

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ANÁLISIS DE LA INHIBICIÓN DE LAS ARCILLAS REACTIVAS Y LUTITAS INESTABLES DE LAS FORMACIONES ORTEGUAZA, TIYUYACU, TENA Y NAPO (SHALE) CON FLUIDOS BASE AMINA EN UN CAMPO DEL ORIENTE ECUATORIANO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
PETRÓLEOS**

PEDRO ALEJANDRO ORBE SABAY

peter_alejo@hotmail.com

DIRECTOR: ING. RAÚL VALENCIA, Msc.

raul.valencia@epn.edu.ec

Quito, Junio 2009

DECLARACIÓN

Yo, Pedro Alejandro Orbe Sabay declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

PEDRO ALEJANDRO ORBE
SABAY

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Pedro Alejandro Orbe Sabay, bajo mi supervisión.

Ing. RAÚL VALENCIA, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

A Dios, mi primer guía, amigo, tutor que me acompañó y me sigue acompañando en al pasar de mi vida.

A mis padres Pedro y Magdalena, mi ejemplo, mi alegría, mi fortaleza, la razón de mi existir, “Dios les pague de todo corazón por su amor y ejemplo que me han dado en este hermoso camino, la vida”.

A mis hermanas Leticia, Lorena, a mis sobrinos María Victoria y Andrés Alejandro gracias por ser mis amigos y compañeros, por estar siempre en las buenas y malas, por darme la alegría de cada día, Dios les pague.

A Stephanie Elizabeth por brindarme su amor y comprensión, por ser una de mis bases en todo momento de mi vida, a cada instante, Dios te pague mi cielo.

Pedro

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización del presente proyecto de titulación.

No tengo palabras para expresar la gratitud que siento por el Ingeniero Francisco Carrión por su inestimable ayuda.

Al Ingeniero Raúl Valencia, por su guía y apoyo incondicional en el desarrollo de mi tesis y en la enseñanza como mi maestro.

A los ingenieros Mario Colmenares y Pablo Murillo por abrirme las puertas de M-I SWACO.

Al todo el equipo de trabajo de M-I SWACO por haberme brindado todas las facilidades para desarrollar el presente estudio y por su comprensión humana.

Al todo el personal Docente y Administrativo de la Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional.

Y a todos mis panas (Club Socio Deportivo Cultural “Judas”) que siempre estuvieron ahí compartiendo momentos alegres, tristes tanto dentro como fuera de las aulas.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
CONTENIDO.....	XI
RESUMEN.....	XV
PRESENTACIÓN.....	XVII

CAPITULO 1

DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y LITOLÓGICA DEL CAMPO MAG	1
1.1 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA.....	1
1.1.1 FORMACIÓN ORTEGUAZA.....	1
1.1.1.1 Lutita Orteguaza	2
1.1.1.2 Arenisca Orteguaza.....	2
1.1.2 FORMACIÓN TIYUYACU.....	2
1.1.2.1 Conglomerado Superior Tiyuyacu	3
1.1.2.2 Conglomerado Inferior Tiyuyacu	3
1.1.3 FORMACIÓN TENA	4
1.1.3.1 Arenisca Basal Tena.....	4
1.1.4 FORMACIÓN NAPO	5
1.1.4.1 Lutita Superior Napo.....	5
1.2 DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	7
1.2.1 FORMACIÓN ORTEGUAZA	7
1.2.2 FORMACIÓN TIYUYACU.....	7

1.2.3 FORMACIÓN TENA	8
1.2.3.1 Tena Superior	8
1.3.2.2 Tena Inferior	8
1.2.4 FORMACIÓN NAPO	8
1.2.4.1 Napo Superior	8
CAPITULO 2	
QUÍMICA DE ARCILLAS Y COMPORTAMIENTO DE LAS AMINAS EN LA INHIBICIÓN	10
2.1 QUÍMICA DE ARCILLAS	10
2.1.1 ESTRUCTURA DE LOS FILOSILICATOS	11
2.1.2 PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS	13
2.1.2.1 Superficie específica	15
2.1.2.2 Capacidad de Intercambio Catiónico	15
2.1.2.3 Capacidad de adsorción	18
2.1.2.4 Hidratación e Hinchamiento	18
2.1.2.5 Plasticidad	19
2.1.2.6 Tixotropía	19
2.1.3 TIPOS DE ARCILLAS.....	20
2.1.3.1 Arcillas Montmorilloníticas (Arcillas De Tres Capas).....	24
2.1.3.2 Illitas (Arcillas De Tres Capas)	25
2.1.3.3 Cloritas (Arcillas de tres Capas)	25
2.1.3.4 Kaolinitas (Arcillas De Dos Capas).....	27
2.1.4 COMPOSICIÓN DE LOS LODOS BASE AGUA-ARCILLA.....	28
2.1.5 HIDRATACIÓN DE LAS ARCILLAS.....	29
2.1.6 INFLUENCIA CATIÓNICA SOBRE LA HIDRATACIÓN.....	32
2.1.7 PROCESOS DE ENLACE DE LAS PARTÍCULAS DE ARCILLA.....	33
2.1.8 EFECTO DEL pH.....	36
2.2 PROBLEMAS CON LUTITAS INESTABLES	36
2.2.1 EROSIÓN DEBIDO A ALTAS VELOCIDADES ANULARES.	37
2.2.2 INVASIÓN DE FILTRADO HACIA LA FORMACIÓN Y REACCIÓN DESFAVORABLE DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN CON LAS FORMACIONES INESTABLES.	37
2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS AMINAS EN LA INHIBICIÓN.....	41
2.3.1 PHPA – POLIACRILAMIDAS PARCIALMENTE HIDROLIZADAS.....	44
2.3.2 MATERIALES CATIÓNICOS ORGÁNICOS – POLÍMEROS CATIÓNICOS CUATERNARIOS	46

CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO..... 48

3.1 PRUEBAS DE LABORATORIO EN LOS FLUIDOS.....	48
3.1.1 DENSIDAD	49
3.1.1.1 Medición de Densidad	49
<i>3.1.1.1.1 Procedimiento medición de Densidad</i>	<i>50</i>
3.1.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	51
3.1.2.1 Medición De Reología.....	51
<i>3.1.2.1.1 Procedimiento Para La Determinación De La Viscosidad Aparente, La Viscosidad Plástica Y El Punto Cedente</i>	<i>52</i>
<i>3.1.2.1.2 Procedimiento Para La Determinación Del Esfuerzo De Gel</i>	<i>53</i>
3.1.3 PÉRDIDA DE FILTRADO API.....	54
3.1.3.1 Medición De Pérdida De Filtrado API	54
<i>3.1.3.1.1 Procedimiento prueba Filtroprensa</i>	<i>56</i>
3.1.4 CONTENIDO DE ARENA	57
3.1.4.1 Determinación Del Contenido De Arena.....	57
<i>3.1.4.1.1 Procedimiento prueba Contenido de Arena</i>	<i>58</i>
3.1.5 CONTENIDO DE LÍQUIDOS Y SÓLIDOS.....	58
<i>3.1.5.1 Procedimiento prueba Retorta.....</i>	<i>59</i>
3.1.6 CAPACIDAD DE AZUL DE METILENO O MBT	60
3.1.6.1 Equipo.....	61
3.1.6.2 Reactivos.....	61
3.1.6.3 Procedimiento Prueba de Azul de Metileno.....	61
3.1.7 CONCENTRACIÓN IÓNICA DE HIDRÓGENO (PH).....	62
3.1.7.1 Papel pH (Palillos Indicadores).....	63
<i>3.1.7.1.1 Procedimiento de Prueba con palillos de pH.....</i>	<i>63</i>
3.1.7.2 Medidor De pH Digital.....	64
<i>3.1.7.2.1 Procedimiento Prueba medidor pH digital</i>	<i>64</i>
3.1.8 PRUEBAS QUÍMICAS	65
3.1.8.1 CONTENIDO DE CLORUROS	65
<i>3.1.8.1.1 Equipo prueba Contenido de Cloruros.....</i>	<i>66</i>
<i>3.1.8.1.2 Determinación de Contenido de Cloruros.....</i>	<i>66</i>
3.1.8.2 DUREZA DEL CALCIO	67
<i>3.1.8.2.1 Equipo prueba Dureza del Calcio</i>	<i>67</i>
<i>3.1.8.2.2 Procedimiento para determinar la Dureza del Calcio</i>	<i>67</i>
3.1.8.3 ALCALINIDAD DE FILTRADO (Pf y Mf)	68

3.1.8.3.1 <i>Equipo prueba Alcalinidad de Filtrado</i>	68
3.1.8.3.2 <i>Procedimiento para determinar la Alcalinidad de Filtrado</i>	68
3.1.8.4 ALCALINIDAD LODO BASE AGUA (Pm)	69
3.1.8.4.1 <i>Equipo prueba Alcalinidad lodo base agua</i>	69
3.1.8.4.2 <i>Procedimiento para determinar la Alcalinidad lodo base agua</i>	70
3.2 PRUEBAS ESPECIALES	70
3.2.1 EQUIPO DINÁMICO DE HINCHAMIENTO LINEAL (INHIBICIÓN)	70
3.2.2 HORNO DE ROLADO PROGRAMABLE	72
3.2.3 DUREZA AL HUMECTAR	73
3.2.3.1 <i>Armado del Equipo de Dureza al Humectar</i>	75
3.2.3.2 <i>Procedimiento para la Prueba de Dureza al Humectar</i>	76

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LODO BASE AMINA CON LAS DIFERENTES MUESTRAS	78
4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	78
4.2 FORMULACIÓN DE LODO DE PERFORACIÓN BASE AMINA 80	
4.2.1 PROCESO DE MEZCLADO DE LODO BASE AMINA	81
4.2.2 BREVE DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL LODO BASE AMINA	82
4.2.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL LODO DE PERFORACIÓN	84
4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
4.3 PREPARACIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA PRUEBAS	87
4.3.1 SELECCIÓN DE MUESTRAS	87
4.3.1.1 SELECCIÓN PARA LUTITAS	87
4.3.1.2 SELECCIÓN PARA ARCILLAS	87
4.4 PRUEBA ESPECIAL PARA LUTITAS	88
4.4.1 DUREZA AL HUMECTAR	88
4.4.1.1 Orteguaza (6400-6495)ft	89
4.4.1.2 Orteguaza (6800-6850)ft	91
4.4.1.3 Napo Shale (9450 – 9540)ft	92
4.4.1.4 Napo Shale (9770 - 9860)ft	94
4.5 PRUEBA PARA FORMACIONES COMPUESTAS DE ARCILLA ... 95	
4.5.1 HINCHAMIENTO LINEAL	95
4.5.1.1 Tiyuyacu (7230 – 7300)ft	97

4.5.1.2 Tiyuyacu (7590 - 7660)ft	99
4.5.1.3 Tiyuyacu (7740 – 7800)ft.....	100
4.5.1.4 Tena (9090 – 9180)ft	102
4.5.1.5 Tena (9270 – 9360)ft	103
CAPITULO 5	106
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
5.1 CONCLUSIONES.....	106
5.2 RECOMENDACIONES.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
GLOSARIO	113
ANEXOS.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 2

TABLA 2.1 Superficies específicas de algunas arcillas	15
TABLA 2.2 Ejemplos capacidad de intercambio catiónico	16
TABLA 2.3 Minerales que se encuentran en el medio	27
TABLA 2.4 Rango de CEC para materiales minerales arcillosos puros	31
TABLA 2.5 Tabla comparativa de diámetros iónicos e hidratados	33

CAPITULO 3

TABLA 3.1 Rango de valores aceptables en prueba de reología y geles	52
---------------------------------------------------------------------	----

CAPITULO 4

TABLA 4.1 Formulación del lodo de perforación	80
TABLA 4.2 Resultados de Pruebas Básicas	84
TABLA 4.3 Muestras seleccionadas	88
TABLA 4.4 Resultados de MBT de las arcillas	96

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1 Características litológicas de las formaciones	6
-----------------------------------------------------------	---

CAPITULO 2

Figura 2.1 Estructuras Tetraédricas de los Filosilicatos	12
Figura 2.2 Distribución laminar de los filosilicatos	14
Figura 2.3 Fotomicrografía de bentonita	22
Figura 2.4 Partícula de Montmorillonita idealizada	23
Figura 2.5 Pirofilita eléctricamente neutra	23
Figura 2.6 Sustitución de Al^{3+} por Mg^{2+} causando una partícula cargada negativamente	24
Figura 2.7 Comparación de estructuras de arcillas	25
Figura 2.8 Comparación del hinchamiento para la montmorillonita cálcica y sódica	30
Figura 2.9 Procesos de enlace de las partículas de arcilla	34
Figura 2.10 Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada	45

CAPITULO 3

Figura 3.1 Balanza de lodo	49
Figura 3.2 Viscosímetro Rotativo	52
Figura 3.3 Curva típica de caudales para un lodo de perforación	53
Figura 3.4 Filtroprensa API	55
Figura 3.5 Juego para determinar contenido de arena	57
Figura 3.6 Retorta	59

Figura 3.7 Equipo MBT	60
Figura 3.8 Papel pH	64
Figura 3.9 Medidor pH digital	65
Figura 3.10 Equipo dinámico de Hinchamiento Lineal	71
Figura 3.11 Horno de rolado	72
Figura 3.12 Equipo de Dureza al Humectar	76

CAPITULO 4

Figura 4.1 Toma de muestras en zarandas	78
Figura 4.2 Recolección de muestras	79
Figura 4.3 Secado de muestras en el horno de rolado	80
Figura 4.4 Equipo de Dureza al Humectar	88
Figura 4.5 Pesaje de la muestra de lutita	89
Figura 4.6 Voltaje <u>vs</u> Tiempo Orteguaza (6400 - 6495) ft	90
Figura 4.7 Pastilla de lutita de Orteguaza (6400 - 6495) ft	90
Figura 4.8 Voltaje <u>vs</u> Tiempo Orteguaza (6800 - 6850) ft	91
Figura 4.9 Torquímetro a 225 lb/ft	92
Figura 4.10 Pastilla de lutita de Orteguaza (6800 - 6850) ft	93
Figura 4.11 Voltaje <u>vs</u> Tiempo Napo Shale (9450 - 9540) ft	93
Figura 4.12 Pastilla de lutita de Napo Shale (9450 - 9540) ft	94
Figura 4.13 Voltaje <u>vs</u> Tiempo Napo Shale (9770 - 9860) ft	95
Figura 4.14 Pastilla de lutita de Napo Shale (9770-9860) ft.	95
Figura 4.15 Equipo Dinámico de Hinchamiento Lineal	96
Figura 4.16 Resultado de MBT para Tiyuyacu (7590-7660) ft	97
Figura 4.17 Inicio de prueba (agregando fluidos)	98
Figura 4.18 Curva Comparativa Agua <u>vs</u> Lodo base amina Tiyuyacu (7230 – 7300) ft	98
Figura 4.19 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y c) Hinchamiento con Agua	99
Figura 4.20 Equipo de hinchamiento corriendo prueba	100

Figura 4.21 Curva Comparativa Agua <u>vs</u> Lodo base amina Tiyuyacu (7590 - 7660) ft	100
Figura 4.22 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y c) Hinchamiento con Agua	101
Figura 4.23 Curva Comparativa Agua <u>vs</u> Lodo base amina Tiyuyacu (7590 - 7660) ft	102
Figura 4.24 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y c) Hinchamiento con Agua	
Figura 4.25 Curva Comparativa Agua <u>vs</u> Lodo Tena (9090 – 9180) ft	103
Figura 4.26 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y c) Hinchamiento con Agua	103
Figura 4.27 Curva Comparativa Agua vs Lodo base amina Tena (9270 – 9360) ft	104
Figura 4.28 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y c) Hinchamiento con Agua	105

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A

Tablas de datos de Dureza al Humectar de Orteguaza	115
----------------------------------------------------	-----

ANEXO B

Tabla de datos de las pruebas de Dureza al Humectar de Napo (Shale)	117
---------------------------------------------------------------------	-----

ANEXO C

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal:

Tiyuyacu (7230 - 7300) ft	119
Tiyuyacu (7590 - 7660) ft	123
Tiyuyacu (7740 - 7800) ft	126

ANEXO D

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal

Tena (9090 – 9180) ft	130
Tena (9270 – 9360) ft	133

RESUMEN

El presente Proyecto fue propuesto por la compañía M-I SWACO, con el propósito de realizar un análisis de la inhibición de las arcillas reactivas y de las lutitas inestables en las formaciones Orteguaza, Tiyuyacu, Tena y Napo (Shale) con fluidos base amina en un campo del Oriente Ecuatoriano.

Se debe destacar que por motivos de confidencialidad del Bloque Operador no se mencionará el nombre del campo ni del pozo, en su reemplazo el nombre del Campo se lo denominará como "Campo MAG" y el respectivo nombre del pozo estudiado será "Pozo X".

Las pruebas realizadas en el laboratorio con muestras reales del pozo mencionado en el caso de las arcillas fue la prueba de Hinchamiento Lineal con la cual determinamos cuan efectiva es la inhibición del lodo ante el hinchamiento por efecto del agua presente en el sistema, y en el caso de las lutitas inestables se realizó la prueba de Dureza al Humectar para ver que tan frágiles se tornan las lutitas en contacto con la fase continua del fluido de perforación, para su posterior análisis de la efectividad de la formulación del lodo en dos escenarios diferentes pero muy importantes durante la perforación de la sección 12 ¼" (segunda sección).

Los resultados de las pruebas mencionadas fueron satisfactorios ya que en el caso de las arcillas éstas se inhibieron muy bien con respecto al fluido de la fase continua del sistema obteniéndose una relación de dos a uno, el agua con respecto al lodo y en el caso de las lutitas sus resultados fueron al igual buenos, ya que los efectos inhibitorios del fluido hicieron que dichas muestras sean manejables y no se tornen en un problema en la perforación del Pozo "X".

En el caso de las lutitas se realizó una comparación entre las dos formaciones que presentan mayor índice de éstas que son Orteguzaza y Napo Shale siendo que las primeras a pesar de la buena inhibición son más inestables con respecto a las segundas muestras.

En el primer capítulo se presenta una descripción geológica del Campo MAG, con sus respectivas características litológicas y estratigráficas de las formaciones Orteguzaza, Tiyuyacu, Tena y Napo Shale.

En el segundo capítulo se realiza una descripción de la química de arcillas, los problemas que suscitan con las lutitas y el comportamiento de las aminas en la inhibición para poder conceptualizar la problemática de nuestro estudio.

En el tercer capítulo se realiza una descripción de los equipos y el análisis de múltiples pruebas tanto básicos como especiales, los cuales servirán para el lodo de perforación como también para las muestras tomadas del pozo X, tanto para las arcillas como para las lutitas.

En el cuarto capítulo se presentan la selección de las muestras recolectadas con respecto a su litología y composición, los resultados de las pruebas básicas realizadas al lodo de perforación y de las pruebas especiales realizadas.

