubre con una amina cuaternaria que no son más que sales de cationes de amonio; lo que permite que se pueda dispersar en el petróleo y que proporcione una estructura de gel. Según indicadores de la API la atapulgita rinde por lo menos 100 bbl/ton en agua saturada de sal, donde la humedad no debe exceder el 16% y no debe quedar retenida más de 8% en un análisis de granulometría. (F.H.Hatch, 1912).

CUESTIONARIO #4

1.) Describa brevemente lo que es la bentonita.

La bentonita es una roca de origen ígneo, compuesta por más de un tipo de minerales, aunque es la esmectita su constituyente principal; es la que le proporciona sus propiedades y características. Su definición data del año de 1988, año en que fueron descubiertas y clasificadas como tales en Fort-

Benton, en el estado de Wyoming, USA. La propiedad principal que presentó fue la de hincharse al entrar en contacto con el agua, proporcionando una masa voluminosa y una alta gelatinosidad. Las bentonitas también son llamadas “arcillas activadas”, debido a su gran afinidad en ciertas reacciones químicas asignadas por su excesiva carga negativa.

2.) Explique el mecanismo en superficie de las arcillas.

Corresponde a la hidratación que se presenta cuando la montmorillonita entra en contacto inicialmente con el agua, ya que este fluido penetra en todas las unidades de las capas que se presentan como conjunto, posteriormente ocurre una adsorción en las partes superiores e inferiores de todas las capas estructurales que se tienen en la unidad. Este proceso de hidratación se controla por el volumen de arcilla y por el tipo de cationes existentes; tomando en cuenta el aporte de sólidos que se tengan sobre todo en las lutitas hidratables que se están perforando, y que se encuentran contenidas en las arcillas.

3.) Explique brevemente el mecanismo de retención de la humedad.

El mecanismo denominado retención de la humedad se origina principalmente por el fenómeno conocido como “la rotura por unión de agua”, donde el agua se va absorbiendo por los bordes y las esquinas de los cristales que forman a las arcillas, lo que ocasiona que se vayan distribuyendo progresivamente las cargas de los iones que no se encuentran saturados. Este proceso se lleva a cabo en el lapso en que las partículas de arcilla se rompen, dando como resultado que las fuerzas de corte, que favorecen que el agua entre en contacto, ya que se va introduciendo por todos los espacios interestructurales. La bentonita al permanecer en estado de reposo presenta una hidratación mucho mayor de lo normal; además de presentar una viscosidad mayor.

4.) Explique también el mecanismo de hidratación en la estructura tetraedral en las arcillas.

Se presenta generalmente en la superficie de las capas de la estructura tetraedral que se presenta en el sílice. El proceso se lleva a cabo cuando se tiene suficiente agua entre las hojas cristalinas, ya que el agua se introduce muy rápidamente, además de que existe un intercambio de cationes que tienen como objetivo la separación de la superficie del sílice. En el proceso ocurre la separación de la carga equivalente de los cationes presentes, ya que existe una fuerza que se ejerce en la superficie del sílice.

5.) ¿Cuáles son los 4 mecanismos principales de equilibrio entre la bentonita y el agua?

- 1) Dispersión
- 2) Floculación
- 3) Defloculación
- 4) Agregación

CONCLUSIONES:

¿Qué es un lodo de perforación?

Los lodos de perforación se definen como la suspensión acuosa de una arcilla que se considera especial, en este caso la bentonita; este lodo de perforación es colocado en las paredes del pozo y sirve para evitar o reducir los derrumbes del terreno. Es de vital importancia controlar algunas características del lodo durante su utilización. También se definen como una serie de fluidos líquidos, gaseosos y mezclas de fluidos y sólidos en forma de suspensiones de sólidos, mezclas y emulsiones (sólidos, líquidos y gases, que son utilizados en operaciones de perforación de pozos petroleros.

Los lodos de perforación se dividen en 3 grandes grupos generales (neumáticos, base agua y base aceite), que son los más utilizados en la industria petrolera, siendo los lodos base agua y los lodos base aceite los que se emplean mayoritariamente a la hora de perforar los pozos petroleros; los lodos neumáticos tienen una gran relevancia, pero son utilizados en menor proporción.

Los lodos base agua, son lodos de perforación en donde el agua dulce o el agua salada son la fase líquida principal; además de la presencia de la fase mojante o externa. Las categorías generales de los lodos base agua son: agua dulce, agua de mar, cal, potasio y el silicato. Los componentes principales de estos lodos son el agua, la barita y la bentonita.

Los lodos base aceite son aquellos cuya fase continua o externa corresponde a petróleo crudo o sustancias relacionadas a este. Sus propiedades se encuentran influenciadas por la relación aceite/agua, el tipo de emulsificador, la concentración y el contenido de los sólidos. Estos lodos constituyen una emulsión de agua en aceite, es decir, una emulsión inversa donde la fase dispersa es el agua y la fase continua al igual que el filtrado es el aceite. Los lodos base aceite se dividen en 2, los lodos de aceite que tienen menos del 5% de agua y la emulsión inversa.