Finalmente, el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido durante la realización del presente estudio.

PRESENTACIÓN

Muchos de los campos del oriente ecuatoriano, en el momento de perforar los pozos presentan problemas con motivos de hinchamientos de las arcillas, derrumbes de las formaciones de lutitas inestables, pegas, las cuales dificultan las operaciones o en último caso se pierden los BHA; los problemas anteriormente mencionados dan como resultado grandes pérdidas de tiempo y dinero.

El presente proyecto se realizará debido a la necesidad de evaluar el desempeño de la formulación de fluidos base amina con respecto al tiempo, debido a que en periodos más prolongados los efectos de la inhibición no son satisfactorios y se desencadena en problemas al perforar o al realizar procedimientos necesarios en la perforación; dicha variable influye de manera sustancial en la efectividad de la inhibición durante la perforación del pozo X del Campo MAG, por lo cual es importante un correcto análisis de los efectos inhibitorios del lodo para que este fluido no desencadene en otros problemas.

Este proyecto tiene como objetivo analizar la inhibición de las arcillas reactivas y las lutitas inestables de las formaciones Orteguzaza, Tiyuyacu, Tena y Napo Shale con fluidos base amina en un campo de Oriente Ecuatoriano, lo cual ayudará a verificar la efectividad de las propiedades del lodo de perforación.

Al término del presente estudio se determinará la efectividad de los componentes directamente implicados en la inhibición, así como un vistazo de todos los problemas y factores negativos con el fin de dar algunas recomendaciones prácticas en operaciones de campo.

La investigación estará enfocada como aporte a los estudios ya realizados por la compañía M-I SWACO, todos los réditos que brinde la presente investigación irán a favor de la empresa y a la economía del país.

CAPITULO 1

DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y LITOLÓGICA DEL CAMPO MAG

En el presente capítulo se dará a conocer la información acerca de la geología y estratigrafía del Campo "MAG" debido a la importancia de la misma durante la elaboración de los programas de perforación.

Estructuralmente se define al campo como un anticlinal asimétrico de dirección NNE-SSO, integrado por un sistema de fallas de dirección Norte-Sur, las que cortan en el flanco Oeste a lo largo del campo. Posee un sistema de fallas secundarias de compensación como consecuencia del régimen transgresivo, las que pueden alcanzar a la caliza "B" y un sistema adicional de compartimentos orientados en dirección Suroeste-Noroeste.

El tipo de falla que atraviesa el campo es posiblemente una antigua falla de tipo normal que luego fue invertida en el Cretácico Superior bajo un régimen transgresivo. Esta falla se profundiza en el basamento cristalino, reactivándose por más de una ocasión, conforme a las diversas etapas de deformación que llega hasta la Formación Hollín y, en ocasiones, hasta la Caliza "M-2".

1.1 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

1.1.1 FORMACIÓN ORTEGUAZA

Esta formación está constituida por lutita de color oscuro verdoso, la misma que puede ser firme, frágil y no calcárea. La formación Orteguaza está constituida por la lutita Orteguaza y la arenisca Orteguaza.

Debajo de la arenisca Orteguaza existe la presencia de limolita intercalada con lutita, dicha limonita se presenta en varios colores (gris verdosa, gris clara); la lutita se presenta con un color gris claro.

1.1.1.1 Lutita Orteguaza

Presenta las siguientes características: varios colores (gris claro, gris verdoso), firme a moderadamente firme, cemento no calcáreo, con inclusiones minerales de micro – piritita.

1.1.1.2 Arenisca Orteguaza

Se encuentra intercalada con limolita, carbón y lutita. De acuerdo a los análisis de los ripios de perforación la arenisca es cuarzosa, subtransparente, ocasionalmente blanca, tamaño de grano de fino a medio, ocasionalmente de grano grueso, de forma subangular a subredondeada, cemento calcáreo y se infiere una regular porosidad.

La limolita se presenta de varios colores, suave a moderadamente firme, irregular a amorfa, localmente gradando a arenisca muy fina. El carbón presenta las siguientes características: color negro, duro y textura leñosa.

1.1.2 FORMACIÓN TIYUYACU

Compuesta principalmente por arcillolita, intercalada con limolita, arenisca y dos cuerpos de conglomerados. Desde el tope de esta formación hasta su primer conglomerado (Conglomerado Superior Tiyuyacu), la arcillolita es predominante e intercalada con limolita y arenisca.

La arenisca es cuarzosa, el tamaño de su grano va de fino a medio. Bajo el Conglomerado Superior Tiyuyacu aparece arcillolita intercalada con limolita y arenisca y por bajo del Conglomerado Inferior Tiyuyacu aparece arcillolita intercalada con limolita y arenisca.

1.1.2.1 Conglomerado Superior Tiyuyacu

Está asociado con arenisca, limolita y arcillolita. El conglomerado presenta las siguientes características: varios colores (blanco lechoso, blanco amarillento, gris claro, gris oscuro), fragmentos de forma subangular a subredondeados, asociados con cherts.

La arenisca es cuarzosa, subtransparente a subtranslucida, blanca, ocasionalmente blanca amarillenta, sus granos son sueltos, su tamaño de grano va de fino a medio, en menor cantidad grano grueso, la forma de sus granos va de subangular a subredondeados y no se visualiza cemento y matriz.

La limolita presenta las siguientes características: varios colores (gris clara, café rojizo), suave a moderadamente firme, irregular a amorfa y no calcárea.

La arcillolita presenta las siguientes características: varios colores (café rojiza, ocasionalmente crema y rojo ladrillo), firme a moderadamente firme, y no calcárea.

1.1.2.2 Conglomerado Inferior Tiyuyacu

Está asociado con arenisca, limolita y arcillolita. El conglomerado presenta las siguientes características: varios colores (color negro, en menor cantidad gris claro, gris oscuro, blanco amarillento y café rojizo) y duro a muy duro.

La arenisca presenta las siguientes características: cuarzosa, subtransparente a subtranslúcida, en menor cantidad blanca amarillenta y negra, ocasionalmente blanca, suelta, el tamaño de su grano va de fino a medio.

La limolita presenta las siguientes características: color gris claro, gradando a arenisca muy fina y no calcárea. La arcillolita presenta las siguientes características: varios colores (color café rojiza, rojo ladrillo), y no calcárea.

1.1.3 FORMACIÓN TENA

Conformada por arcillolita intercalada con limolita y ocasionalmente caliza y arenisca a la base. La arcillolita presenta las siguientes características: color rojizo, chocolate, ocasionalmente café amarillento, firme a moderadamente firme y calcárea.

La limolita presenta las siguientes características: café rojiza, gris verdosa, suave a moderadamente firme, forma irregular a amorfo y calcárea.

1.1.3.1 Arenisca Basal Tena

Se encuentra intercalada con limolita y arcillolita. La arenisca presenta las siguientes características: cuarzosa, subtransparente, ocasionalmente blanca lechosa a blanca, tamaño de grano muy fino a fino, cemento calcáreo y matriz kaolinitica.

La limolita presenta las siguientes características: gris clara, en menor cantidad gris verdosa y crema, moderadamente firme a firme, subbloque a bloque, calcárea y localmente gradando a arenisca muy fina.

La arcillolita presenta las siguientes características: color chocolate, en menor cantidad café rojiza, ocasionalmente café amarillenta, irregular a subbloque y ligeramente calcárea.

1.1.4 FORMACIÓN NAPO

Está conformada por lutita, arenisca y carbón a la base. La lutita presenta las siguientes características: gris oscura, negra, y ocasionalmente gris clara, suave a moderadamente firme, localmente textura limosa y no calcárea.

La arenisca presenta las siguientes características: cuarzosa, subtransparente a subtranslúcida, tamaño de grano muy fino a fino. El carbón presenta las siguientes características: color negro, firme a moderadamente duro e irregular a subbloque.

En la parte inferior de esta sección tenemos arenisca intercalada con lutita las cuales se describen a continuación:

La arenisca presenta las siguientes características: cuarzosa, tamaño de grano medio, grano grueso a la base, suelta, forma del grano subangular a subredondeada, moderadamente clasificada, no se visualiza cemento y matriz. Presencia de hidrocarburo en forma de puntos de color café oscuro a negro, no presenta fluorescencia natural. La lutita presenta las siguientes características: color gris oscuro a negro, firme a moderadamente dura, sublaminaada, textura limosa y no calcárea.

1.1.4.1 Lutita Superior Napo

Está conformada por lutita con estratos delgados de caliza. La lutita presenta las siguientes características: gris oscura, en menor cantidad negra, firme a moderadamente firme, laminada a sublaminaada, subfísil y no calcárea. La caliza se presenta en forma crema, blanca lechosa, firme a moderadamente dura, irregular a subbloque.

En la Figura 1.1 se muestra las características litológicas de las formaciones que son de interés de nuestro estudio.

FORMACIÓN	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	
FORMACIÓN ORTEGUAZA	LUTITA ORTEGUAZA	COLOR GRIS CLARO, VERDOSO, FIRME A MODERADAMENTE FIRME, CEMENTO NO CALCÁREO
	ARENISCA ORTEGUAZA	ARENISCA INTERCALADA CON LIMOLITA, CARBÓN Y LUTITA
	TRANSICIÓN	LIMOLITA INTERCALADA CON LUTITA
TIYUYACU	CONGLOMERADO SUPERIOR TIYUYACU	VARIOS COLORES, ASOCIADO CON ARENISCA Y LIMOLITA
	CONGLOMERADO INFERIOR TIYUYACU	CUARZOSO DE VARIOS COLORES, DURA A MUY DURA, FRACT CONCIODAL
	TRANSICIÓN	ARCILLOLITA INTERCALADA CON LUTITA
FORMACION TENA	TENA SUPERIOR	ARCILLOLITA: CHOCOLATE, CAFÉ ROJIZA, CAFÉ AMERILLENTO, FIRME, IRREGULAR
	ARENISCA BASAL TENA	ARENISCA: CUERZOSA, BLANCA, SUBTRANSPARENTE, GRANO MEDIO A FINO
FORMACIÓN NAPO	ARENISCA M-1	LIMOLITA: GRIS CLARA, GRIS, MENOR CAFÉ ROJIZA, SUAVE A MODERADAMENTE FIRME
	LUTITA NAPO SUPERIOR	GRIS OSCURA, LAMINADA, SUBFÍSIL A FÍSIL, ASTILLOSA, QUEBRADIZA, NO CALCÁREA
	CALIZA PRINCIPAL	CALIZAS MASIVAS O EN CAPAS GUESAS DE COLOR GRIS

Figura 1.1 Características litológicas de las formaciones
Fuente: Departamento de Cartografía, Petroproducción

1.2 DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA

La Estratigrafía, como parte de la Geología, estudia aquellos estratos constituidos de cuerpos rocosos, reconociendo en ellos formas, composiciones litológicas, propiedades geofísicas y geoquímicas, sucesiones originarias, relaciones de edad, distribución y contenido fosilífero.

El comportamiento estratigráfico del Campo MAG es generalizado a la Cuenca Oriental Ecuatoriana para la cual se han realizado muchos estudios sobre estratos y sus propiedades que van desde la superficie hasta las zonas de interés, para lo cual se ha diseñado una columna base y de donde se obtiene información como: era y edad geológica, formación a la que pertenece, ambiente de depositación, espesor promedio, litología, etc.

A continuación se describirá los principales estratos de interés dentro de nuestro estudio del Campo MAG:

1.2.1 FORMACIÓN ORTEGUAZA

Pertenece a la edad del Oligoceno dentro del periodo Paleógeno. Esta formación presenta un espesor aproximado de 50 a 500 pies. El ambiente de depositación en el que se dio esta formación es de agua salobre a Marina, también conocido como “brake”.

1.2.2 FORMACIÓN TIYUYACU

El espesor promedio de la formación es de 100 a 1500 pies y pertenece a la edad del Oligoceno al Eoceno. El ambiente deposicional presente en la formación es Continental. En la sísmica, el contacto Tiyuyacu-Orteguaza corresponde a un fuerte reflector que marca el paso de ambiente Continental a Marino.

1.2.3 FORMACIÓN TENA

Tiene un espesor aproximado de 400 a 3200 pies; cuerpo donde se puede encontrar la subdivisión en dos miembros, que son:

1.2.3.1 Tena Superior

Pertenece a la edad del Paleoceno y constituye la base de la era Cenozoica. El ambiente de depositación es Continental.

1.3.2.2 Tena Inferior

El ambiente de depositación de esta parte de la formación es Continental a Marina Somera. La era Mesozoica tiene sus comienzos en la parte inferior de Tena y pertenece a la edad Cretácica.

1.2.4 FORMACIÓN NAPO

Consiste en alrededor de 500 a 2500 pies de lutitas y calizas con intercalaciones de areniscas. La formación Napo es fácilmente reconocible por la presencia de reflectores fuertes que corresponden a niveles de calizas. Esta formación pertenece al periodo que va desde el Cretácico Medio al Superior y marca el inicio de la era Mesozoica. Muchos autores dan a la formación Napo la categoría de grupo, dividiéndola en cuatro miembros (a los que se les asigna el nombre de formaciones), que corresponde a secuencias marinas de aguas poco profundas:

1.2.4.1 Napo Superior

Incluye las calizas "M-1" de la zona subandina (casi no expresadas en la mayor parte de la Cuenca Oriental), a las lutitas de Napo Superior y a las areniscas superiores del Grupo Napo (areniscas M-1). La base de la formación Napo Superior

está definida por el tope del último banco calcárea de la caliza “M-2”, mientras que su tope es la discontinuidad erosiva mayor de la base de la formación Tena; localmente expresada por las “areniscas Basal Tena”. La formación Napo Superior incluye tres o cuatro sedimentarias transgresivas – regresivas, cada una separada por discontinuidades a veces erosivas.

Corresponden respectivamente a la caliza “M-1”, las lutitas M-1, la parte inferior de las areniscas “M-1” y a la parte superior de las areniscas M-1.

CAPITULO 2

QUÍMICA DE ARCILLAS Y COMPORTAMIENTO DE LAS AMINAS EN LA INHIBICIÓN

2.1 QUÍMICA DE ARCILLAS

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades fisico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm).
- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 mm.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Los minerales arcillosos son minerales de silicato aluminico de granos finos que tienen microestructuras bien definidas. En la clasificación mineralógica, los minerales arcillosos están clasificados como silicatos estratificados porque la estructura dominante se compone de camas formadas por capas de sílice y alúmina.

Cada capa consta de una estructura laminar y delgada, llamada capa unitaria. La mayoría de los minerales arcillosos tienen una morfología laminar. Según las unidades repetidas de la estructura, los minerales arcillosos también se pueden clasificar de acuerdo a la relación de capas de sílice a capas de alúmina, tal como 1:1, 2:1 y 2:2, además de si estos minerales arcillosos son estratificados o en forma de aguja.

En la industria de fluidos de perforación, ciertos minerales arcillosos tales como la esmectita, uno de los principales componentes de la bentonita, son usados para proporcionar viscosidad, estructura de gel y control de filtrado.

Las arcillas de la formación se incorporan inevitablemente en el sistema de fluido de perforación durante las operaciones de perforación y pueden causar varios problemas. Por lo tanto, los minerales arcillosos pueden ser beneficiosos o dañinos para el sistema de fluido. El término bentonita se usa para describir la montmorillonita sódica explotada comercialmente que se usa como aditivo para el lodo de perforación.

2.1.1 ESTRUCTURA DE LOS FILOSILICATOS

Como veremos, las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Como indica la Figura 2.1 los grupos tetraédricos de los filosilicatos $(\text{SiO})_4^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los

tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} .

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} , pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros, y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsítica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros.

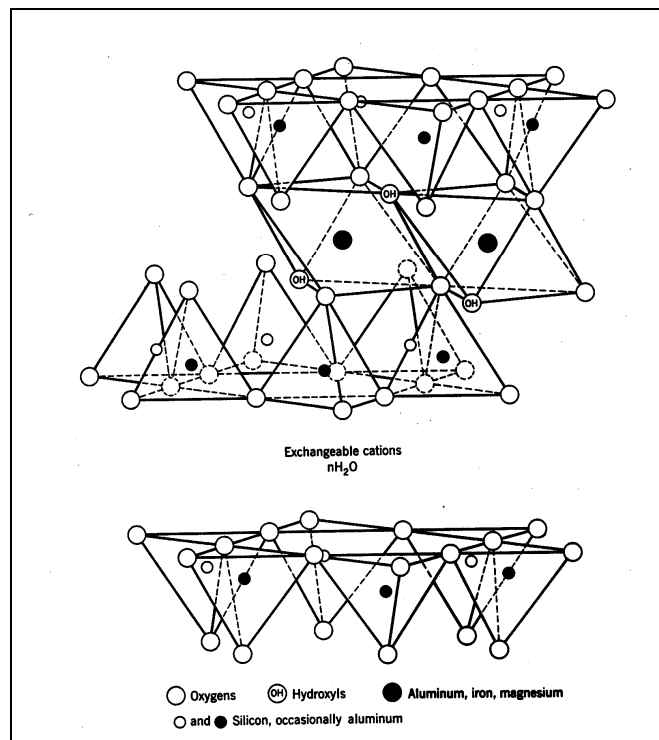


Figura 2.1 Estructuras Tetraédricas de los Filosilicatos
Fuente: www.uclm.es

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan bilaminares, 1:1; o bien por tres capas: una octaédrica y dos

tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina. En algunos filosilicatos (esmectitas, vermiculitas, micas...) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga (Figura 2.2).

El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar, o espacio existente entre dos láminas consecutivas, de cationes, cationes hidratados o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se las denomina 2:1:1. La unidad formada por una lámina más la interlámina es la unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca).

También pertenecen a este grupo de minerales la sepiolita y la paligorskita, a pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos.

Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (sepiolita) o cada 5 posiciones (paligorskita). Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

2.1.2 PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS

Debido a sus pequeños tamaños de partículas, las arcillas y los minerales arcillosos son analizados con técnicas especiales tales como la difracción de rayos X, la absorción infrarroja y la microscopía electrónica.

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC), la adsorción de agua y el área superficial son algunas de las propiedades de los minerales arcillosos que suelen ser determinadas para lograr una mejor caracterización de los minerales arcillosos y minimizar los problemas de perforación.

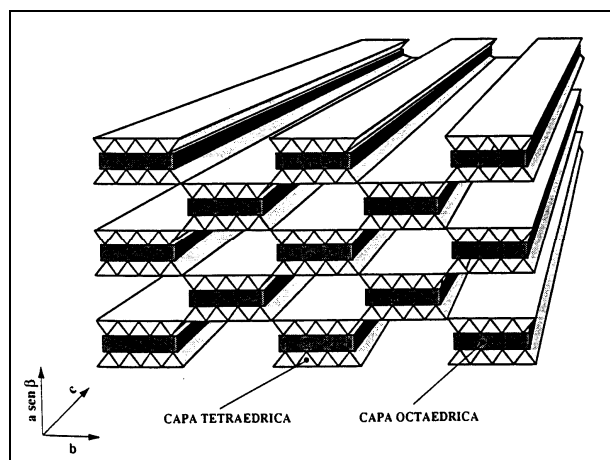


Figura 2.2 Distribución laminar de los filosilicatos
Fuente: www.uclm.es

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm).
- Su morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

2.1.2.1 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad que se presenta en la tabla 2.1.

TIPO DE ARCILLA	SUPERFICIES ESPECÍFICAS
Caolinita de elevada cristalinidad	hasta 15 m^2/g
Caolinita de baja cristalinidad	hasta 50 m^2/g
Halloisita	hasta 60 m^2/g
Illita	hasta 50 m^2/g
Montmorillonita	80-300 m^2/g
Sepiolita	100-240 m^2/g
Paligorskita	100-200 m^2/g

Elaborado por: Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

2.1.2.2 Capacidad de Intercambio Catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio.

Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. En la Tabla 2.2 se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico

TABLA 2.2	
EJEMPLOS CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO	
	Capacidad de intercambio catiónico meq/100g
Caolinita:	3 - 5
Halloisita:	10 – 40
Illita:	10 – 50
Clorita:	10 – 50
Vermiculita:	100 – 200
Montmorillonita:	80 – 200
Sepiolita-paligorskita:	20-35

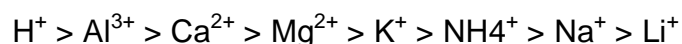
Elaborado por: Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

La CEC está expresada en miliequivalentes por 100 gramos de arcilla seca (meq/100 g).

- La CEC de la montmorillonita está comprendida dentro del rango de 80 a 150 meq/100 g de arcilla seca.
- La CEC de las ilitas y cloritas es de aproximadamente 10 a 40 meq/100 g
- La CEC de las kaolinitas es de aproximadamente 3 a 10 meq/100 g de arcilla.

La Prueba de Azul de Metileno (MBT) es un indicador de la CEC aparente de una arcilla. Cuando se realiza esta prueba sobre un lodo, se mide la capacidad total de intercambio de azul de metileno de todos los minerales arcillosos presentes en el lodo.

Para hacerse una idea de los cationes que reemplazarán a otros cationes en las posiciones de intercambio, se acepta generalmente la siguiente secuencia, disponiéndola en orden de preferencia decreciente:



Es decir que cualquier catión a la izquierda reemplazará a cualquier catión ubicado a su derecha. La concentración relativa de cada catión también afecta esta preferencia de intercambio catiónico. Aunque resulte más difícil reemplazar el calcio que el sodio, si la concentración iónica de Na^+ es considerablemente más alta que la concentración de Ca^{2+} , el sodio desplazará al calcio. El intercambio catiónico puede resultar de un cambio de temperatura visto que muchos compuestos tienen diferentes relaciones de solubilidad a temperatura.

La solubilidad de algunas de las sales cálcicas comunes, tales como CaSO_4 , disminuye a grandes temperaturas, mientras que la solubilidad de la mayoría de los compuestos de sodios aumenta. A medida que la concentración de $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$

aumenta, los cationes Ca^{2+} de la arcilla tienden a ser reemplazados por los cationes Na^+ de la solución.

2.1.2.3 Capacidad de adsorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido). Para evitar confusiones, en adelante mencionaremos la palabra adsorción como el conjunto de los dos procesos mencionados anteriormente.

2.1.2.4 Hidratación e Hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La adsorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión.

A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de intercambio. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

2.1.2.5 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

2.1.2.6 Tixotropía

Es la propiedad que tienen las suspensiones bentoníticas de pasar de un fluido líquido a una suspensión de gel mediante agitación. Ciertos geles pueden licuarse cuando se agitan, vibran y se solidifican de nuevo cuando cesa la agitación o la

vibración. Las agitaciones o vibraciones, o incluso menores perturbaciones mecánicas hacen que una sustancia tixotrópica se vuelva más fluida, hasta el extremo de cambiar de estado, de sólida a líquida pudiendo recuperarse y solidificar de nuevo cuando cesa la agitación o vibración.

Ciertas arcillas presentan propiedades tixotrópicas. Cuando las arcillas tixotrópicas se agitan, se convierte en un verdadero líquido, es decir, pasan de "gel" a "sol". Si a continuación se las deja en reposo, recuperan la cohesión y el comportamiento sólido.

Gracias a esta propiedad, independiente de la densidad, los lodos colaboran en el mantenimiento de las paredes de la perforación, incluso en formaciones de baja cohesión, al tiempo que ayudan a mantener los sólidos extraídos en la perforación en suspensión al interrumpirse la circulación de los mismos (extracción de tubería, averías de la bomba o del circuito, etc.) evitando en buena parte que se depositen sobre dichos sólidos en el fondo o que se produzca embolamientos.

2.1.3 TIPOS DE ARCILLAS

Existe un gran número de minerales arcillosos, pero los que nos interesan en relación con los fluidos de perforación pueden ser clasificados en tres tipos.

El primer tipo consta de arcillas en forma de aguja no hinchables como la atapulguita o la sepiolita. Se cree que la forma de las partículas es responsable de la capacidad que la arcilla tiene para aumentar la viscosidad. El tamaño natural de cristales finos y la forma de aguja hacen que la arcilla desarrolle una estructura de "escobillas amontonadas" en suspensión, demostrando así una alta estabilidad coloidal, incluso en la presencia de una alta concentración de electrolitos.

Debido a su forma y a sus características no hinchables, estas arcillas demuestran un control de filtración muy débil. Por este motivo, la atapulguita se usa principalmente como mejorador de viscosidad en los lodos base agua salada, mientras que la sepiolita se usa generalmente como viscosificador suplementario para los fluidos geotérmicos y de alta temperatura. Estas arcillas no están casi nunca presentes en las lutitas de las formaciones.

El segundo tipo son las arcillas laminares no hinchables (o ligeramente hinchables): illita, clorita y kaolinita, las cuales serán descritas más adelante.

El tercer tipo son las montmorillonitas laminares muy hinchables. El segundo y el tercer tipo de minerales arcillosos se encuentran en las lutitas de las formaciones, en el orden siguiente y en cantidades decrecientes:

1. illita,
2. clorita,
3. montmorillonita y
4. kaolinita.

Como están presentes en las formaciones perforadas, estas arcillas se dispersan en cantidades variables dentro del sistema de fluido de perforación. La montmorillonita presente en las lutitas es generalmente la montmorillonita cálcica, porque está en equilibrio con el agua de la formación, la cual es generalmente rica en calcio. La montmorillonita sódica también se añade normalmente a un lodo para aumentar la viscosidad y reducir el filtrado.

Las propiedades de filtración y reológicas del lodo dependen de las cantidades de las diferentes arcillas contenidas en el lodo. Como la montmorillonita es añadida intencionalmente a un lodo para controlar estas propiedades, los otros tipos de arcillas pueden ser considerados como contaminantes, visto que no son tan eficaces como una arcilla comercial.

En agua dulce, las capas adsorben el agua y se hinchan hasta el punto en que las fuerzas que las mantienen unidas se debilitan y las capas individuales pueden separarse de los paquetes. La separación de estos paquetes en múltiples capas se llama dispersión. Este aumento del número de partículas, junto con el aumento resultante del área superficial, causa el espesamiento de la suspensión.



Figura 2.3 Fotomicrografía de bentonita
Fuente: M-I SWACO

La figura 2.3 es una fotomicrografía real de una partícula de bentonita. Nótese que se parece a una baraja de cartas abierta en abanico. Se puede observar que varias de las partículas laminares se traslapan.

Las arcillas son generalmente del tipo de dos capas como la kaolinita o del tipo de tres capas como la montmorillonita, la clorita o la illita. Cada partícula de arcilla laminar se compone de un apilamiento de capas unitarias paralelas. Cada capa unitaria consta de una combinación de hojas de sílice dispuestas tetraédricamente (en pirámide) y hojas de alúmina o magnesia dispuestas octaédricamente (ocho caras). Las arcillas de tres capas se componen de capas unitarias constituidas por

dos hojas tetraédricas de cada lado de una hoja octaédrica, en cierto modo como un emparedado (Figura 2.4).

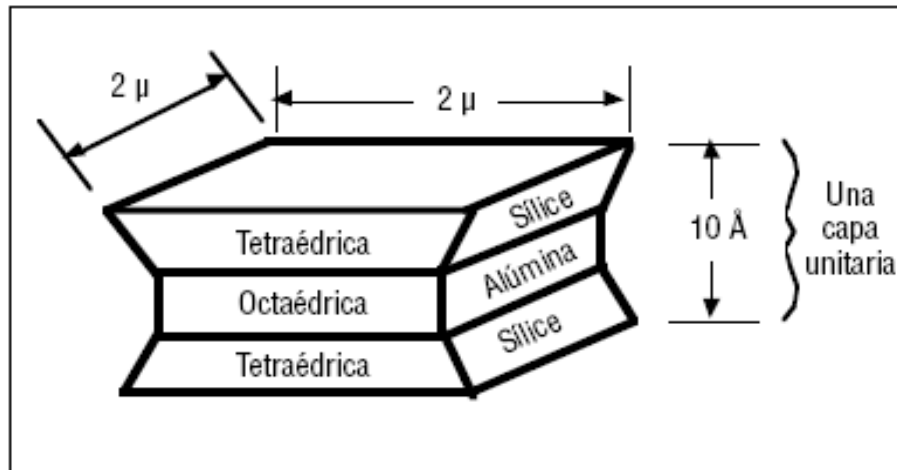


Figura 2.4 Partícula de Montmorillonita idealizada
Fuente: www.uclm.es

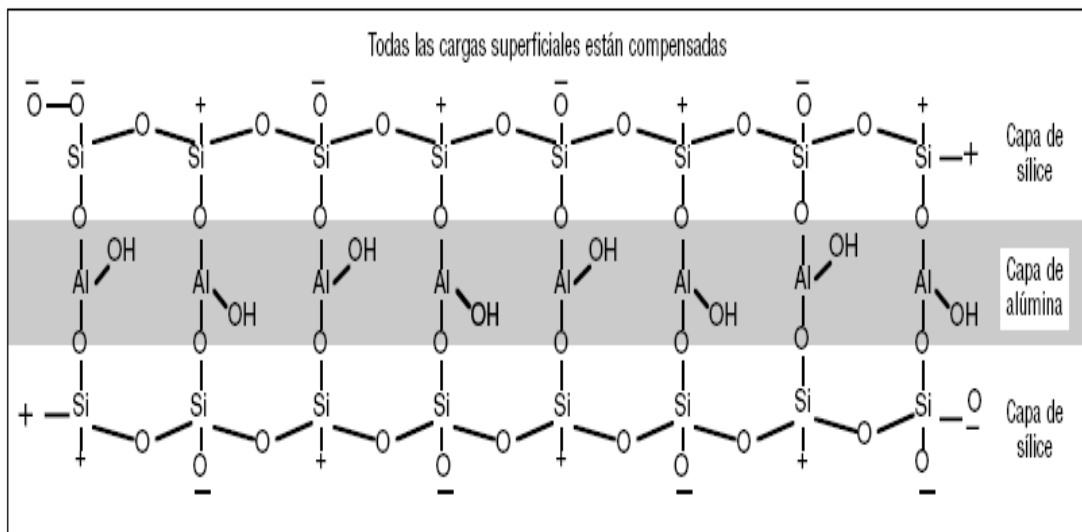


Figura 2.5 Pirofilita eléctricamente neutra
Fuente: www.uclm.es

Las arcillas de dos capas se componen de capas unitarias constituidas por una hoja tetraédrica y una hoja octaédrica. Las arcillas pueden ser eléctricamente neutras o estar cargadas negativamente (Figura 2.5).

2.1.3.1 Arcillas Montmorilloníticas (Arcillas De Tres Capas)

Si se sustituye un átomo de aluminio (Al^{3+}) por un solo átomo de magnesio (Mg^{2+}) en la estructura reticular (disposición de los átomos), ésta tendrá un electrón excedente o una carga negativa (Figura 2.6). La carga negativa neta es compensada por la adsorción de cationes (iones positivos) en las superficies de la capa unitaria, tanto en las superficies interiores como en las superficies exteriores del apilamiento.

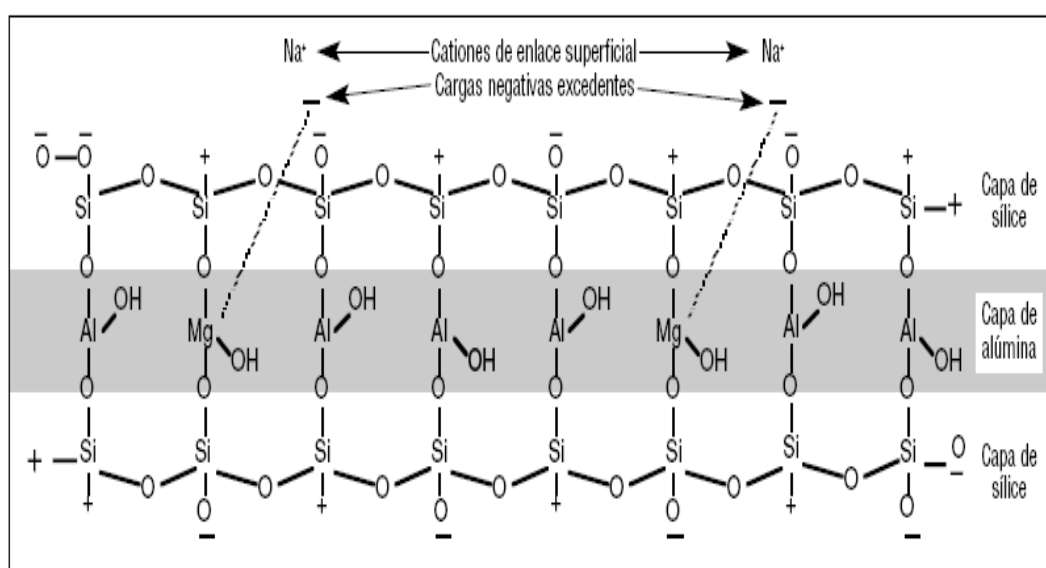


Figura 2.6 Sustitución de Al^{3+} por Mg^{2+} causando una partícula cargada negativamente

Fuente: M-I SWACO

Los cationes que se adsorben en las superficies de las capas unitarias pueden ser cambiados por otros cationes y se llaman los cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla se mide y se registra como capacidad de intercambio catiónico (CEC).

El catión puede ser un ion de simple carga como el sodio (Na^+) o un ion de doble carga como el calcio (Ca^{2+}) o el magnesio (Mg^{2+}). De este modo, tenemos montmorillonita sódica, montmorillonita cálcica y/o montmorillonita magnésica.

Aunque la bentonita comercial esté generalmente definida como montmorillonita sódica, el calcio y el magnesio intercambiables pueden constituir de 35 a 67% de la capacidad total de intercambio. La propiedad más típica de las montmorillonitas es la capacidad de hinchamiento entre capas (hidratación) con el agua.

2.1.3.2 Iilitas (Arcillas De Tres Capas)

Las iilitas tienen la misma estructura básica que las montmorillonitas, pero no muestran la capacidad de hinchamiento entre capas. En vez de la sustitución de Al^{3+} por Mg^{2+} como en la montmorillonita, la iilita tiene una sustitución de Si^{4+} por Al^{3+} , lo cual aún produce una carga negativa. Los cationes compensadores son principalmente el ion potasio (K^+).

Entre los minerales arcillosos 2:1, la esmectita, iilita, y capas mixtas de iilita y esmectita son encontradas durante la perforación de formaciones de lutita, causando frecuentemente distintos problemas relacionados con la estabilidad del pozo y el mantenimiento del fluido de perforación. La naturaleza problemática de estos minerales arcillosos puede estar relacionada con los cationes débilmente enlazados entre las capas y las cargas débiles de las capas que producen el hinchamiento y la dispersión al entrar en contacto con el agua. A medida que la profundidad aumenta, las formaciones de lutita se vuelven generalmente menos hinchables pero más dispersivas en agua.

2.1.3.3 Cloritas (Arcillas de tres Capas)

Las cloritas están estructuralmente relacionadas con las arcillas de tres capas. Las cloritas no se hinchan en su forma pura, pero puede hacerse que hinchen ligeramente al ser modificadas. En estas arcillas, los cationes compensadores de carga entre las capas unitarias de tipo montmorillonita son reemplazados por una capa de hidróxido de magnesio octaédrico, o brucita, esto se muestra en la Figura

2.7. Esta capa tiene una carga positiva neta debido a la sustitución de ciertos Mg^{2+} por Al^{3+} en la capa de brucita.