Los lodos neumáticos son aquellos que son utilizados en situaciones donde la perforación con fluidos líquidos no es adecuada. Estos lodos corresponden a aire, espumas, lodos aereados; se utilizan principalmente para perforar formaciones muy porosas o formaciones subnormalmente presurizadas. Los lodos neumáticos se dividen en aire seco, niebla, espumas y lodos aereados.

El presente trabajo tiene la finalidad de ser un apoyo como material didáctico de consulta para la población estudiantil de las carreras de Ciencias de la Tierra y áreas afines del tema: "La Química de los lodos de perforación de pozos petroleros con ejemplos aplicaciones en Ciencias de la Tierra". Cabe destacar que este material didáctico podrá ser consultado de forma impresa y de manera digital por todos los alumnos y público en general que se encuentre interesado por el tema.

RECOMENDACIONES:

Se recomienda el uso de este material didáctico tanto para estudiantes de las carreras de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, como para los profesores que

imparten la asignatura de Química; con esto se puede lograr un mayor interés en el estudio de la Química, donde es necesaria la comprensión y la aplicación del tema planteado y motivar al alumnado a que se interesen por esta asignatura dada su gran importancia en el ámbito ingenieril y reducir el índice de reprobación que se tiene actualmente de esta asignatura en la División de Ciencias Básicas. Por último se debe de contar con temas que ayuden a la innovación de un material didáctico que genere un interés mucho mayor, proponer un tema de lodos de perforación biodegradables que son lo último en la vanguardia en la industria petrolera, así como temas que sean nuevos y que al estudiante lo motiven al contar con material de consulta que sea interesante, pero sobre todo que sea algo novedoso.

BIBLIOGRAFÍA:

Allen O. T., Roberts A. P. (1979). "*Production operations*". USA, Norman OGCI, 2 vols.

Beggs H. D. (1984). "*Gas production operations*". Tulsa, USA: OGCI.

Beggs H. D (2000). "*Production Optimization, Using NODAL Analysis*". USA: OGCI Publications, Tulsa, Third printing.

Benítez H. M. A., Garaicochea P. F. y Reyes A. C. (1979). "*Apuntes de Fluidos de Perforación*". México D.F. Unidad de difusión de la Facultad de Ingeniería, UNAM (1ª.ed.).

Benítez H. M. A., Garaicochea P. F. (1985). "*Apuntes de terminación de pozos*". México: Facultad de Ingeniería, UNAM.

Bourgoyne T. A. et al. (1991). "*Applied Drilling Engineering*". Louisiana, USA: Richardson Tx. Society of Petroleum Engineers.

Cornelis K. and Cornelius S. H. (1997). "*Manual de mineralogía*". USA: reverté, cuarta edición.

García H. Y. (2014). "*Aplicación de los Fluidos de Control en Perforación de Pozos Petroleros*". Veracruz, México.

Graft. Et al. (1992). "*Well Design, Drilling and Production*". USA: Prentice Hall inc.

Henry .F. H. (1912). "*Mineralogy*". USA: whittaker, Cuarta Edición.

<https://www.google.com.mx/url?> (2016).

ISLAS S.C. (1991). "*Manual de Estimulación Matricial de Pozos*". México: Colegio de Ingenieros Petroleros de México A. C.

León L. J. G. (1993). "*Optimización de la perforación, factores que afectan la velocidad de perforación*". México: Colegio de Ingenieros Petroleros de México A.C.

McCray W. A. y Cole F. W. (2011). "*Tecnología de la Perforación de Pozos Petroleros*". USA: Tercera Edición.

Petr K. y Milan N., (2002). "*The complete encyclopedia of minerals*". USA: chartwell books.

R. Gray George y HCH Darley. (1980). "*Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids*". USA: Gulf publishing, fourth edition.

Glosario.

Densidad del lodo. Es la densidad que tiene por objetivo ayudar al mantenimiento de los fluidos que se encuentran en el yacimiento durante el proceso de la perforación.

Presión hidrostática.

Es la presión ejercida por una columna de fluido, a una profundidad vertical dada, que actúa en todas direcciones. La expresión matemática que se tiene de esta ecuación se encuentra denotada como: La presión hidrostática es igual al gradiente de presión por la profundidad vertical desde un punto, esta condición también modifica la densidad de los lodos de perforación.

Viscosidad plástica. Es la oposición de los fluidos que se encuentran en movimiento y que es causada principalmente por la fricción mecánica. Las unidades con la que se calcula la viscosidad plástica se encuentran en centipoise (cp). La fricción es producto del volumen de los sólidos que se encuentran contenidos en los lodos de perforación y de la cantidad de líquido que se encuentra presente y que rodea a los lodos, más el esfuerzo cortante que se encuentra contenido en el propio líquido.