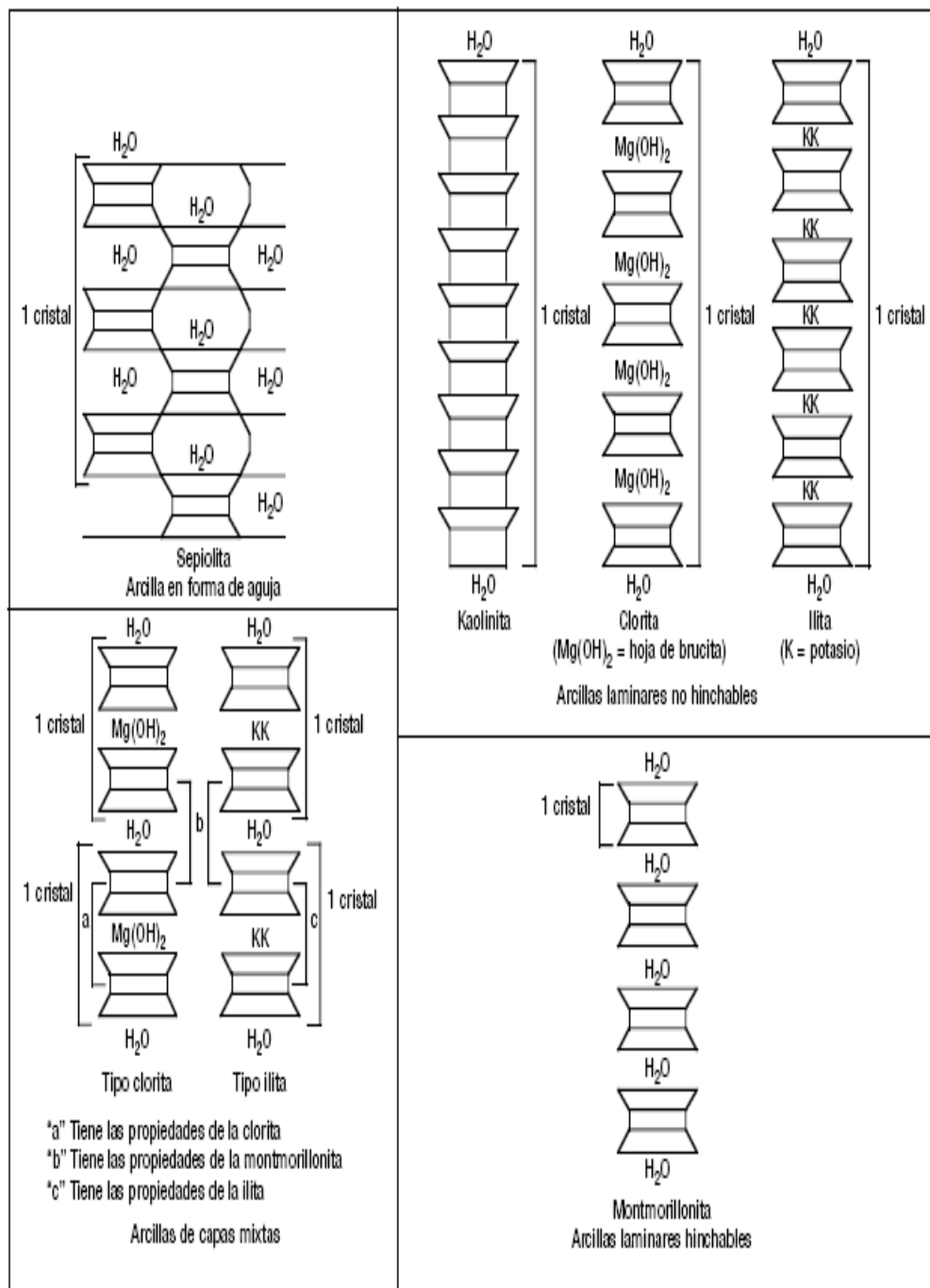


Figura 2.7 Comparación de estructuras de arcillas
Fuente: M-I SWACO

Las cloritas se encuentran frecuentemente en antiguos sedimentos marinos enterrados a grandes profundidades, y normalmente no causan ningún problema importante a menos que estén presentes en grandes cantidades. La capacidad de intercambio catiónico de la clorita varía de 10 a 20 meq/100 g, principalmente debido a los enlaces rotos. La clorita también puede formar arcillas de capas mixtas con otros minerales arcillosos tales como la esmectita. La arcilla resultante de capas mixtas tendría las propiedades de ambos tipos de minerales arcillosos.

2.1.3.4 Kaolinitas (Arcillas De Dos Capas)

La kaolinita es una arcilla no hinchable cuyas capas unitarias están fuertemente ligadas mediante enlaces de hidrógeno. Esto impide la expansión de la partícula, porque el agua no es capaz de penetrar en las capas. La kaolinita no contiene cationes entre capas ni tiene cargas superficiales porque no se produce casi ninguna sustitución en las hojas tetraédricas u octaédricas. Sin embargo, algunas pequeñas cargas pueden resultar de los enlaces rotos o las impurezas. Por lo tanto, la kaolinita tiene una capacidad de intercambio catiónico relativamente baja (de 5 a 15 meq/100 g). La kaolinita se encuentra comúnmente como componente menor a moderado (5 a 20%) de las rocas sedimentarias tales como las lutitas y las areniscas.

TABLA 2.3 Minerales que se encuentran en el medio

GRUPO	ESTRUCTURA	CARGA	CATIÓN DE INTERCAMBIO	HINCHAMIENTO
Kaolinita	capa 1:1	Nula	Ninguno	Ninguno
Talco	capa 2:1	Nula	Ninguno	Ninguno
Esmectita	capa 2:1	0.3 – 0.6	Na ⁺ ; Ca ²⁺ ; K ⁺ ;Mg ²⁺	Variable
Vermiculita	capa 2:1	1.0 – 4.0	K ⁺ ;Mg ²⁺	Variable
Ilita	capa 2:1	1.3 – 2.0	K ⁺	Nulo
Mica	capa 2:1	2.0	K ⁺	Ninguno

Tabla 2.3 (Continuación)

Chlorita	capa 2:2	Variable	Capa de brucita	Nulo
Sepiolita	cadena 2:1	Nula	Ninguno	Nulo
Paligorskita	cadena 2:1	Menor	Ninguno	Nulo

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

En la tabla 2.3 se encuentra un resumen de los minerales que comúnmente encontramos en nuestro medio.

2.1.4 COMPOSICIÓN DE LOS LODOS BASE AGUA-ARCILLA

Las arcillas cumplen dos funciones: (1) proporcionar viscosidad al fluido de perforación, y (2) depositar un revoque que sellará las formaciones permeables para limitar las pérdidas por filtración y evitar el atascamiento de la tubería. En algunas áreas, la perforación puede ser iniciada con agua, dejando que los sólidos perforados se incorporen, produciendo suficientes propiedades para permitir la perforación del pozo.

En otras situaciones, se usan sistemas a base de polímeros cuando no se añade ninguna arcilla a la formulación. En los lodos base agua-arcilla, el agua constituye la fase líquida continua en la cual ciertos materiales son mantenidos en suspensión y otros materiales se disuelven. Se usa un gran número de aditivos de lodo para obtener propiedades especiales, pero, fundamentalmente, todos los componentes pueden ser divididos en tres categorías.

1. La fase acuosa es la fase continua del lodo. Según la ubicación y/o el agua disponible, ésta puede ser agua dulce, agua de mar, agua dura, agua blanda, etc. No es raro que se use una variedad de soluciones de salmueras, saladas a saturadas como líquido de base para preparar un sistema a base de agua.

2. La fase de sólidos reactivos se compone de arcillas comerciales, arcillas hidratables incorporadas y lutitas de las formaciones perforadas que son mantenidas en suspensión de la fase fluida. Estos sólidos son tratados químicamente para controlar las propiedades del fluido de perforación. Varios aditivos serán usados para obtener las propiedades deseadas.
3. Los sólidos inertes son los sólidos en suspensión que son químicamente inactivos. Éstos pueden ser sólidos de perforación inertes tales como la caliza, dolomita o arena. La barita es añadida al fluido de perforación para aumentar la densidad del fluido y también constituye un sólido inerte.

2.1.5 HIDRATACIÓN DE LAS ARCILLAS

El cristal de bentonita se compone de tres capas: una capa de alúmina con una capa de sílice encima y otra debajo. La laminilla de arcilla está cargada negativamente y una nube de cationes está relacionada con ésta. Si un gran número de estos cationes son sodio, la arcilla será frecuentemente llamada montmorillonita sódica.

Si los cationes son principalmente calcio, la arcilla será llamada montmorillonita cálcica. Según el número de cationes presentes, el espacio entre capas de la montmorillonita seca estará comprendido entre 9,8 Å (sodio) y 12,1 Å (calcio) y lleno de agua fuertemente ligada. Cuando la arcilla seca entra en contacto con agua dulce, el espacio entre capas se expande y la arcilla adsorbe una gran “envoltura” de agua. Estos dos fenómenos permiten que las arcillas generen viscosidad.

Como lo indica la Figura 2.8, las bentonitas a base de calcio sólo se expanden hasta 17 Å, mientras que la bentonita sódica se expande hasta 40 Å. Los cationes divalentes como Ca^{2+} y Mg^{2+} aumentan la fuerza de atracción entre las laminillas, reduciendo así la cantidad de agua que se puede adsorber. Los cationes

monovalentes como Na^+ producen una fuerza de atracción más débil, permitiendo que más agua penetre entre las laminillas.

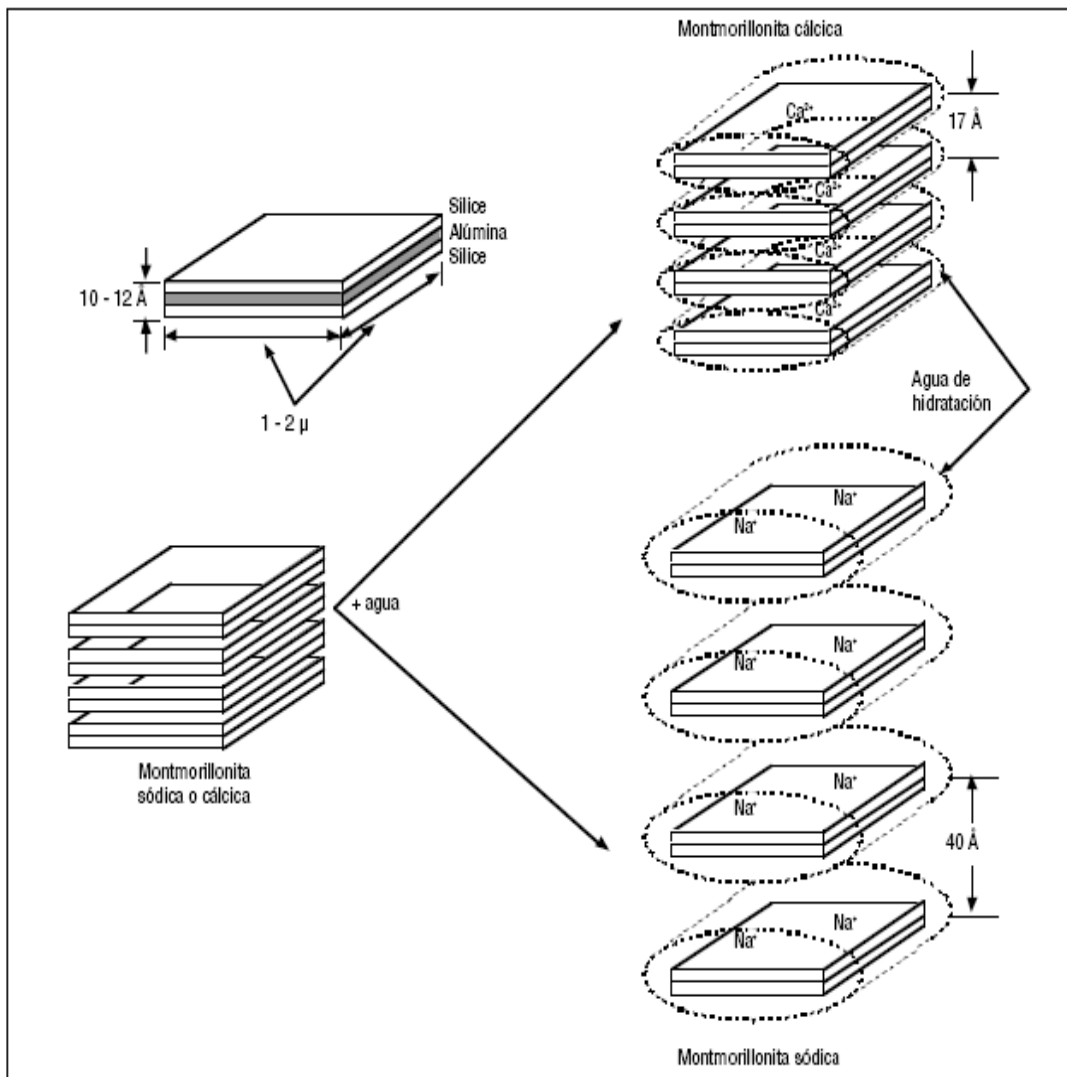


Figura 2.8 Comparación del hinchamiento para la montmorillonita cálcica y sódica
Fuente: M-I SWACO

Como la bentonita sódica se hincha cuatro veces más que la bentonita cálcica, la bentonita sódica generará una viscosidad cuatro veces más grande. Además de adsorber el agua y los cationes en las superficies exteriores, la esmectita adsorbe agua y cationes en las superficies entre las capas de su estructura cristalina. La

esmectita tiene una capacidad de adsorción de agua mucho mayor que otros minerales arcillosos.

La capacidad de adsorber agua, la cantidad de cationes intercambiables (CEC) y el área superficial son fenómenos muy relacionados entre sí que a veces son llamados propiedades coligativas de la arcilla.

Estas propiedades coligativas son básicamente medidas de la reactividad de la arcilla. Como la CEC es fácil de medir, se trata de un método práctico para evaluar la reactividad de la arcilla o lutita. La CEC de la arcilla se puede medir mediante una valoración de azul de metileno. Para medir la CEC, se usa una solución de azul de metileno 0,01 N, de manera que el número de milímetros de solución de azul de metileno requeridos para llegar al punto final sea igual a meq/100 g. El rango de CEC para minerales arcillosos puros se indica en la tabla 2.4:

ARCILLA	CEC (meq/100g)
Esmectita	80 – 150
Ilita	10 – 40
Clorita	10 – 40
Kaolinita	3 - 10

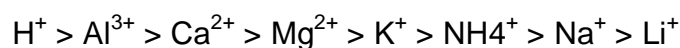
Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

La esmectita es claramente mucho más reactiva que otros materiales minerales arcillosos. Las lutitas que contienen esmectita son las más sensibles al agua y las más hidratables. Las lutitas que contienen otros minerales arcillosos tienen una menor capacidad de hidratación, aunque puedan ser sensibles al agua. La mayoría de las lutitas contienen varios tipos de arcillas en cantidades variables.

La reactividad de una lutita depende de los tipos y de las cantidades de minerales arcillosos presentes en la lutita. Muchas veces, la CEC constituye una mejor medida de la reactividad de la arcilla que el análisis mineralógico deducido del análisis de difracción de rayos X.

2.1.6 INFLUENCIA CATIONICA SOBRE LA HIDRATACION

Como se indicó anteriormente, el poder relativo de sustitución de un catión por otro está indicado por la siguiente secuencia:



Un catión puede servir de enlace para mantener unidas a las partículas del mineral arcilloso, lo cual reduce la hidratación. Los cationes multivalentes producen un enlace más fuerte entre las capas que los cationes monovalentes, lo cual resulta generalmente en la agregación de las partículas de arcilla. El potasio, un catión monovalente, constituye la excepción de la regla. Los cationes adsorbidos pueden hidratarse y atraer una envoltura de agua que tiene una forma definida.

El tamaño y la forma del catión hidratado afectan su capacidad de encajar entre las superficies entre capas de la arcilla y afectan tanto el hinchamiento de la arcilla como la hidratación de la arcilla. Los espacios dentro de las capas de montmorillonita cristalina son de 2,8 Å. Los pequeños iones, como el potasio, que encajan entre las capas de arcilla, son intercambiados con mayor facilidad y de manera permanente. Además, los cationes que aumentan de tamaño al hidratarse extienden las distancias entre capas para estimular la hidratación de la arcilla. El calcio es un buen ejemplo, teniendo un diámetro hidratado de 19,2 Å. El litio es otro ejemplo, teniendo tres moléculas de agua y un diámetro hidratado de 14,6 Å. Los cationes monovalentes que tienen grandes diámetros hidratados causan el mayor hinchamiento y la mayor dispersión. Los cationes multivalentes que tienen pequeños diámetros hidratados son los más inhibidores.

TABLA 2.5 Tabla comparativa de diámetros iónicos e hidratados

Catión	Diámetro Iónico (Å)	Diámetro Hidratado (Å)
Li ⁺	1.56	14.6
Na ⁺	1.90	11.2
K ⁺	2.66	7.60
NH ₄ ⁺	2.86	5.0
Mg ²⁺	1.30	21.6
Ca ²⁺	1.98	19.2
Al ³⁺	1.00	18.0

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

La tabla 2.5 presenta el diámetro iónico (cristalino) y el diámetro hidratado de los cationes que son comunes a los fluidos de perforación. Después de adsorberse en la región entre capas, los cationes hidratados pueden deshidratarse con el tiempo y ser expuestos a altas temperaturas para que las distancias entre capas se reduzcan y que los cationes se vuelvan menos reactivos.

2.1.7 PROCESOS DE ENLACE DE LAS PARTÍCULAS DE ARCILLA

Además de conocer la cantidad y calidad de las arcillas de un lodo, se requiere conocer el estado de asociación de las partículas de arcilla. Los distintos procesos de enlace de las partículas de arcilla son importantes para la reología de las suspensiones de arcilla. Estos procesos de enlace deben ser comprendidos para entender y controlar los cambios reológicos en los fluidos de perforación.

Las partículas laminares finas y planas de arcilla tienen dos superficies diferentes. La cara grande o superficie planar está cargada negativamente y la superficie fina del borde está cargada positivamente donde se interrumpe la red y se expone la superficie del enlace roto. Estas cargas eléctricas y los cationes intercambiables

crean alrededor de las partículas de arcilla un campo de fuerzas eléctricas que determina la manera en que dichas partículas interactúan unas con otras.

Si los iones intercambiables se disocian de la superficie de la arcilla, la fuerza repulsiva entre las láminas cargadas negativamente es grande y las láminas se dispersarán, alejándose las unas de las otras. La dispersión completa es rara y es probable que sólo pueda ocurrir en suspensiones diluidas de montmorillonita sódica purificada.

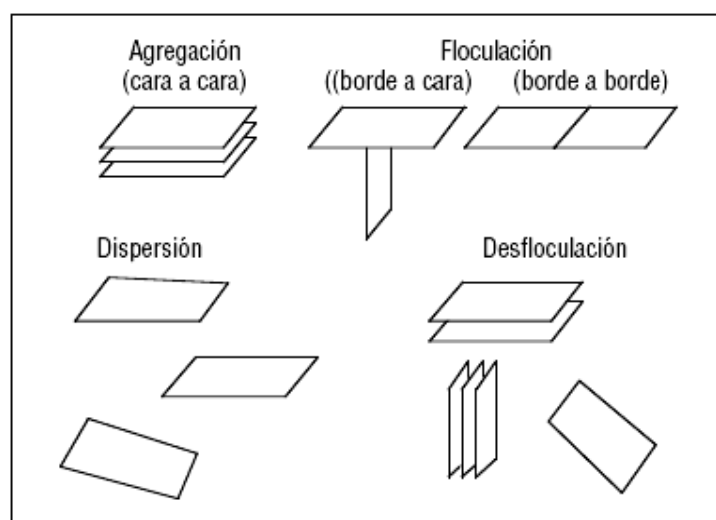


Figura 2.9 Procesos de enlace de las partículas de arcilla
Fuente: M-I SWACO

En general se produce un cierto grado de enlaces entre las partículas. Las partículas de arcilla se asocian cuando están en uno de los siguientes estados: agregación, dispersión, floculación o desfloculación como se presentan en la Figura 2.9. Pueden estar en uno o varios estados de asociación al mismo tiempo, con un estado de asociación predominando.

La agregación (enlace de cara a cara) resulta en la formación de láminas o paquetes más gruesos. Esto reduce el número de partículas y causa una reducción de la viscosidad plástica. La agregación puede ser causada por la introducción de cationes divalentes, tales como Ca^{2+} , en el fluido de perforación. Esto podría resultar

de la adición de cal o yeso, o de la perforación de anhidrita o cemento. Después del aumento inicial, la viscosidad disminuirá con el tiempo y la temperatura, hasta llegar a un valor inferior al valor inicial.