Filtrado API. También se le denomina pérdida de agua. Es la cantidad de agua que proviene del lodo que se filtra hacia las formaciones permeables y que debe mantenerse lo más bajo posible para poder tener una buena estabilidad en el agujero para evitar daños a la formación, se conocen básicamente 2 tipos de filtración: la filtración estática y la filtración dinámica; la primera ocurre cuando el lodo no se encuentra en movimiento, mientras que la filtración dinámica ocurre cuando el lodo de perforación fluye a lo largo de la superficie filtrante.

Resistencia o fuerza de gel. Es una medida de la atracción física y electroquímica bajo ciertas condiciones estáticas. Las mediciones más comunes de esta propiedad se pueden calcular en un lapso que va de los 10 segundos hasta los 10 minutos; y se pueden tomar en cualquier intervalo de tiempo.

Punto de cedencia. Es una medida de las fuerzas de atracción entre las partículas bajo ciertas condiciones dinámicas de flujo; es la fuerza que ayuda a mantener el fluido que se encuentra en movimiento. Las unidades del punto de cedencia son libras/100 pies cuadrados (lb/100 ft²).

Viscosidad API. Es una medida de oposición interna que presentan los fluidos al desplazarse en forma directa a la presión y temperatura del yacimiento.

lbm/gal o ppg.

Adjunto 1: Material didáctico para los capítulos 1 y 2 Los lodos de perforación de pozos petroleros e Importancia y funciones de los lodos de perforación.



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

MATERIAL DIDÁCTICO

"LA QUÍMICA DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN EJEMPLOS Y APLICACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA"

Elaboró: Raúl Rubí Villegas
Asesor: Ing. Javier Arellano Gil

**CAPÍTULOS 1 y 2 LOS LODOS
DE PERFORACIÓN DE POZOS
PETROLEROS E IMPORTANCIA Y
FUNCIONES DE LOS LODOS DE
PERFORACIÓN.**

1.5 Planteamiento del problema.

El presente trabajo pretende responder, y aportar información a la comunidad universitaria, en este caso a los alumnos de Ciencias de la Tierra, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, sobre las características, propiedades y la química de los lodos de perforación.

1.7 Metodología

- a. Búsqueda de la información.
- b. Análisis de la información.
- c. Síntesis de la información.
- d. Elaboración de textos.
- e. Elaboración de figuras.
- f. Elaboración de ejercicios y cuestionarios.
- g. Aplicaciones prácticas.
- h. Redacción de textos claros, concisos y completos.

2.1 Importancia y utilidad de los lodos de perforación.

La importancia y la utilidad de los lodos de perforación radican en el hecho de que siempre se utilizan cuando se perforan pozos petroleros, tanto de exploración como de desarrollo. A continuación se describen los más importantes:

a) Obtener los recortes de la formación a la superficie.

Al perforarse un pozo, se producen recortes en la formación cuya cantidad, tamaño, y características están de acuerdo con el tipo de roca, el tipo de barrena, velocidad de penetración etc.

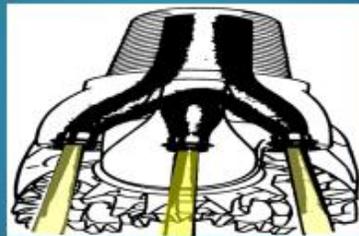


Figura 2.2 Recortes de la formación (Tomada de García Hernández, 2014).

b) Controlar las presiones de la formación.

Toda formación en el subsuelo tiene una determinada presión en sus poros, a la que se denomina "presión de poro o presión de formación", esta presión puede ser normal si su gradiente se encuentra en el rango de 0.433 a 0.465 psi/ft (agua pura, agua salada de 1.07 g cc); todo valor por arriba de estos valores se denominan presiones anormales y todo valor por debajo se le denomina presión sub-normal.

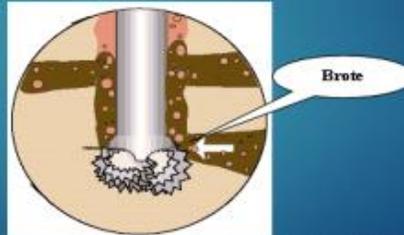


Figura 2.3 Control de las presiones en la formación (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

c) No dañar las zonas productoras.

El daño generado puede ser causado por la excesiva cantidad de sólidos, por la incompatibilidad química del lodo con la formación productora, y por la presión a la que se inyecta el fluido.

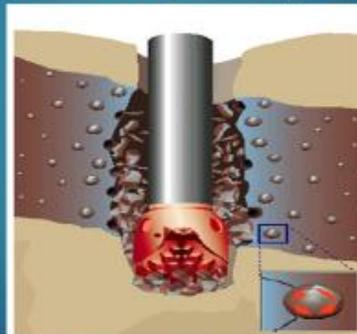


Figura 2.4 (Tomada de García Hernández, 2014)

d) Estabilizar las paredes de la formación.