La dispersión, reacción contraria a la agregación, resulta en un mayor número de partículas y viscosidades plásticas más altas. Las laminillas de arcilla son normalmente agregadas antes de ser hidratadas y cierta dispersión ocurre a medida que se hidratan. El grado de dispersión depende del contenido de electrolitos en el agua, del tiempo, de la temperatura, de los cationes intercambiables en la arcilla y de la concentración de arcilla. La dispersión es más importante cuando la salinidad es más baja, los tiempos más altos, las temperaturas más altas y la dureza más baja. Incluso la bentonita no se dispersa totalmente en agua a la temperatura ambiente.

La floculación se refiere a la asociación de borde a borde y/o borde a cara de las partículas, resultando en la formación de una estructura similar a un “castillo de naipes”. Esto causa un aumento de la viscosidad, gelificación y filtrado. La severidad de este aumento depende de las fuerzas que actúan sobre las partículas enlazadas y del número de partículas disponibles para ser enlazadas. Cualquier cosa que aumenta las fuerzas repulsivas entre las partículas o causa la contracción de la película de agua adsorbida, tal como la adición de cationes divalentes o las temperaturas elevadas, puede fomentar la floculación.

La desfloculación es la disociación de las partículas floculadas. La adición de ciertos productos químicos al lodo neutraliza las cargas electroquímicas en las arcillas. Esto elimina la atracción que resulta del enlace borde a borde y/o borde a cara entre las partículas de arcilla. Como la desfloculación causa una reducción de la viscosidad, los productos químicos desfloculantes son frecuentemente llamados diluyentes de lodo. La desfloculación también permite la disposición plana de las partículas de arcilla en el revoque para reducir el filtrado.

2.1.8 EFECTO DEL pH

En este momento, también resulta pertinente considerar el efecto del pH sobre el rendimiento de la bentonita. La mayoría de todos los lodos de perforación son tratados de manera que sean alcalinos, es decir que deberían tener un pH mayor de 7. Como el pH no afecta la viscosidad, una de las principales consideraciones es la selección del rango de pH más deseable para optimizar las propiedades reológicas del fluido de perforación.

Cuando el pH es mayor de 9,5, la dispersión de la arcilla aumenta, incrementando la viscosidad del fluido de perforación. Anteriormente, se puso énfasis en la obtención de la mayor viscosidad a partir de la adición más pequeña de material. La importancia del pH es que la viscosidad creada por valores superiores a 10 a veces no guarda proporción con lo que se considera ser las propiedades deseables del lodo. Por razones obvias, tales como seguridad y corrosión, los lodos de perforación casi nunca son utilizados dentro del rango ácido con un pH inferior a 7.

2.2 PROBLEMAS CON LUTITAS INESTABLES

Las lutitas desmoronables son uno de los problemas más comunes asociados a la inestabilidad del hoyo. No existen soluciones simples para este problema, pero una combinación de una buena práctica de perforación y un buen programa de lodo ayudarán a minimizar su ocurrencia.

Los problemas relacionados con inestabilidad del hoyo en secciones lutíticas son:

- Limpieza del hoyo ineficiente.
- Atascamiento de tubería y operaciones de pesca.
- Incremento en el costo del tratamiento al lodo.
- Malas cementaciones.
- Problemas de derrumbes.

- Dificultades para correr registros.
- Ensanchamiento del hoyo.
- Necesidad de revestidores intermedios.
- Pérdida de tiempo en la perforación por la necesidad de repasar el hoyo.

Los principales factores mecánicos en los problemas con lutitas son:

2.2.1 EROSIÓN DEBIDO A ALTAS VELOCIDADES ANULARES.

Aplicación de técnicas inadecuadas de perforación como: presión de surgencia, acción de suabeo, entre otras.

2.2.2 INVASIÓN DE FILTRADO HACIA LA FORMACIÓN Y REACCIÓN DESFAVORABLE DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN CON LAS FORMACIONES INESTABLES.

La inestabilidad de las lutitas puede ser el resultado de las siguientes fuerzas solas o combinadas:

- Presión de sobrecarga.
- Presión de poros.
- Fuerzas tectónicas.
- Absorción de agua.

Desprendimientos de lutitas tienen lugar cuando secciones no perforadas de formaciones de lutitas entran en el pozo. Cuando se presenta este problema, se observa un aumento de ripios en el tamiz de la zaranda. A menudo un cambio en el tamaño y forma de los ripios acompaña el cambio de volumen. La presión de bomba tiende a aumentar a medida que el espacio anular es sobrecargado por el aumento de volumen de los ripios.

Este aumento en la presión de bomba es generalmente lento, si bien en algunos casos puede ser en forma acelerada. La torsión y el arrastre aumentan a medida que el espacio anular se sobrecarga con los desmoronamientos provenientes de la zona la cual tiene problemas. Esto puede conducir al aprisionamiento de la sarta. Cuando se hace un viaje, el arrastre se hace anormalmente acentuado. Esto es particularmente cierto cuando pasan los portamechas a través de secciones del pozo de diámetro estrecho. También al regresar al fondo se encuentra un llenado excesivo, como resultado de que los desmoronamientos se añaden a la cantidad de recortes que se sedimentan hacia el fondo durante el viaje.

Los problemas que aparecen como resultado de la entrada al pozo de secciones no perforadas de lutitas pueden describirse clasificando el problema según los siguientes tres tipos de lutitas.

- Portadoras de gas.
- Bentoníticas.
- Frágiles y fracturadas.

La lutita que contiene pequeñas arenas lenticulares o lutita arenosa que está cargada con gas a alta presión, es probable que se desprenda a menos que la presión hidrostática de la columna fluida sea suficiente por lo menos para balancear la presión de la formación. Si se perfora por debajo de la presión de equilibrio, la falta de tensión sobre el lado adyacente a la pared del pozo hace que la lutita se desprenda o sea arrojada dentro del pozo debido a las diferencias de presión.

Los primeros síntomas de este problema serán usualmente el aumento de arrastre y de torsión. El estrechamiento del pozo se debe probablemente a la obturación en ciertas zonas de diámetro en buen calibre. El lodo se contaminará usualmente con

gas sin que haya cambios apreciables en las propiedades del lodo, el que puede adquirir un aspecto esponjoso.

El tratamiento primario consiste en aumentar la densidad del lodo en grado suficiente para exceder la presión existente dentro de la formación. Las resistencias del gel y la viscosidad se deben mantener en valores bajos, para que el gas atrapado se pueda remover mecánicamente y salga fácilmente del lodo. La baja viscosidad y resistencia de gel ayudará también a evitar el succionamiento de la lutita hacia el pozo cuando se extrae la tubería. Una ayuda secundaria puede obtenerse al agitar el lodo en los tanques con las escopetas sumergidas a fin de ayudar el escape de gas contenido en el lodo.

La lutita bentonítica contiene arcillas coloidales que se parecen a una montmorillonita de buena calidad en su capacidad de hidratación. Como consecuencia, la penetración de este tipo de lutita se caracteriza por un aumento de la viscosidad y frecuentemente por una reducción de pérdida de filtrado. La hidratación de la lutita bentonítica hace que se hinche y se incorpore en el lodo.

En algunos casos, puede minimizarse la hidratación de estas formaciones mediante la reducción de la pérdida de filtrado del lodo, con lo que disminuye la cantidad de agua disponible para la hidratación de las lutitas. Sin embargo, el uso de un sistema inhibitor usualmente tiene más éxito en el control de esos sólidos hidratables.

La inhibición puede lograrse mediante la adición de una sal soluble que provea un catión capaz de intercambiarse con el ión de ligadura de la arcilla. El mismo efecto puede conseguirse empleando un polímero, que tienda a encapsular las lutitas bentoníticas y a reducir la cantidad de agua disponible para la hidratación de la arcilla. Adiciones de sal para controlar la inhibición osmótica del agua se utilizan también frecuentemente de modo que la acción osmótica deshidrata las lutitas en vez de hidratarlas.

Formaciones de lutitas que han sido elevadas a un ángulo mayor que el normal pueden tender a ingresar al pozo por flujo plástico cuando son penetradas por la broca, reduciendo las tensiones cerca del pozo. A medida que el fluido penetra en esas lutitas e iguala las presiones, pueden tender a deslizarse en el interior del pozo debido a fuerzas de sobrecarga.

Para el tratamiento de los problemas de lutitas frágiles y fracturadas, es importante reducir al mínimo la pérdida de filtrado del lodo, con el fin de evitar humedecer esas lutitas. La adición de materiales asfálticos también contribuye al control, pues esos materiales se intercalan dentro de los estratos, reduciendo la pérdida de filtrado, proveyendo un efecto taponante a nivel de los mismos.

Un aumento de la densidad del lodo también ayuda a mantener esas lutitas en su lugar, cuando se puede tolerar un incremento de densidad sin peligro de pérdida de circulación. Es aconsejable mantener bajas viscosidades para evitar el desprendimiento por succión de estas lutitas dentro del pozo. Cuando no se puede aumentar la densidad sin ocasionar pérdida de circulación, puede aumentarse la viscosidad para ayudar a contener la lutita y limpiar mejor el hoyo, pero las resistencias de gel deben ser de valores bajos para impedir la succión de esas lutitas.

El problema de los desprendimientos de lutitas no tiene una solución única o definida. Cada situación debe evaluarse independientemente de las demás. Sin embargo, si se conoce el tipo de lutita involucrada en el problema, el tratamiento puede prescribirse con mayor precisión. Dado que muchos problemas de lutitas se originan en causas mecánicas, estas se deben investigar ante todo, y si se diagnostica una causa mecánica debe procederse a corregirla.

Buenas prácticas de perforación, como las que se citan a continuación nos ayudan en el problema de lutitas.

- Mantener un buen control de la densidad del lodo.

- Mantener las propiedades reológicas adecuadas en el fluido utilizado.
- Controlar la pérdida de filtrado.
- Mantener unas velocidades anulares no muy elevadas para no erosionar las paredes del hoyo.
- Mantener el hoyo lo más vertical posible.
- No sacar ni meter la sarta de perforación muy rápidamente.
- Preparar buenos programas de revestidores.

2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS AMINAS EN LA INHIBICIÓN

Químicos derivados del amoniaco incluyen aminas, amidas, poli-aminas, iminas, nitrilos y aminoácidos son usados como componentes en algunos lodos base agua. Estos químicos están dirigidos a contribuir en la estabilidad de las arcillas y las lutitas.

El cloruro de amonio fue probado hace más de 30 años como un inhibidor de arcillas, el fosfato de di-amonio ha sido usado durante más de 20 años. Las aminas orgánicas se las adicionó a los fluidos de perforación hace 15 años para la buena suspensión y transporte de los recortes y la estabilidad del pozo. La compleja química de las aminas en la actualidad es mejor entendida y sus aplicaciones se extienden cada vez más.

La inestabilidad de las arcillas es un constante y costoso problema en la perforación a pesar del creciente empleo de fluidos en que su fase continua no es el agua (no acuosos) que incluyen aceites minerales, ésteres u otros portadores no acuosos. Las arcillas constituyen más del 75% de formación taladrada y causa más del 90% de problemas en la inestabilidad de los pozos. Pero estos fluidos no acuosos tienen una limitante importante, su costo, por lo que los fluidos base amina/polímeros en sistemas en los que el agua es su fase continua se han desarrollado proporcionando

una importante evolución en procesos de perforación en formaciones en las que la arcilla y lutitas son el mayor problema.

Cuando los lodos base agua han sido expuestos, las arcillas tienden inmediatamente a hincharse ante el contacto con los fluidos base agua. Dependiendo de la composición química de las arcillas, estas pueden resultar en una rápida expansión o dispersión de la arcilla matriz en la presión de formación.

Alterando la química de la fase acuosa (por ejemplo las altas concentraciones de aniones) pueden retardar los efectos del agua, o por inclusión de cationes activos (calcio y potasio) el intercambio catiónico puede ser reducido.

Como se pudo apreciar en la Tabla 2.5 el ion Potasio y el ion Amonio son los iones que en estado de hidratación son los que menor tamaño presentan. De estos dos aniones citados se seleccionará el ion Potasio por estar presente en los principios activos de los compuestos que forman parte del lodo base amina con el que se perfora el Pozo "X".

El ion Potasio es considerado como el mejor ion intercambiable ya que su radio iónico tiene un diámetro muy pequeño (Tabla 2.5). De esta manera, las capas están unidas fuertemente y se produce una estructura no-expandible. Estas características de interacción del ion Potasio con la superficie de las arcillas pueden ser relacionadas con dos efectos: tamaño iónico y energía de hidratación.

Cuando el sistema potásico es deshidratado, las láminas tetraédricas de los cristales adyacentes se contactan y el Potasio pierde su envoltura de agua orientada y se hace más pequeño. A medida que el proceso prosigue, el efecto de concentración puede forzar al ion hacia el espacio libre de la superficie expuesta. Una vez en posición, es mantenido fuertemente y:

- El Potasio está lo más cercano posible al centro de la carga negativa del cristal adyacente.
- La estructura cerrada evita rehidratación cuando es expuesto al agua.
- El Potasio tiene una tendencia menor a ser intercambiado por otro ion, ya que su estructura esta deshidratada.

Otros iones no permiten un acercamiento tan estrecho de las capas. El Sodio y el Calcio que se encuentran normalmente en la esmectita, podrían entrar en el espacio cristalino, pero son muy pequeños para unir completamente las láminas. La rehidratación lleva al entrapamiento de una capa de agua y a la oportunidad de intercambio.

El ion Potasio tiene la segunda energía de hidratación más baja. Esta baja hidratación produce deshidratación interlaminar y colapso de las capas. Se puede inducir, que el ion Potasio está formado de una estructura compacta fuertemente agarrada.

Los problemas de estabilización de las lutitas ocurren de la siguiente manera:

Cuando la esmectita está presente, el intercambio de Potasio por Sodio y Calcio crea una estructura más estable y menos hidratable. En cambio; con las ilitas, el ion Potasio reemplaza cualquier ion intercambiable (impureza) en la estructura y expone toda la lutita al ambiente del mismo ion aglomerante que mantiene a la ilita unida.

La cantidad de intercambio de base que ocurre es substancialmente reducida, especialmente para altos contenidos de ilita, y la lutita permanece estable. En las arcillas de capas mixtas, el Potasio trabaja en ambos lados de la ilita y la esmectita, reduciendo la cantidad de hinchazón diferencial que ocurre. “El ion Potasio trabaja mejor en las lutitas que tienen un alto porcentaje de ilita o ilita/esmectita mezclados en combinación de láminas en la fracción de arcillas”. Sin embargo, los iones de Potasio hidratados son lo suficientemente pequeños como para penetrar las lutitas

no hidratables; la adsorción selectiva del ion Potasio limita aun más la hidratación o hinchazón de la formación.

Con las lutitas hidratadas e hinchadas, los iones de Calcio hidratados pueden penetrar fácilmente entre las láminas de arcilla para evitar la hidratación y puede ocurrir un ablandamiento posterior, ya que ellos previenen el intercambio de bases iónicas entre los iones de calcio de formación.

2.3.1 PHPA – POLIACRILAMIDAS PARCIALMENTE HIDROLIZADAS

Poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas o PHPA son vistas como una prima de los sistemas base catión de amonio. El primer campo de prueba del cloruro de potasio PHPA fue controlado en 1969 en Canadá. PHPA y sus variantes siguen siendo usados en varias formulaciones de lodo inhibidor.

En lodos PHPA usados en el Mar del Norte, prefieren lodos con activos de cloruro de potasio como cationes intercambiables para reemplazar o excluir el sodio y prevenir el hinchamiento de las arcillas. En los Estados Unidos en el Golfo de México el lodo PHPA es usado con un nivel del 18-22% de cloruro de sodio.

La poliacrilamida sola es insoluble, por lo tanto debe ser combinada con acrilato de sodio para obtener la solubilidad en agua. La combinación con el acrilato de sodio produce una amina aniónica que es hidrosoluble. A esta combinación final se la conoce como PHPA. Durante la combinación de esta amina con el acrilato de sodio, estos dos compuestos se enlazan de manera aleatoria para formar una cadena principal lineal de carbono-carbono.

Este compuesto resultante tiene grupos carboxilo y grupos amida distribuidos de manera aleatoria a lo largo de su cadena principal. La amina resultante está ilustrada en la Figura 2.10.

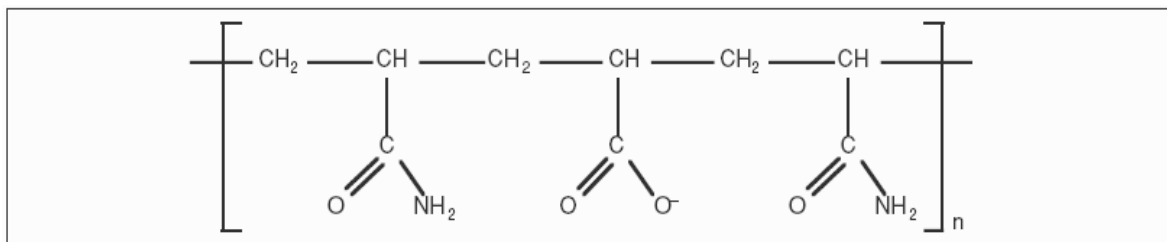


Figura 2.10 Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada

Fuente: M-I SWACO

Cabe notar que, debido al enlace carbono-carbono, la amina tiene una estabilidad térmica excepcional y es resistente a las bacterias. También cabe notar que la amina es aniónica, es decir que es afectada por la dureza y las superficies catiónicas como las que se encuentran en las arcillas.

La amina PHPA se usa como inhibidor de lutita y como polímero encapsulador de sólidos en los sistemas de agua dulce, agua salada, NaCl y KCl. Además de sus propiedades inhibidoras de lutita, también proporciona la encapsulación de los recortes y la viscosidad en los sistemas de agua dulce.

La característica inhibidora de lutita de la PHPA ocurre cuando la amina se agrega a las arcillas en el pozo y bloquea la hidratación y la dispersión que suelen producirse normalmente.

Los grupos carboxilo aniónico se agregan a las cargas positivas en los bordes de las partículas de arcilla. Como la amina tiene un alto peso molecular y es relativamente larga, esta amina se combina con varios sitios a lo largo del pozo. Esto tiene como resultado el revestimiento del pozo y la limitación del agua que entra en la arcilla. El mismo efecto puede ser observado en los recortes. La amina ayuda a conservar la integridad de los recortes, lo cual facilita considerablemente la remoción de los recortes en la superficie. La PHPA también contribuye a la estabilización de las lutitas aumentando la viscosidad de la fase acuosa. La PHPA aumenta la viscosidad

del filtrado de fluido de perforación, lo cual limita la profundidad de invasión del filtrado.