Las formaciones que se atraviesan, varían en litología y en sus características físico-químicas, según sea la profundidad en que se encuentre, como también de su posición estratigráfica.

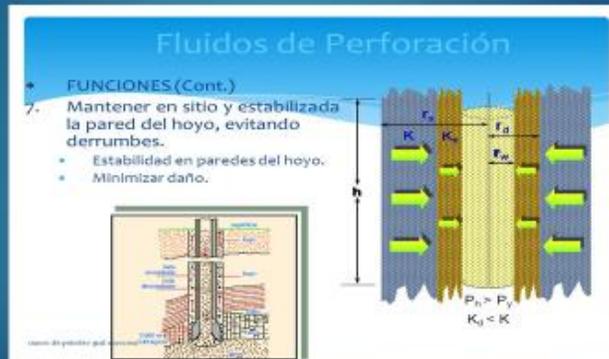


Figura 2.5 Estabilidad de las paredes de la formación (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2016).

e) Obtener información del fondo del pozo.

El lodo que se utiliza al perforar un pozo, proporciona información del fondo del mismo, como la presencia de fluidos, de presiones anormales, que al Ingeniero encargado del manejo le es de gran utilidad.

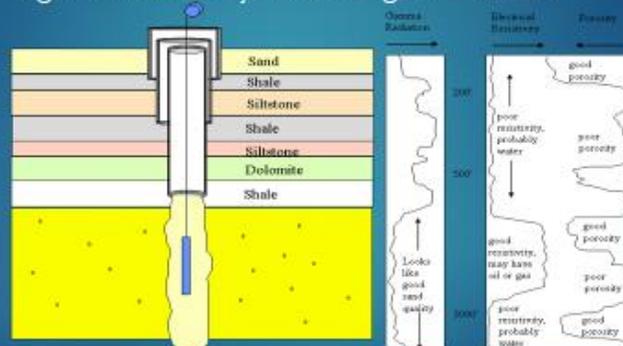


Figura 2.4 Registro eléctrico (Tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

f) No dañar el medio ambiente.

Durante la perforación de un pozo petrolero se deben tomar medidas de protección del medio ambiente, por lo que se deben utilizar lodos de perforación que sean amigables con el medio ambiente.



Figura 2.7 Daño al medio ambiente (Tomada de www.google.com.mx/uf7, 2014).

g) Buen funcionamiento de la sarta de perforación.

Los aditivos que usualmente se utilizan en la perforación de pozos son polímeros, los cuales deben de cumplir con funciones específicas; que proporcionan a los lodos de perforación características tales como la lubricidad que minimiza las fricciones que se tienen con las herramientas de perforación cuando se encuentra en la formación.

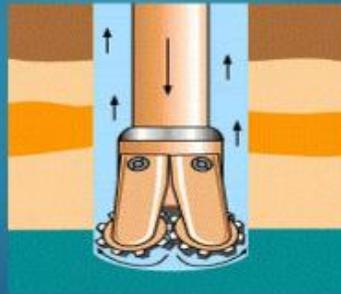


Figura 2.8 Sarta de perforación (Tomada de www.google.com.mx/uf7, 2014).

Densidad.

Una de las características principales de los lodos de perforación es la densidad, que tiene por objetivo mantener bajo control a los fluidos que se encuentran en el yacimiento durante el proceso de la perforación.



Figura 2.9 Balanza de lodos (Tomada de www.google.com.mx/uf7, 2014).

Viscosidad API.

Es una medida de oposición interna que presentan los fluidos al desplazarse en forma directa a la presión y temperatura del yacimiento.

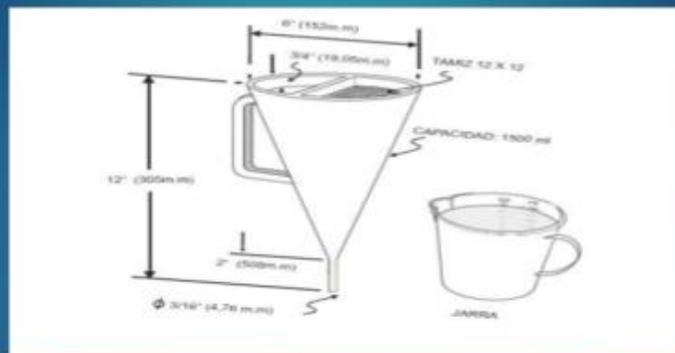


Figura 2.10 Viscosidad API (Tomada de www.google.com.mx/uf7, 2014).

Viscosidad plástica.

Es la oposición de los fluidos que se encuentran en movimiento y que es causada principalmente por la fricción mecánica. Las unidades con la que se calcula la viscosidad plástica se encuentran en centipoise (cp).