Aunque el agua pueda penetrar bien dentro de una lutita, un filtrado de PHPA grueso se enfrenta a una resistencia mucho más grande, debido a la acumulación rápida de presiones capilares. Esto reduce la cantidad de agua de filtrado disponible para la hidratación. También limita la capacidad de un filtrado para entrar en un pequeño plano de fisura o de fractura dentro de una lutita.

Se cree que un poliacrilato de peso molecular alto tiene demasiada afinidad con las cargas positivas de las arcillas. El grupo amida ayuda, proporcionando cierta distancia entre los grupos carboxilo fuertemente aniónicos y los sitios catiónicos en las partículas de arcilla. Cuando los grupos amida y los grupos carboxilo están distribuidos de manera uniforme a lo largo de la cadena de la amina, el volumen del grupo amida impide que el grupo carboxilo se aproxime demasiado a las cargas de arcilla y separe las arcillas.

El grupo acrilamida también tiene una afinidad con la superficie de la arcilla, pero se trata de un enlace de hidrógeno relativamente débil en comparación con la fuerte interacción iónica entre el grupo carboxilo y los bordes cargados positivamente en las partículas de arcilla. El grupo acrilamida es capaz de formar enlaces de hidrógeno a lo largo de la superficie de la arcilla. Aunque no sean tan fuertes como la interacción iónica que ocurre al lado, estos enlaces de hidrógeno sirven para mantener la interacción entre la amina y la arcilla, así como para establecer cierta distancia entre las cargas libres.

2.3.2 MATERIALES CATIÓNICOS ORGÁNICOS – POLÍMEROS CATIÓNICOS CUATERNARIOS

El grupo de los cationes de las aminas cuaternarias son fuertemente adsorbidos en las arcillas, reduciendo esta carga y repeliendo fuerzas, inhibiendo el hinchamiento y

la dispersión. Típicamente estos polímeros pueden contener de 400 a 7000 cationes. Esto significa que los polímeros catiónicos con la arcilla se asocian en un proceso irreversible.

Los sistemas polímero catiónicos pueden ser los lodos base agua más inhibidores que existen. Los polímeros catiónicos parecen absorberse sobre la superficie cargada negativamente de las arcillas.

El mecanismo de adsorción es compatible con una reacción de intercambio iónico. Este intercambio catiónico fue demostrado en un experimento de laboratorio donde una suspensión de bentonita en agua destilada fue mezclada con una solución de polímero catiónico. La medición sobre el agua filtrada, dos horas más tarde de la mezcla, indicó una reducción en la concentración del polímero catiónico y un aumento marcado tanto del sodio soluble como del contenido de calcio.

El polímero es muy grande comparado a materiales catiónicos más simples. El tamaño de la molécula previene la penetración en los poros de la arcilla o baja permeabilidad en las zonas productoras. Los polímeros catiónicos son típicamente aplicados en un rango de 3 a 8 libras por barril de concentración del mismo.

CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO

3.1 PRUEBAS DE LABORATORIO EN LOS FLUIDOS

Las propiedades de los fluidos de perforación determinados por los métodos de prueba rutinarios, pueden ser usadas como una guía tanto cualitativa como cuantitativa para controlar su comportamiento. Los métodos de prueba están escritos en detalle en los boletines API RP-13B1, API RP-13B2 y el API RP-13G.

Las propiedades físicas y químicas deben ser controladas apropiadamente para que rindan durante la perforación y las actividades de reparación.

En el laboratorio se desarrolla una serie de pruebas donde se analiza la reología del lodo, sus propiedades de viscosidad, filtrado y análisis de cantidad de cloruros, calcio, Pf y Mf, concentraciones de sales, entre otros.

Estas pruebas que se detallan a continuación se las realizaron específicamente a fluido de perforación con la finalidad de verificar que este lodo se encuentra bien formulado y no represente problemas en el análisis que se realizaron con las pruebas especiales.

Los rangos permisibles de las pruebas básicas se encuentran especificados en cada descripción de las pruebas citadas, para su posterior análisis del fluido de perforación base amina.

3.1.1 DENSIDAD

La densidad del lodo o peso del lodo es realmente una medida de la densidad expresada en términos de masa por el volumen del lodo. Debido a que la exactitud del valor del peso del lodo es crítico para la seguridad de la operación de perforación, las personas responsables del pozo deben asumir periódicamente por si solos la responsabilidad de medir el peso del lodo y de tener calibrado el equipo. Idealmente, densidades de lodo tan bajas como la densidad de aceites refinados son las deseadas con el objetivo de lograr una óptima rata de perforación y para minimizar las pérdidas de circulación. Sin embargo, en la práctica, densidades de lodo que excedan hasta en 2 y media veces la densidad del aceite pueden ser necesarias para controlar la entrada de fluidos de la formación y prevenir los reventones de pozo o para controlar el colapso del pozo en formaciones con problemas.

3.1.1.1 Medición de Densidad



Figura 3.1 Balanza de lodo
Fuente: M-I SWACO

La balanza de lodo (Figura 3.1) se compone principalmente de una base sobre la cual descansa un brazo graduado con un vaso, tapa, cuchillo, nivel de burbuja de aire, caballero y contrapeso. Se coloca el vaso de volumen constante en un extremo

del brazo graduado, el cual tiene un contrapeso en el otro extremo. El vaso y el brazo oscilan perpendicularmente al cuchillo horizontal, el cual descansa sobre el soporte, y son equilibrados desplazando el caballero a lo largo del brazo. La densidad del lodo base amina para la segunda sección del Pozo X (Sección 12 ¼") es de 9.8 Lpg.

3.1.1.1.1 Procedimiento medición de Densidad

1. Quitar la tapa del vaso y llenar completamente el vaso con el lodo a probar.
2. Volver a poner la tapa y girar hasta que esté firmemente asentada, asegurándose que parte del lodo sea expulsado a través del agujero de la tapa.
3. Limpiar el lodo que está fuera del vaso y secar el vaso.
4. Colocar el brazo de la balanza sobre la base, con el cuchillo descansando sobre el punto de apoyo.
5. Desplazar el caballero hasta que el nivel de burbuja de aire indique que el brazo graduado está nivelado.
6. En el borde del caballero más cercano al vaso, leer la densidad o el peso del lodo.
7. Ajustar el resultado a la graduación de escala más próxima, en lb/gal, lb/pie³, psi/1.000 pies de profundidad o en Gravedad Específica (SG).

$$SG = \frac{lb/gal}{8.345} \text{ o } \frac{lb/pie^3}{62.3} \text{ o } \frac{g}{cm^3}$$

Gradiente de lodo:

$$\begin{aligned} \frac{psi}{pie} &= 0,052 \times lb/gal \\ &= 0,4333 \times SG \\ &= 0,00695 \times lb/pie^3 \end{aligned}$$

3.1.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Reología es la ciencia que trata de la deformación y del flujo de la materia. Al tomar ciertas medidas en un fluido, es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura, la presión y la velocidad de corte. Las propiedades reológicas fundamentales del lodo de perforación son: Viscosidad de Embudo, Viscosidad Plástica, Punto de Cedente, Resistencia al Gel. La viscosidad que puede considerarse como la resistencia al flujo (o relativamente espeso) de un fluido, es un término reológico común utilizado en la industria del petróleo.

La medida de las propiedades reológicas de un fluido es importante en el cálculo de las pérdidas de presión por fricción; en la determinación de la capacidad del lodo para levantar recortes y derrumbes a la superficie; en el análisis de la contaminación del lodo por sólidos, químicos o temperatura; y en la determinación de cambios de presión en el pozo durante una extracción. Las propiedades fundamentales son viscosidad y fuerza de gel.

3.1.2.1 Medición De Reología

Los viscosímetros de indicación directa son instrumentos de tipo rotativo accionados por un motor eléctrico o una manivela (Figura 3.2). El fluido de perforación está contenido dentro del espacio anular entre dos cilindros concéntricos.

El cilindro exterior o manguito de rotor es accionado a una velocidad rotacional (RPM – revoluciones por minuto) constante. La rotación del manguito de rotor en el fluido impone un torque sobre el balancín o cilindro interior. Un resorte de torsión limita el movimiento del balancín y su desplazamiento es indicado por un cuadrante acoplado al balancín.

Las constantes del instrumento han sido ajustadas de manera que se pueda obtener la viscosidad plástica y el punto cedente usando las indicaciones derivadas de las velocidades del manguito de rotor de 600 y 300 RPM.



Figura 3.2 Viscosímetro Rotativo
Fuente: M-I SWACO

El rango de valores permisibles para el lodo base amina en:

TABLA 3.1 Rango de valores aceptables en prueba de reología y geles

	Rango de valores aceptables
Viscosidad Plástica (VP)	19 – 24
Punto Cedente (YP)	23 - 28
Geles	Los 3 valores semejantes pero menores al diámetro de la broca

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

3.1.2.1.1 Procedimiento Para La Determinación De La Viscosidad Aparente, La Viscosidad Plástica Y El Punto Cedente

1. Colocar la muestra recién agitada dentro de un vaso térmico (termo cup) y ajustar la superficie del lodo al nivel de la línea trazada en el manguito de rotor.

2. Calentar o enfriar la muestra hasta 120°F (49°C). Agitar lentamente mientras se ajusta la temperatura.
3. Arrancar el motor colocando el conmutador en la posición de alta velocidad, con la palanca de cambio de velocidad en la posición más baja. Esperar que el cuadrante indique un valor constante y registrar la indicación obtenida a 600 RPM. Cambiar las velocidades solamente cuando el motor está en marcha.
4. Ajustar el conmutador a la velocidad de 300 RPM. Esperar que el cuadrante indique un valor constante y registrar el valor indicado para 300 RPM.
5. Viscosidad plástica en centipoise = indicación a 600 RPM menos indicación a 300 RPM (Figura 3.3)
6. Punto Cedente en $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ = indicación a 300 RPM menos viscosidad plástica en centipoise (Figura 3.3).

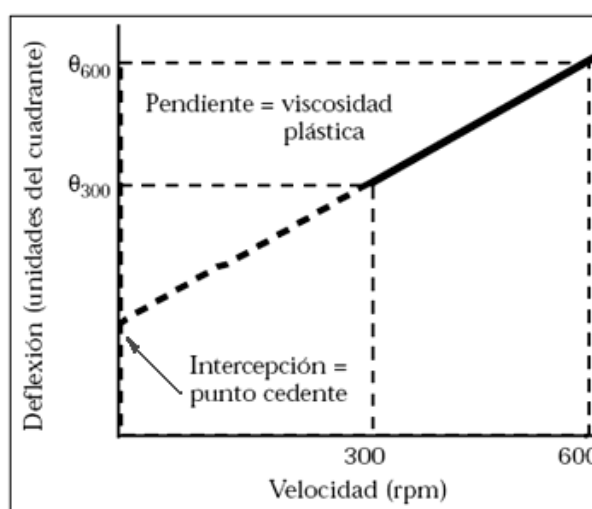


Figura 3.3 Curva típica de caudales para un lodo de perforación

Fuente: M-I SWACO

3.1.2.1.2 Procedimiento Para La Determinación Del Esfuerzo De Gel

1. Agitar la muestra a 600 RPM durante aproximadamente 15 segundos y levantar lentamente el mecanismo de cambio de velocidad hasta la posición neutra.

2. Apagar el motor y esperar 10 segundos.
3. Poner el conmutador en la posición de baja velocidad y registrar las unidades de deflexión máxima en $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ como esfuerzo de gel inicial. Si el indicador del cuadrante no vuelve a ponerse a cero con el motor apagado, no se debe reposicionar el conmutador.
4. Repetir las etapas 1 y 2, pero dejar un tiempo de 10 y 30 minutos y luego poner el conmutador en la posición de baja velocidad y registrar las unidades de deflexión máxima como esfuerzo de gel a 10 minutos. Indicar la temperatura medida.

3.1.3 PÉRDIDA DE FILTRADO API

La circulación de fluido de perforación a lo largo de la cara de una formación permeable crea un proceso de filtración donde los sólidos presentes en el lodo son retenidos en la cara de la formación y la fase continua del lodo se va hacia la formación.

La pérdida de filtrado de un fluido de perforación es por ello una propiedad que tiene influencia directa en la rata de perforación, en problemas del hueco en áreas de lutitas degradables, en el daño a la formación en yacimientos sensibles y en problemas de pegas diferenciales en zonas permeables.

3.1.3.1 Medición De Pérdida De Filtrado API

La propiedad de filtración o formación de paredes de un lodo es determinada con un filtroprensa. La prueba consiste en determinar la velocidad a la cual se fuerza un fluido a través del papel filtro. La prueba es realizada bajo las condiciones de tiempo, temperatura y presión especificadas. La prueba de filtrado API es realizada a la temperatura superficial y a una presión de 100 psi, de esta manera se determina la velocidad a la cual se fuerza un fluido a través de papel filtro y los resultados se registran como número de mililitros perdidos en 30 minutos. Después

de la prueba se mide el espesor del revoque sólido que se ha asentado. Los valores permisibles de filtrado para un lodo nuevo sin rolar es de hasta 5 mL, posterior manejo del lodo rolado con un máximo de filtrado de lodo de 10mL.

La filtro prensa usado debería cumplir con las especificaciones indicadas en la Práctica Recomendada de API y la prueba debería ser realizada de la manera recomendada. Este instrumento consta de una celda de lodo, un regulador de presión y un medidor montado encima de la caja de transporte o en la parte superior de la unidad de laboratorio móvil. Se usa un adaptador de acoplamiento para conectar la celda al regulador, simplemente introduciendo el empalme macho de la celda dentro del empalme hembra del filtro prensa y dando un cuarto de vuelta en sentido horario.



Figura 3.4 Filtroprensa API
Fuente: www.ofite.com

Algunas celdas no tienen este dispositivo de cierre y son simplemente introducidas dentro del acoplamiento apropiado. La celda se cierra en la parte inferior con una tapa provista de una tela metálica (o rejilla), colocando la tapa firmemente contra el papel filtro y girando hacia la derecha hasta que quede apretada a mano. Esto empuja la hoja de papel filtro contra la junta tórica que fue previamente introducida

en la base de la celda. La presión es proporcionada por un pequeño cartucho de gas carbónico. Se proporciona una válvula de purga para aliviar la presión antes de desacoplar la celda.

3.1.3.1.1 Procedimiento prueba Filtroprensa

1. Mantener disponible una presión de aire o gas de 100 psi.
2. Retirar la tapa de la parte inferior de la celda limpia y seca. Colocar la junta tórica en una ranura en buen estado y volver la celda al revés para llenarla. Cualquier daño mecánico podría perjudicar la hermeticidad de la celda. Obturar la entrada con un dedo.
3. Llenar la celda con lodo hasta $\frac{1}{4}$ pulgada de la ranura de la junta tórica. Colocar el papel filtro (Nº 50 o equivalente) encima de la junta tórica. Colocar la tapa encima del papel filtro con las bridas de la tapa entre las bridas de la celda, y girar en sentido horario hasta que quede apretada a mano. Invertir la celda, introducir el empalme macho de la celda dentro del empalme hembra del filtro prensa y girar en cualquier sentido para bloquear.
4. Colocar un cilindro graduado apropiado debajo del orificio de descarga de filtrado para recibir el filtrado.
5. Abrir la válvula de entrada aplicando presión sobre la celda. (Se puede observar que la aguja oscila rápidamente hacia abajo a medida que la presión llena la celda.)
6. La prueba de API dura normalmente 30 minutos. Al término de la prueba, cerrar la válvula. Después de desconectar la fuente de presión, la presión se purgará automáticamente. Retirar la celda.
7. Registrar el filtrado en mililitros, a menos que se especifique de otra manera.
8. Desmontar la celda, desechar el lodo y recuperar el papel filtro con mucho cuidado para perturbar lo menos posible el revoque. Lavar el revoque minuciosamente para eliminar el exceso de lodo. Medir el espesor del revoque y registrar la medida en $\frac{1}{32}$ de pulgada.

3.1.4 CONTENIDO DE ARENA

La medida del contenido de arena es un indicativo de cómo efectivamente las partículas que son retenidas en la malla 200 están siendo removidas del fluido de perforación. Puede ser usado como una base para el tratamiento del lodo, pero principalmente se usa como una base para evaluar el funcionamiento apropiado del equipo de control de sólidos, de las facilidades de asentamiento y de los procedimientos de operación. La presencia de arena y sólidos en general están directamente asociados con la corrosión debido a que a altas velocidades, altas temperaturas y presiones significativas de trabajo, eliminan o erosionan películas pasivas sobre un metal (equipos, bombas, tubería, etc.) pudiendo dejar desnuda la superficie de dicho metal y exponiéndolo a la corrosión.

El contenido de arena del lodo se calcula usando una malla de arena. La prueba de filtrado es de uso extendido en el campo, debido a lo sencillo de la operación.



Figura 3.5 Juego para determinar contenido de arena
Fuente: M-I SWACO

3.1.4.1 Determinación Del Contenido De Arena

El juego de determinación del contenido de arena se compone de una malla de 2½ pulgadas de diámetro, de malla 200 (74 micrones), un embudo de tamaño que se ajusta a la malla y un tubo medidor de vidrio, marcado para señalar el volumen de

lodo a ser añadido para leer el porcentaje de arena directamente en la parte inferior del tubo, el cual está graduado de 0 a 20% (Figura 3.5). Esta prueba en lodos que no han sido expuestos a contaminación con materiales perforados, su determinación en valores es cero (0).

3.1.4.1.1 Procedimiento prueba Contenido de Arena

1. Llenar de lodo el tubo medidor de vidrio hasta la marca señalada. Añadir agua hasta la siguiente marca. Tapar la boca del tubo con el pulgar y agitar enérgicamente.
2. Verter la mezcla sobre la malla, añadir más agua al tubo, agitar y verter de nuevo sobre la malla.
3. Repetir hasta que el agua de lavado esté clara. Lavar la arena retenida por la malla.
4. Colocar el embudo en la parte superior de la malla. Introducir la extremidad del embudo dentro del orificio del tubo de vidrio. Usando un chorro fino de agua pulverizada, enjuagar la malla para arrastrar la arena dentro del tubo.

Esperar que la arena se asiente. Usando las graduaciones del tubo, leer el porcentaje de volumen de arena

3.1.5 CONTENIDO DE LÍQUIDOS Y SÓLIDOS

Se usa una retorta de lodo con capacidad de calefacción en el “horno” para determinar la cantidad de líquidos y sólidos contenidos en un fluido de perforación.

Se coloca una muestra de lodo (retortas de 10, 20 ó 50 ml están disponibles) dentro del vaso y se añade la tapa para expulsar parte del líquido. Esto garantiza un volumen correcto. La muestra es calentada hasta que los componentes líquidos se vaporicen (Figura 3.6).



Figura 3.6 Retorta
Fuente: M-I SWACO

Los vapores pasan a través de un condensador y se recogen en un cilindro graduado que suele ser graduado en porcentajes. El volumen de líquido, petróleo y agua se mide directamente en porcentajes. Los sólidos suspendidos y disueltos son determinados restando de 100% o leyendo el espacio vacío en la parte superior del cilindro. Los valores permisibles en un lodo base amina son de porcentajes aproximados a 85% de líquidos y 15% de sólidos.

3.1.5.1 Procedimiento prueba Retorta

1. Dejar que la muestra de lodo se enfríe a la temperatura ambiente.
2. Desmontar la retorta y lubricar las roscas del vaso de muestra con grasa para altas temperaturas. Llenar el vaso de muestra con el fluido a probar casi hasta el nivel máximo. Colocar la tapa del vaso de muestra girando firmemente y escurriendo el exceso de fluido para obtener el volumen exacto – se requiere un volumen de 10, 20 ó 50 ml. Limpiar el fluido derramado sobre la tapa y las roscas.
3. Llenar la cámara de expansión superior con virutas finas de acero y luego atornillar el vaso de muestra a la cámara de expansión. Las virutas de acero deberían atrapar los sólidos extraídos por ebullición. Mantener el montaje vertical para evitar que el lodo fluya dentro del tubo de drenaje.

4. Introducir o atornillar el tubo de drenaje dentro del orificio en la extremidad del condensador, asentándolo firmemente. El cilindro graduado que está calibrado para leer en porcentajes debería estar sujetado al condensador con abrazaderas.
5. Enchufar el cable de alimentación en el voltaje correcto y mantener la unidad encendida hasta que termine la destilación, lo cual puede tardar 25 minutos según las características del contenido de petróleo, agua y sólidos.
6. Dejar enfriar el destilado a la temperatura ambiente.
7. Leer el porcentaje de agua, petróleo y sólidos directamente en la probeta graduada. Una o dos gotas de solución atomizada ayudará a definir el contacto petróleo-agua, después de leer el porcentaje de sólidos.
8. Al final de la prueba, enfriar completamente, limpiar y secar el montaje de retorta.
9. Hacer circular un producto limpiador de tubos a través del orificio del condensador y del tubo de drenaje de la retorta para limpiar y mantener íntegro el calibre de los orificios.

3.1.6 CAPACIDAD DE AZUL DE METILENO O MBT



Figura 3.7 Equipo MBT
Fuente: M-I SWACO

La prueba MBT es usado de 2 maneras. Primero que todo, es una medida directa del contenido de bentonita del fluido de perforación, y como tal, es una herramienta de diagnóstico en la detección de problemas. En segunda instancia, se usa en

conjunto con los datos de la retorta, peso del lodo y análisis de filtrado en la evaluación de las cantidades respectivas de cada tipo de sólidos presentes en el fluido de perforación (Figura 3.7). En lodos nuevos los cuales no han sido expuestos a contaminación, los valores permisibles no son apreciables ya que esta prueba mide la reactividad de las arcillas que se van perforando, por otro lado cuando la prueba MBT es corrida en muestras de formación están considerados valores bajos aquellos que no sobrepasen 25 lb/bbl y valores altos de reactividad son aquellos que ascienden de 25 lb/bbl.

3.1.6.1 Equipo

- Jeringa de 3 ml, bureta de 10 ml.
- Micropipeta de 0,5 ml.
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml con tapón de caucho.
- Bureta o pipeta de 10 ml.
- Cilindro graduado de 50 ml.
- Varilla de agitación.
- Placa calentadora.
- Papel filtro: 11 cm de diámetro, N° 1 o equivalente.

3.1.6.2 Reactivos

- Solución de azul de metileno: 1 ml = 0,01 miliequivalentes 3,74 g de azul de metileno de calidad USP ($C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$) por litro.
- Peróxido de hidrógeno, solución al 3%.
- Solución de ácido sulfúrico 5 N.

3.1.6.3 Procedimiento Prueba de Azul de Metileno

1. Añadir 2 ml de lodo (o un volumen adecuado de lodo que requiera de 2 a 10 ml de reactivo) a 10 ml de agua en el matraz Erlenmeyer.

2. Añadir 15 ml de peróxido de hidrógeno de 3% y 0,5 ml de la solución de ácido sulfúrico 5 N, y mezclar revolviendo antes de calentar. Hervir a fuego lento durante 10 minutos. Diluir con agua hasta obtener una solución de aproximadamente 50 ml.

OBSERVACIÓN: Además de la bentonita, los lodos de perforación suelen contener otras sustancias que absorben el azul de metileno. El tratamiento con peróxido de hidrógeno tiene por objeto eliminar el efecto de las materias orgánicas tales como CMC (carboximetilcelulosa), poliacrilatos, lignosulfonatos y lignitos.

3. Añadir la solución de azul de metileno, agregando cada vez una cantidad de 0,5 ml de la bureta o pipeta al matraz. Después de cada adición, introducir el tapón de caucho y agitar el contenido del matraz durante unos 30 segundos. Mientras que los sólidos están suspendidos, extraer una gota del matraz con una varilla de vidrio y colocarla sobre el papel filtro. Se alcanza el punto final de la valoración cuando el colorante aparece en la forma de un círculo azul verdoso alrededor de los sólidos teñidos.
4. Al detectar el color azul verdoso que se está propagando a partir del punto, agitar el matraz durante 2 minutos adicionales y añadir otra gota al papel filtro. Si se observa otro círculo azul verdoso, el punto final de la valoración ha sido alcanzado. Si el círculo no aparece, repetir la operación anterior hasta que una gota extraída después de agitar por 2 minutos muestre el color azul verdoso.
5. Registrar el volumen (ml) de solución de azul de metileno usado.
6. Capacidad de azul de metileno (MBT) del lodo MBT según el sistema inglés (lb/bbl) = (cm³ de azul de metileno/cm³ de lodo) x 5

3.1.7 CONCENTRACIÓN IÓNICA DE HIDRÓGENO (PH)

La medición en el campo del pH del fluido de perforación (o filtrado) y los ajustes del pH son operaciones críticas para el control del fluido de perforación. Las interacciones de la arcilla, la solubilidad de distintos componentes y la eficacia de los

aditivos dependen del pH, al igual que en el control de los procesos de corrosión causada por ácidos y el sulfuro.

Se usan dos métodos para medir el pH del lodo de perforación base agua dulce: un método colorimétrico modificado, usando tiras de prueba con refuerzo de plástico (palillos); y el método potenciométrico, usando el medidor electrónico de pH.

El método de tira de plástico se usa frecuentemente para medir el pH en el campo, pero no constituye el método preferido. Este método sólo es fiable para los lodos base agua que tienen una composición muy simple. Los sólidos del lodo, las sales y los productos químicos disueltos, y los fluidos de color oscuro causan errores en los valores indicados por las tiras de plástico indicadoras de pH. Los valores permisibles de pH en lodos base amina para la segunda sección son 10 hasta 11.

3.1.7.1 Papel pH (Palillos Indicadores)

Los palillos indicadores de pH están revestidos con indicadores cuyo color depende del pH del fluido donde se introducen los palillos (Figura 3.8). Se proporcionan tablas de colores estándar para fines de comparación con el palillo de prueba, lo cual permite estimar el pH con una precisión de $\pm 0,5$ sobre todo el rango de pH.

3.1.7.1.1 Procedimiento de Prueba con palillos de pH

1. Colocar un palillo indicador de pH en el lodo y dejarlo hasta que el color se estabilice, lo cual requiere generalmente menos de un minuto. Enjuagar el palillo con agua desionizada, sin secar con un trapo.
2. Comparar los colores del palillo con el patrón de color proporcionado y estimar el pH del lodo.
3. Ajustar el pH del lodo a la unidad de pH 0,5 más próxima.

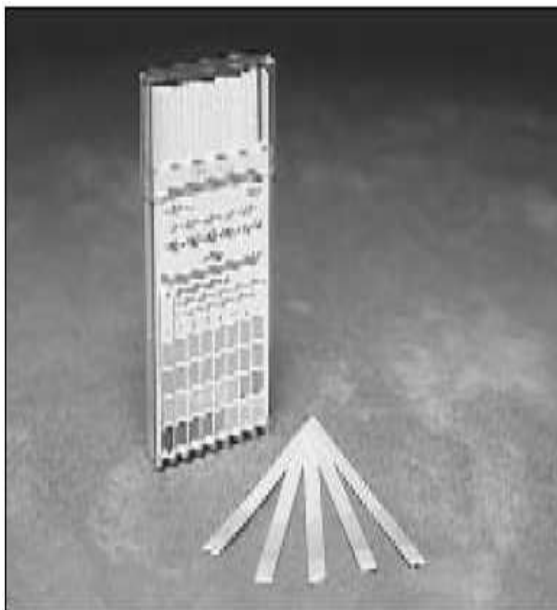


Figura 3.8 Papel pH
Fuente: M-I SWACO

3.1.7.2 Medidor De pH Digital

El medidor de pH digital consta de un bulbo indicador, el cual al sumergirlo en una solución líquida, ya sea esta de alta o baja densidad o de cualquier viscosidad, otorga una lectura exacta del pH de dicha solución. La lectura está descrita en una pequeña pantalla LCD (Figura 3.9).

3.1.7.2.1 Procedimiento Prueba medidor pH digital

1. Remueva la tapa del electrodo y presione el botón ON para prender el equipo
2. Sumergir el electrodo de media pulgada a una pulgada en el fluido. Esperar hasta que la lectura se estabilice
3. Presione el botón HOLD para que la lectura se congele y se pueda tomar la data quitando el electrodo del fluido en que se encuentra sumergido



Figura 3.9 Medidor pH digital
Fuente: www.oakton.com

3.1.8 PRUEBAS QUÍMICAS

Los análisis químicos de los fluidos de perforación y de filtrado se llevan a cabo rutinariamente para determinar la presencia y concentración de ciertos iones. Tales pruebas son necesarias para detectar el nivel en que los electrolitos afectan los sólidos reactivos (bentonita) en el fluido de perforación y en las propiedades de él.

Con el objeto de evitar el daño de formación, la hidratación de lutitas inestables o la disolución de formaciones salinas, es importante formular y controlar la composición química del filtrado para hacerlo compatible, o para la inhibición de las formaciones que están siendo perforadas.

Los procedimientos para los análisis químicos del lodo y del filtrado se describen en el API RP-13B.

3.1.8.1 CONTENIDO DE CLORUROS

La prueba de sal, o cloruro, es muy importante en las áreas donde la sal puede contaminar el fluido de perforación. Esto incluye la mayoría de los campos de petróleo del mundo. La sal puede provenir del agua de preparación, sacos, capas discontinuas, estratos o corrientes de agua salada.

La variable básica a considerar cuando se interpretan resultados de pruebas de cloruros y de sales es el tipo de lodos. Valores permisibles en el lodo base amina cuya fase continua es el agua, se encuentran en un rango desde 600 hasta un máximo de 1000 mg/L.

3.1.8.1.1 Equipo prueba Contenido de Cloruros

En esta prueba se determina la concentración de iones de cloruro disueltos en el filtrado. El equipo a utilizarse es:

- Plano de titulación
- Pipeta de 1-ml.
- Pipeta de 10ml
- Varilla agitadora
- Solución indicadora de cromato de potasio
- Solución ácido sulfúrico 0.02N (N/50)
- Solución indicadora fenolftaleína
- Agua destilada
- 0.0282N Solución de nitrato de plata (AgNO_3)

3.1.8.1.2 Determinación de Contenido de Cloruros

1. Medir 1 o 2 ml de filtrado dentro de un recipiente de valoración.
2. Añadir la cantidad de ácido requerida para la valoración de Pf.
3. Añadir 25 ml de agua destilada y 10 gotas de la solución de cromato de potasio. Agitar continuamente y valorar con la solución normal de nitrato de plata, gota a gota de la pipeta, hasta que el color pase de amarillo a rojo anaranjado y permanezca en este color durante 30 segundos.
4. Registrar el número de ml de nitrato de plata requeridos para lograr el punto final. (Si se utiliza más de 10 ml de solución de nitrato de plata 0,282N, considerar

repetir la prueba con una muestra más pequeña de filtrado medida con precisión, o diluir usando el factor de dilución.)

- Indicar la concentración iónica de cloruro del filtrado en miligramos por litro, calculada de la siguiente manera:

$$\text{Cl}^- \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\text{ml de nitrato de plata } 0.0282\text{N} * 1000}{\text{ml de filtrado}}$$

3.1.8.2 DUREZA DEL CALCIO

En esta prueba se determina la concentración de iones del calcio en un fluido base agua. Valores permisibles en el lodo base amina cuya fase continua es el agua, se encuentran en un rango desde 0 hasta un máximo de 150 mg/L.

3.1.8.2.1 Equipo prueba Dureza del Calcio

- Pipeta de 5-mL
- Pipeta de 1-mL
- Cilindro graduado de 50-mL
- Selección tituladora de dureza total (THTS)
- Solución amortiguadora de calcio (Calcium Buffer Solution)
- Polvo indicador CalVer II
- Agua destilada

3.1.8.2.2 Procedimiento para determinar la Dureza del Calcio

- Recoger una muestra de filtrado usando el método de filtrado API
- Agregar de 20 a 50 mL de agua destilada en el plato de titulación.
- Agregar 5 gotas de solución amortiguadora de calcio.
- Agregar 0.25 a 0.5 gr de polvo indicador CalVer II, y el color cambiará a rojo si existe presencia de calcio.
- Dosificar lentamente con el THTS hasta que el color cambie de rojo a violeta azul.

6. Calcular la concentración de calcio en mg/L.

$$\text{Dureza del calcio} = \frac{(\text{ml THTS} * 400)}{\text{ml filtrado}} = \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

3.1.8.3 ALCALINIDAD DE FILTRADO (Pf y Mf)

El objetivo de esta prueba es determinar las cantidades de iones solubles que contribuyen a la alcalinidad de un fluido de perforación base agua. Valores permisibles en el lodo base amina cuya fase continua es el agua, se estima que deben estar en una relación Pf a Mf de 1:1 a 1:2 mL.

3.1.8.3.1 Equipo prueba Alcalinidad de Filtrado

- Solución ácida normalizada, 0,02 N (N/50); ácido sulfúrico o nítrico.
(OBSERVACIÓN: También se puede utilizar la solución ácida normalizada 0,1N (N/10), pero convirtiéndola al equivalente ml 0,02 N multiplicando por 5).
- Solución indicadora de fenolftaleína.
- Solución indicadora de anaranjado de metilo/verde de bromocresol. API recomienda al anaranjado de metilo (amarillo a rosado).
- Recipiente de valoración, 100 a 150 mL, preferiblemente blanco.
- Pipetas graduadas: una de 1 mL y otra de 10 mL.
- Varilla de agitación.
- Una jeringa de 1 mL.
- Medidor de pH.

3.1.8.3.2 Procedimiento para determinar la Alcalinidad de Filtrado

1. Medir 1 mL de filtrado dentro del recipiente de valoración y añadir 5 mL de agua destilada.
2. Añadir 2 o más gotas de indicador de fenolftaleína. Si la solución se vuelve rosada.

3. Añadir ácido 0,02 N gota a gota de la pipeta, agitando hasta que el color rosado desaparezca. Si la muestra está tan coloreada que no se puede observar el cambio de color del indicador, el punto final será tomado cuando el pH cae a 8,3, según sea medido por los métodos anteriormente señalados. (La muestra puede ser diluida con agua destilada.)
4. Indicar la alcalinidad de fenolftaleína del filtrado, Pf, como número de ml de ácido 0,02 N requeridos por ml de filtrado para lograr el punto final.
5. Añadir 3 a 4 gotas de indicador de anaranjado de metil/verde de bromocresol a la misma muestra que fue utilizada para medir Pf; un color verde aparecerá.
6. Valorar con ácido 0,02 N hasta que el color se vuelva amarillo. Esto ocurrirá al pH 4,3.
7. Mf se indica como el volumen total (mL) de ácido utilizado para Pf más esta última valoración.

3.1.8.4 ALCALINIDAD LODO BASE AGUA (Pm)

La alcalinidad Pm se usa para determinar la alcalinidad de material alcalino soluble e insoluble de lodo. Esta prueba determina la alcalinidad (P_m) de un lodo base agua. Valores permisibles de esta prueba deben ser semejantes a la prueba de alcalinidad de filtrado Pf.

3.1.8.4.1 Equipo prueba Alcalinidad lodo base agua

- Solución ácida normalizada, 0,02 N (N/50); ácido sulfúrico o nítrico.
- Solución indicadora de fenolftaleína.
- Solución indicadora de anaranjado de metilo/verde de bromocresol. API recomienda al anaranjado de metilo (amarillo a rosado).
- Recipiente de valoración, 100 a 150 ml, preferiblemente blanco.
- Pipetas graduadas: una de 1 ml y otra de 10 ml.
- Varilla de agitación.

- Una jeringa de 1 ml.
- Medidor de pH.

3.1.8.4.2 Procedimiento para determinar la Alcalinidad lodo base agua

1. Medir 1 ml de lodo dentro del recipiente de valoración utilizando la jeringa.
2. Diluir la muestra de lodo con 25 ml de agua destilada.
3. Añadir 5 gotas de indicador de fenolftaleína, y
4. Durante la agitación, añadir ácido 0,02 N o ácido 0,1 N hasta que el color rosa desaparezca.

Si la muestra está tan coloreada que no se puede observar el cambio de color del indicador, el punto final será tomado cuando el pH cae a 8,3, según sea medido por los métodos anteriormente señalados.

Indicar la alcalinidad de fenolftaleína del lodo, Pm, como número de ml de ácido 0,02 N (N/50) requeridos por ml de lodo. Si se utiliza el ácido 0,1 N, $P_m = 5 \times \text{ml de ácido } 0,1 \text{ N por ml de lodo}$.

3.2 PRUEBAS ESPECIALES

Estas son realizadas con muestras de las formaciones de nuestro estudio, acompañadas del lodo base amina. Estas pruebas tienen la finalidad de analizar cuan efectivos es el fluido de perforación en la inhibición de las arcillas reactivas y de las lutitas inestables.

3.2.1 EQUIPO DINÁMICO DE HINCHAMIENTO LINEAL (INHIBICIÓN)

El Equipo dinámico de hinchamiento lineal provee un método muy eficaz para examinar la interacción entre los fluidos base agua y las muestras minerales que

contienen arcillas reactivas bajo condiciones simuladas mientras el fluido está en movimiento. La prueba consiste en colocar simultáneamente en una celda agua y muestra de formación que tiene cierta Capacidad de Intercambio Catiónico, y en otra celda la muestra de lodo con la misma muestra de formación (Figura 3.10).



Figura 3.10 Equipo dinámico de Hinchamiento Lineal
Fuente: M-I SWACO

Similar a la Capacidad de Intercambio Catiónico, pero expresado como el aumento de volumen inicial de una pastilla de material reconstituido y comprimido. El aumento de volumen es por efecto de la unión física y química de moléculas de agua que entran en la estructura cristalina del mineral como consecuencia del intercambio catiónico. Se expresa como porcentaje de hinchamiento medido en una dirección, por un lapso de tiempo predeterminado.