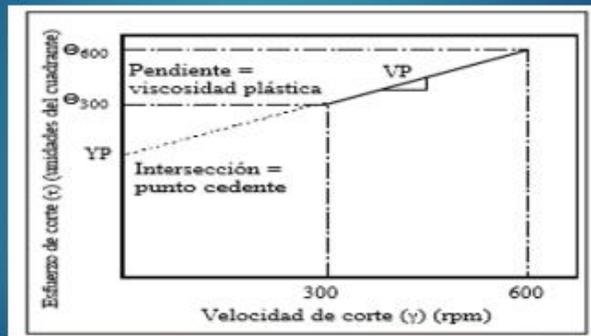


Figura 2.11 Viscosidad plástica (tomada del Instituto Americano del Petróleo, 2013).

Punto de cedencia.

Es una medida de las fuerzas de atracción entre las partículas bajo ciertas condiciones dinámicas de flujo; es la fuerza que ayuda a mantener el fluido que se encuentra en movimiento.

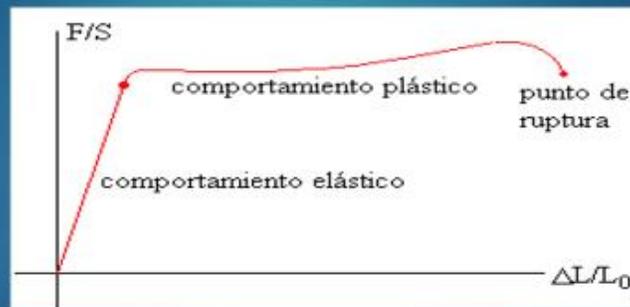


Figura 2.12 Punto de cedencia (tomada de www.google.com.mx/uf7, 2014).

Resistencia o fuerza de gel.

La resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo ciertas condiciones estáticas. Las mediciones más comunes de esta propiedad se pueden calcular en un lapso que va de los 10 segundos hasta los 10 minutos; y se pueden tomar en cualquier intervalo de tiempo.



Figura 2.13 Resistencia o fuerza de gel (Tomada de www.google.com.mx/url?2014).

Filtrado API.

También se le denomina pérdida de agua. Es la cantidad de agua que proviene del lodo que se filtra hacia las formaciones permeables y que debe mantenerse lo más bajo posible para poder tener una buena estabilidad en el agujero para evitar daños a la formación.



Figura 2.14 Prensa con filtro API (Tomada de www.google.com.mx/url?2014).

Densidad de lodo.

Esta propiedad, generalmente se encuentra expresada en términos de la masa por la unidad de volumen. Adicionalmente se desea que el lodo de perforación tenga una densidad tan baja como la que presenta el agua; para que se puedan obtener excelentes velocidades de penetración y poder disminuir las pérdidas de circulación.

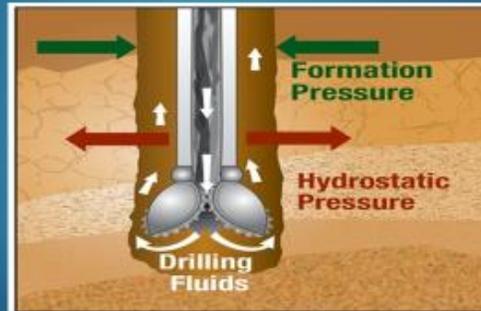


Figura 2.15 Densidad de lodo (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Presión hidrostática.

La presión hidrostática puede ser definida como la presión ejercida por una columna de fluido, a una profundidad vertical dada, que actúa en todas direcciones.

$$P = \rho gh + P_0$$

Adjunto 2 Material didáctico para los capítulos 3 y 4 Tipos de lodos de perforación y la Química de los lodos de perforación.

CAPÍTULOS 3 y 4 TIPOS DE LODOS DE PERFORACIÓN Y LA QUÍMICA DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN

Neumáticos.

Son aquellos lodos que son utilizados en situaciones donde la perforación con fluidos líquidos no es adecuada. Estos lodos corresponden a aire, espumas, lodos aerados etc.

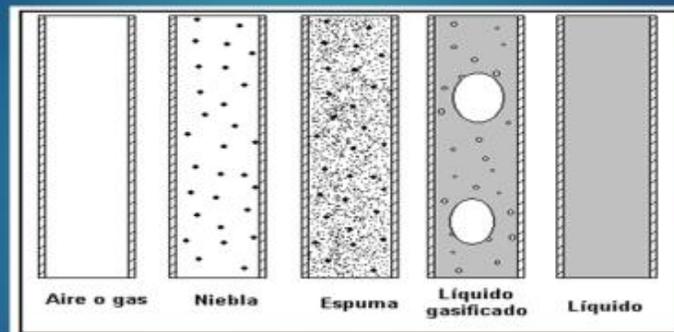


Figura 3.1 (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petireno y Reyes Álvarez, 1979).

Lodos base agua.

Los lodos base agua, son lodos de perforación en donde el agua dulce o el agua salada son la fase líquida principal; además de la presencia de la fase mojante o externa.

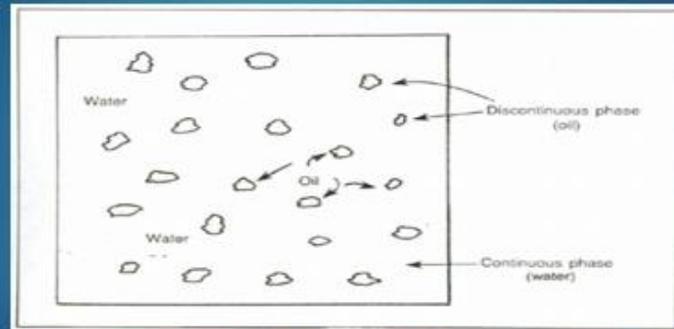


Figura 3.3 (Tomada de Benítez Hernández, Garaicochea Petróleo y Reyes Álvarez, 1979).

Lodos base aceite.

Son aquellos lodos cuya fase continua o externa corresponde a petróleo crudo o minerales de este. Sus propiedades se encuentran influenciadas por la relación aceite/agua, el tipo de emulsificador, la concentración y el contenido de los sólidos.

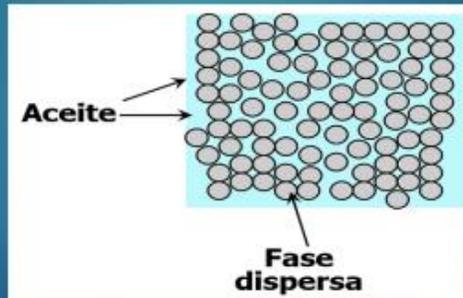


Figura 3.4 (Tomada de García Hernández, 2014).

Fase continua de los lodos.

La fase continua presente de un lodo de perforación base agua, es siempre agua, considerando que las sales disueltas en el agua son parte también de la fase continua, estos son principalmente los cationes Na^+ (sodio) y Ca^{++} (calcio) y el anión OH^- (oxidrilo); son de suma importancia en el comportamiento de los lodos base agua.

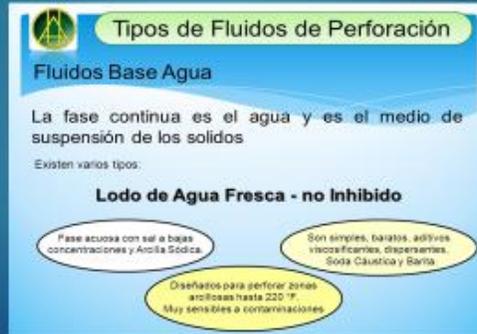


Figura 4.1 Fase continua de los lodos (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2016).

Fase discontinua de los lodos.

En la fase discontinua de los lodos de perforación, los glóbulos de petróleo que se encuentran emulsionados en un lodo base agua, tienden a viscosificar al lodo y a reducir su densidad.



Figura 4.2 Fase discontinua de los lodos (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2016).

Fase sólida de los lodos.

Los sólidos juegan un papel muy importante en la condición, mantenimiento y densidad de los lodos, ya que, se les asigna una fase aparte, aun cuando todas las partículas sólidas que hay en un lodo pertenecen a su fase discontinua.



Figura 4.3 Fase sólida de los lodos (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Arcillas.

son sedimentos finos que se encuentran dispersos y compuestos por una gran variedad de partículas de minerales laminares formados principalmente por silicatos aluminicos hidratados y que en general presentan impurezas de otros minerales acompañantes, cuyo tamaño de partícula es menor a 0.00390 mm.



Figura 4.4 Arcillas (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Agentes densificantes.

Los llamados materiales densificantes, son materiales sólidos de alta densidad que cuando se encuentran finamente divididos son utilizados para aumentar la densidad de los lodos de perforación. El agente densificante más importante en los lodos de perforación es la barita, y en segundo lugar se emplean sales solubles.



Figura 4.5 Barita (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Aditivos sólidos misceláneos.

Los aditivos son productos químicos que se agregan a las mezclas, los cuales son utilizados tanto en estado sólido o líquido, aunque los líquidos se dispersan más rápidamente que los sólidos.



Figura 4.4 Asbesto (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Interacción química.

La introducción de las sustancias químicas que son agregadas a los lodos de perforación pueden afectar considerablemente las propiedades de los mismos; algunas de estas sustancias químicas se adicionan en la superficie, y otras penetran en los lodos a partir de las formaciones que se han perforado.



Figura 4.7 Interacción química (Tomada de www.google.com.mx/uf?, 2014).

Pirofosfato de sodio ácido (SAPP).

Estos reactivos son los que se utilizan como reductores de la viscosidad, tienen características muy particulares, ya que su peso molecular es de 221.97 y presentan una densidad de 1.87 gr/cm^3 , todo esto en soluciones que se encuentren previamente diluidas.



Figura 4.8 Pirofosfato de sodio ácido (Tomada de www.google.com.mx/uf?, 2014).

Cal.

Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas y dolomías. La fórmula química de la cal es $(Ca(OH)_2)$ y tiende a ejercer el mismo efecto que el cemento cuando se añade en los lodos de perforación.



Figura 4.9 Cal (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Sal de roca (cloruros).

La sal de roca o halita, es un tipo de sal denominada cloruro sódico o cloruro de sodio ($NaCl$), la mayoría de las veces puede penetrar en los lodos de perforación por diversas fuentes; se puede ionizar dando Na^+ y Cl^- en la fase continua, a menos que se haya sobrepasado el punto de saturación.



Figura 4.10 Sal de roca (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Medida de la dureza total.

La medida de la dureza total, más las concentraciones que existen de (Ca^{++}) y del (Mg^{++}) pueden ser obtenidas de distintas maneras, siendo los más comunes los siguientes: se debe de tener de forma separada la concentración de Ca^{++} y Mg^{++} , esta concentración se puede determinar por el método de titulación (análisis volumétrico); otra forma es por el denominado método "calgamite", que es una solución que comúnmente se diluye con agua destilada.



Figura 4.11 Medidor de la dureza total (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Gases solubles.

Los gases que se encuentran presentes en las formaciones productoras, afectan las propiedades químicas de los lodos, en caso de que penetren en ellas. Si los gases se disuelven en la fase continua, los efectos químicos pueden también ser de importancia.



Figura 4.12 Gases solubles (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

pH y control de la alcalinidad.

La determinación y mantenimiento de los valores correctos del pH tienen mayor importancia hoy en día que en años pasados, en cuanto a la formulación de los lodos de perforación. Dicho mantenimiento de los valores del pH genera un impacto directo sobre las propiedades de los lodos de perforación.

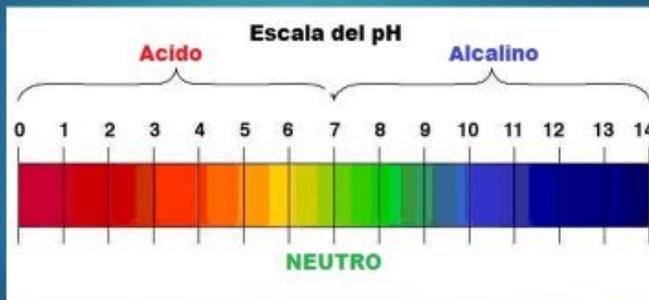


Figura 4.13 pH y control de la alcalinidad (Tomada de www.google.com.mx/ur/7, 2016).

Alcalinidad.

La alcalinidad de una solución se define como la concentración que presentan los iones solubles en agua y que neutralizan a los ácidos. En otras palabras cualquier ion que proporciona un protón a al lodo $\{H^+\}$ actuará como un ácido.

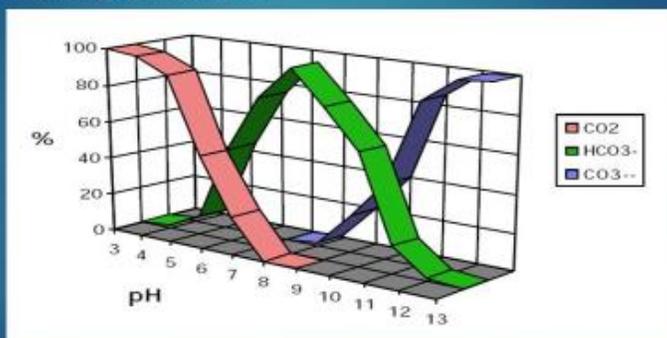


Figura 4.14 Alcalinidad (Tomada de www.google.com.mx/ur/7, 2016).

Adjunto 3. Material didáctico para el capítulo Importancia de la bentonita en los fluidos de perforación y las conclusiones.

CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LA BENTONITA EN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y CONCLUSIONES

Bentonita

La bentonita es una roca de origen ígneo, compuesta por más de un tipo de minerales, aunque es la esmectita su constituyente principal; es la que le proporciona sus propiedades y características.

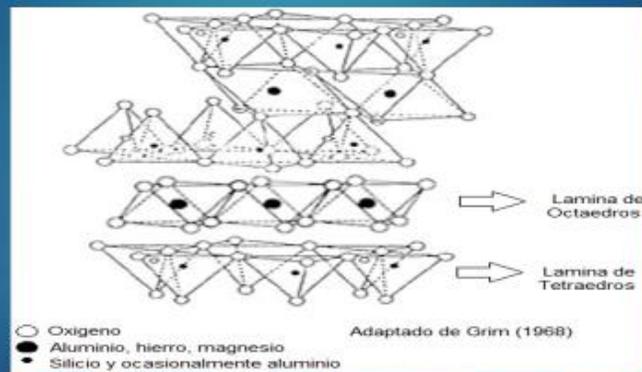


Figura 5.1 Estructura de la montmorillonita. (Tomada de [www.google.com.mx/url?2016](http://www.google.com.mx/url?url=2016)).

Mecanismos de hidratación de la bentonita.

Existen tres mecanismos de hidratación de la bentonita.

El primero ocurre en la superficie y es de tipo residual.

El segundo es el de la retención de la humedad.

El tercer mecanismo es la hidratación de la superficie de las capas de la estructura tetraedral del sílice, que a continuación se describe.

Mecanismo en superficie.

Este mecanismo corresponde a la hidratación que se presenta cuando la montmorillonita entra en contacto inicialmente con el agua, ya que este fluido penetra en todas las unidades de las capas que se presentan como conjunto.

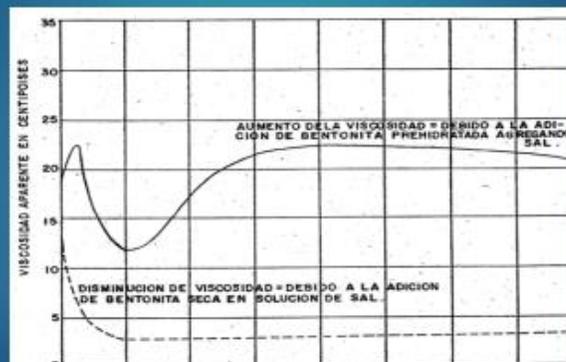


Figura 5.2 Mecanismo en superficie [Tomada de Benítez Hernández, Garicochea Peltreña y Reyes Álvarez, 1977].

Mecanismo de retención de la humedad.

El mecanismo denominado retención de la humedad se origina principalmente por el fenómeno conocido como "la rotura por unión de agua", donde el agua se va absorbiendo por los bordes y las esquinas de los cristales que forman a las arcillas, lo que ocasiona que se vayan distribuyendo progresivamente las cargas de los iones que no se encuentran saturados.

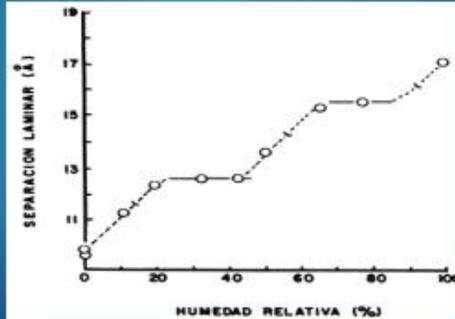


Figura 5.3 Mecanismo de retención de la humedad (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

Mecanismo en la estructura tetraedral

Este mecanismo se presenta generalmente en la superficie de las capas de la estructura tetraedral que se presenta en el sílice.



Figura 5.4 Mecanismo de la estructura tetraedral (Tomada de www.google.com.mx/url?, 2014).

CONCLUSIONES.

¿Qué es un lodo de perforación?

Los lodos de perforación se definen como la suspensión acuosa de una arcilla que se considera especial, en este caso la bentonita; este lodo de perforación es colocado en las paredes del pozo y sirve para evitar o reducir los derrumbes del terreno. Es de vital importancia controlar algunas características del lodo durante su utilización. También se definen como una serie de fluidos líquidos, gaseosos y mezclas de fluidos y sólidos en forma de suspensiones de sólidos, mezclas y emulsiones (sólidos, líquidos y gases, que son utilizados en operaciones de perforación de pozos petroleros.

Los lodos de perforación se dividen en 3 grandes grupos generales (neumáticos, base agua y base aceite), que son los más utilizados en la industria petrolera, siendo los lodos base agua y los lodos base aceite los que se emplean mayoritariamente a la hora de perforar los pozos petroleros; los lodos neumáticos tienen una gran relevancia, pero son utilizados en menor proporción.

El presente trabajo tiene la finalidad de ser un apoyo como material didáctico de consulta para la población estudiantil de las carreras de Ciencias de la Tierra y áreas afines del tema: "La Química de los lodos de perforación de pozos petroleros con ejemplos aplicaciones en Ciencias de la Tierra".

Cabe destacar que este material didáctico podrá ser consultado de forma impresa y de manera digital por todos los alumnos y público en general que se encuentre interesado por el tema.

Se recomienda el uso de este material didáctico tanto para estudiantes de las carreras de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, como para los profesores que imparten la asignatura de Química; con esto se puede lograr un mayor interés en el estudio de la Química, donde es necesaria la comprensión y la aplicación del tema planteado y motivar al alumnado a que se interesen por esta asignatura dada su gran importancia en el ámbito ingenieril y reducir el índice de reprobación que se tiene actualmente de esta asignatura en la División de Ciencias Básicas.

¡GRACIAS!