Se inicia la prueba y se somete la celda a calentamiento y agitación simulando las condiciones del pozo, y luego de 20 horas expuesto al medidor de hinchamiento

lineal se obtiene un porcentaje de hinchamiento, tanto del agua como del lodo de perforación lo cual nos permite realizar una comparación entre ellos.

Las características de hinchamiento observadas, son utilizadas para anticipar o corregir los problemas, a menudo imprevisibles, encontrados con frecuencia mientras se perfora formaciones de arcilla. Es una herramienta muy útil al diseñar fluidos de perforación o al probar el comportamiento de lodos existentes, porque demuestra los cambios en las interacciones arcilla/fluido, por períodos del tiempo cortos (0 - 5 minutos) así como por períodos más largos (>350 minutos), embolamiento de broca, la fricción de la tubería, reducción del agujero y otros problemas de la arcilla se pueden predecir por adelantado, permitiendo a la operadora seleccionar el fluido de perforación apropiado y por lo tanto alcanzar la estabilidad del pozo.

3.2.2 HORNO DE ROLADO PROGRAMABLE



Figura 3.11 Horno de rolado
Fuente: M-I SWACO

El horno de rolado es una ayuda eficaz en la determinación de los efectos de la temperatura sobre el fluido de perforación mientras circula a través del hueco.

Envejecer el fluido de perforación en envases presurizados demuestra con eficacia los efectos de la temperatura sobre la viscosidad y cómo varios aditivos añadidos se comportan a temperaturas elevadas. El envejecimiento se hace bajo condiciones que varían de estáticas a dinámicas y de temperaturas ambiente a altas temperaturas. Los hornos presentan 5 rodillos y pueden sostener dieciséis jarras de 260 ml u ocho jarras de 500 ml.

Estos dos equipos son de velocidad constante y están contruidos en acero inoxidable para una vida más larga y un ambiente más limpio dentro del horno. Los cojinetes de Teflón del rodillo impregnados de cristal, amplían la vida de los rodillos y permiten un servicio largo sin necesidad de mantenimiento. El equipo posee un regulador de temperatura digital que se puede leer directamente fuera del horno como indica la Figura 3.11.

La temperatura es controlada por un termóstato electrónico de estado sólido que opera entre 100 °F y 600 °F. Los hornos incluyen un contador de tiempo programable de siete días como equipo estándar. El contador de tiempo se puede preestablecer automáticamente para encender y apagar los calentadores, permitiendo el funcionamiento sin necesidad de vigilancia constante, el ventilador mejora grandemente la circulación de aire dentro del horno y proporciona una calefacción más estable, constante, y confiable. Los hornos de rolado proporcionan funcionalidad a la calefacción y rolamiento, simultánea o independientemente. Por lo tanto, pueden ser usados en muchas aplicaciones prácticas

3.2.3 DUREZA AL HUMECTAR

El Equipo de Dureza al humectar provee un método rápido para examinar la interacción entre los fluidos base agua y las muestras minerales que contienen

lutitas inestables (suaves, quebradizas) ya que las lutitas son rocas sedimentarias ricas en arcilla sensibles a influencias mecánicas y químicas las cuales son sometidas a condiciones simuladas mientras el fluido está en movimiento. La dureza de las lutitas está relacionada con el efecto inhibitor en las arcillas por los fluidos de perforación. La muestra evaluada puede ser el producto de una prueba de calentamiento y rolado en el laboratorio o puede ser evaluada directamente en las zarandas en la localidad del pozo.

La prueba consiste en colocar un gramaje determinado (30 gr) de muestra de lutita previamente rolado con el lodo de perforación simulando condiciones del pozo, el cual es sometido a un torque progresivo con un tornillo sin fin, sin que el torque registrado exceda los 225 lb-in. El sistema está conectado a un multímetro el cual provee datos en mili voltios (mV), este voltaje se incrementa mientras se ejerce torsión en el sistema hasta que llegue a su límite ya establecido, simultáneamente se registra el tiempo que le toma a la muestra llegar a su valor pico y su posterior declinación (Figura 3.12).

Como resultado de la fuerza ejercida en la prueba, las muestras de lutita se deben compactar y si éstas no se han hidratado de manera descontrolada, al pesar la pastilla, el gramaje inicial apenas debe disminuir en 1 gramo, siendo éste el excedente del lodo de perforación acompañado de partículas pequeñas de lutita.

Como es una prueba comparativa, se realiza para varias muestras que posean altos índices de lutita, ya pueden ser estos de la misma formación como de diferentes formaciones para representarlas posteriormente en una gráfica de voltaje con respecto a tiempo para así determinar a qué profundidad se encuentran las lutitas más inestables, se toma la relación que a mayor tiempo de exposición de torque constante y gradual hasta que llegue a su máximo valor, la muestra analizada es más hidratable e inestable. La variable TIEMPO en esta prueba, es directamente proporcional al GRADO DE INESTABILIDAD presente a las lutitas.

Las características de inestabilidad observadas, son utilizadas para anticipar o corregir los problemas, a menudo imprevisibles, encontrados con frecuencia mientras se perfora formaciones de lutita. Valores que determinan una buena inhibición efectuada por el lodo de perforación son aquellos que no superan los 20 segundos ejerciendo torque progresivo y constante en el sistema hasta su torsión máxima y posterior declinación. Es una herramienta muy útil al diseñar fluidos de perforación o al probar el comportamiento de lodos existentes, porque demuestra los cambios en las interacciones lutita/fluido, embolamiento de broca, la fricción de la tubería, reducción del agujero y otros problemas de la lutita que se pueden predecir por adelantado, permitiendo a la operadora seleccionar el fluido de perforación apropiado y por lo tanto alcanzar la estabilidad del pozo.

La aplicación del equipo de Dureza al Humectar está por lo general limitada a rocas en lutitas, las cuales se ablandan apreciablemente en contacto con los fluidos de perforación base agua. Rocas que en contacto con los fluidos no se tornan plásticas, no se deforman ni ablandan a una presión razonable no son adecuadas para usar en el aparato.

3.2.3.1 Armado del Equipo de Dureza al Humectar

1. Desarme la tapa superior, el disco de plástico, el cilindro y el plato perforado o malla.
2. Limpiar continuamente la malla, removiendo todas las obstrucciones de los agujeros usando la aguja roma que viene con el aparato para ello y lave con agua y jabón. No use aire o agua presurizada para limpiar para limpiar podría ocasionar una lesión personal.
3. Limpiar minuciosamente el cilindro y el disco de plástico con agua y jabón.
4. Limpiar la tapa superior y el tornillo asegurándose de que no se depositen materiales extraños en los filamentos de tornillos de conducción. Cuidadosamente limpie con un paño y lubrique usando grasa.

5. Si desea, instale una tuerca espaciadora en la columna del tornillo contra el pistón.
6. Reensamble el cilindro y la malla.
7. Ajuste los tornillos que ajustan el conjunto del aparato de igual manera, cuidando de que no quede muy apretado ni muy sueltos.
8. Acoplar el torquímetro al sistema.
9. Conectar el multímetro al equipo.



Figura 3.12 Equipo de Dureza al Humectar
Fuente: M-I SWACO

3.1.3.2 Procedimiento para la Prueba de Dureza al Humectar

1. Recolectar de 30 gramos de la muestra recolectada y seleccionada.
2. Preparado el lodo de perforación para realizar la prueba, poner este en una celda con la muestra de lutitas.

3. Rolar el lodo durante 16 horas a una temperatura de 150 °F

4. Después de rolado el lodo, recobrar los cortes en una malla 20. Vierta todo el contenido de la celda en la malla 20. Lavar los cortes, usando un solvente apropiado: si se trata de un lodo base agua usar solución de KCl al 2%.
5. Coloque el peso conocido de cortes dentro del cilindro de tal manera que queden sueltos, para esto ayúdese de una espátula. Inserte el disco de plástico de manera que este quede en el interior del cilindro. Muy suavemente presione el disco sobre los cortes. No aplique ninguna fuerza, la finalidad es alcanzar el punto de partida en la prueba.
6. Verifique que el tornillo al cual se le aplica el torque, llegue hasta la muestra sin ejercer fuerza contra el disco de plástico.
7. Verifique que todos los componentes estén concéntricos y alineados. El tornillo al cual se le aplica la fuerza debe girar libremente de lo contrario suelte los tornillos de la tapa ligeramente y realinee si es necesario.
8. Conecte el torquímetro y verifique que el dial se encuentre en cero (0).
9. Conecte el multímetro al sistema.
10. Registre la posición inicial del torquímetro. Rote o gire el torquímetro en el sentido de las manecillas de reloj, a una velocidad constante y uniforme hasta que en el dial del torquímetro llegue hasta 225 lb-in.
11. Bajo ninguna circunstancia no exceda de 250 lb-in.
12. Registre los valores en mV. con respecto al tiempo que se marca en la pantalla del multímetro.
13. Una vez terminada la prueba, desarme el aparato.
14. Remueva el disco de plástico con la mano o girando el tornillo de fuerza para empujar el material restante del cilindro.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LODO BASE AMINA CON LAS DIFERENTES MUESTRAS

4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Material de formación se define aquel proveniente del subsuelo, como muestras de pared por percusión y/o herramienta de microtaladro; bien como muestras de recortes de perforación o de canal obtenidas durante el seguimiento geológico o monitoreo de lodo.

En las zarandas se toman los cortes de perforación, se los lava para retirar el exceso de lodo, como indica la Figura 4.1 (no lavar con fuerza para evitar que la arcilla contenida en los cortes sea expulsada), hacer lo mismo tanto para los cortes de lutita como de arcilla, con el objetivo que se preserve la muestra con la mayoría de las características propias de la profundidad de la cual fueron extraídas.



Figura 4.1 Toma de muestras en zarandas
Elaborado por Pedro Orbe

Dichas muestras se deben guardar en bolsas adecuadas e impermeables (polipropileno/polietileno) como lo indica la Figura 4.2, identificadas con tinta indeleble. Deben reportar la profundidad estimada de origen, para esto se deben conocer los tiempos de viaje y así determinar dicha profundidad.



**Figura 4.2 Recolección de muestras
Elaborado por Pedro Orbe**

La frecuencia de recolección en intervalos mínimos de 30 ft hasta intervalos máximos de 300 ft en aquellos horizontes de interés en común acuerdo con la compañía Operadora.

Los intervalos de recolección deben indicarse con un rango de profundidad, ya que existe un error asociado al origen del recorte. Una vez tomadas y recolectadas las muestras estas deben secarse en un horno o al aire libre sin ningún agente adicional para el secado (Figura 4.3).



Figura 4.3 Secado de muestras en el horno de rolado
Elaborado por Pedro Orbe

4.2 FORMULACIÓN DE LODO DE PERFORACIÓN BASE AMINA

TABLA 4.1 Formulación del lodo de perforación base amina

ELEMENTO	Lpb
ESTABILIZADOR DE LUTITAS	1.5
AMINA CUATERNARIA	2
POLIAMINA INHIBIDORA DE ARCILLAS	0.5
OPTIMIZADOR DE VELOCIDAD DE ROP	0.8
GOMA XANTANA	0.6
POLÍMERO POLIANIONICA	1.5
CELULOSA POLIANIONICA	0.7
CONTROLADOR DE FILTRADO Y ESTABILIZADOR REOLÓGICO	1.5
ESTABILIZADOR DE LUTITAS (GILSONITA)	1
MATERIAL DENSIFICANTE	125

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

4.2.1 PROCESO DE MEZCLADO DE LODO BASE AMINA

El proceso de mezclado de los componentes del lodo base amina en el laboratorio fueron el siguiente:

- En primer lugar, el **estabilizador de lutitas y encapsulante de recortes**, el cual se mezcló por un tiempo de 2 horas.

Después vienen los viscosificantes; su lugar en el proceso de mezclado va acorde con el tiempo que toma cada uno para que se disuelvan por completo en su fase continua (agua):

- En segundo lugar, la **goma xantana** la cual se mezcló por 30 minutos,
- En tercer lugar, la **celulosa polianiónica** que se mezcló por un tiempo de 20 minutos.

Posteriormente van los reductores de filtrado, estos componentes se suman a la manera de adición de los viscosificantes y su lugar fue;

- En cuarto lugar, el **polímero polianiónico** el cual se mezcló por 20 minutos
- En quinto lugar, el **controlador de filtrado y estabilizador reológico** el cual se mezcló por 15 minutos.

Los siguientes tres componentes del lodo base amina son líquidos y no tienen lugar indispensable de adición entre ellos. Con el único afán de nombrarlos se los designó en un orden aleatorio.

- En sexto lugar, la **amina cuaternaria**
- En séptimo lugar, la **poliamina inhibidora de arcillas**
- En octavo lugar, el **optimizador de velocidad de ROP**

Los dos últimos componentes en la mezcla son al igual que los 5 primeros, sólidos.

- En noveno lugar, **material densificante**, este elemento es sólido, un tipo de grano muy fino el cual le da cuerpo al lodo.
- En décimo lugar, el **estabilizador de lutitas (gilsonita)**

Posterior a la adición de todos los componentes del lodo base amina se deja en la mezcladora por unos 30 minutos más para que la mezcla se homogenice.

4.2.2 BREVE DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL LODO BASE AMINA

ESTABILIZADOR DE LUTITAS

Este polímero es un producto de fácil dispersión diseñado para encapsular recortes y estabilizar lutitas. Este polímero actúa también como viscosificador, reductor de fricción y floculante, aportando a su vez cierto control de filtrado. Puede utilizarse en sistemas de lodo, desde lodos con bajo contenido de sólidos hasta lodos densificados, con aguas de preparación frescas a saladas.

GOMA XANTANA

Este producto aporta como viscosificante, adicionando viscosidad a muy baja velocidad de corte, y suspensión de material densificante para todos los sistemas de lodo base agua. Este producto tiene la singular capacidad de producir un fluido tixotrópico que disminuye fácilmente su viscosidad con el esfuerzo de corte.

CELULOSA POLIANIÓNICA

Es un polímero de alta calidad y soluble en agua. Está diseñado para controlar el filtrado y aumentar la viscosidad en lodos base agua. Forma un revoque delgado, elástico y de baja permeabilidad que minimiza el potencial de pegadura por presión diferencial y la invasión de filtrado y sólidos de lodo hacia formaciones permeables.

POLÍMERO POLIANIÓNICO

Es un aditivo de control de filtración de grado puro para lodos base agua. Este aditivo controla el filtrado de una gama de productos de perforación con un incremento mínimo de viscosidad.

CONTROLADOR DE FILTRADO Y ESTABILIZADOR REOLÓGICO

Este polímero se utiliza para brindar control de filtración y estabilidad reológica en todos los tipos de fluidos de perforación base agua. Este polímero es efectivo en todas las aguas de preparación incluyendo salmueras de elevada salinidad, tales como salmueras de NaCl, KCl, MgCl₂ y salmueras complejas.

AMINA CUATERNARIA

Es un líquido, un excelente inhibidor de arcillas y lutitas que actúa a nivel iónico formando parte de los cristales presentes en las formaciones compuestas de arcillas y lutitas, no permitiendo que las mismas se hinchen y manteniéndolas estables. Además de su principal función, es un reductor del coeficiente de fricción en lodos base agua, por lo cual reduce el torque que se ejerce en el sistema.

POLIAMINA INHIBIDORA DE ARCILLAS

Es un líquido utilizado en fluidos poliméricos base agua. Este aditivo impide que las arcillas así como también que las lutitas no se ablanden ni se hinchen lo cual permite evitar que la broca y al conjunto de fondo (BHA) se obstruyan.

OPTIMIZADOR DE VELOCIDAD DE ROP

Es un líquido el cual está diseñado para optimizar la velocidad de penetración (ROP) en fluidos de perforación base agua, especialmente donde se utilizan brocas compactas de diamante policristalinas (PDC). La composición de este aditivo resiste la tendencia de las arcillas a adherirse a la barrena y al conjunto de fondo (BHA) y asegura que el peso se transfiera hacia el fondo de manera más efectiva.

MATERIAL DENSIFICANTE

Es un aditivo espesador (densificante) y de puenteo soluble en agua para fluidos de perforación y de reparación/terminación de pozos. Su diminuto tamaño de las partículas del material densificante le permite pasar por las mallas más pequeñas de las zarandas. Este elemento es soluble en ácido y por eso minimiza el daño permanente de las formaciones. Este aditivo no reacciona ni interfiere con las funciones de otros aditivos para lodos a base de agua o de aceite.

ESTABILIZADOR DE LUTITAS GILSONITA

Es una material asfáltico acoplado, parcialmente soluble en agua. Se utiliza para ayudar a estabilizar secciones de lutita, controlar las características de revoque, taponar lutitas microfracturadas y brindar control de filtrado a temperaturas elevadas en sistemas de fluido de perforación base agua, diesel y sintéticos

4.2.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL LODO DE PERFORACIÓN

TABLA 4.2 Resultados de Pruebas Básicas		
	LODO CONDICIONES	LODO ROLADO
	AMBIENTE	
R600/R300	65/45	69/47
R200/R100	32/28	33/28
R6/R3	10/7	10/8
Gel 10"/10'/30'	8/10/12	8/10/10
VP	20	22
YP	25	25
pH	10,8	10,5
API	3,1	7,6

Tabla 4.2 (Continuación)

Contenido de arena	0	0
Contenido liq/sol(%)	85/15	85/15
DENSIDAD	9,8	9,8
Total Hardness	80	72
Cl	700	750
Pm	3,1	2,4
Pf/Mf	2,55/4,5	2,3/3,2
MBT	0	0

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: Autor

4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Los resultados de la tabla 4.2 hacen referencia a las propiedades más importantes de un lodo a condiciones ambiente, lo que no representa un valor real; por esa razón se realiza las mismas pruebas con el lodo rolado por 16 horas a una temperatura de 175 °F, con la finalidad de simular las condiciones de fondo en el pozo y para que el lodo se homogenice.
- La densidad del lodo no varía antes y después de rolado, el fluido de perforación es diseñado para que tenga la densidad de 9.8 Lpg en la segunda sección (sección 12 ¼”), posteriormente en el campo este valor se incrementará conforme se sigue perforando y el lodo se contamina e incrementa en su valor.
- El valor de viscosidad plástica (VP) hace referencia de la cantidad de sólidos presentes en el sistema. Este lodo tiene un valor de 22 cP, el cual está dentro de

los valores permisibles, la cantidad de sólidos presentes en el fluido pueden ser manejados por el sistema de control de sólidos, sin causar daño a la formación.

- El valor de punto cedente (YP) es de 25 lb/100 ft². Este es un valor que se encuentra dentro del rango de valores diseñados para la sección de 12 ¼”.
- Los valores reportados a los 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos a una revolución de 3 RPM, para nuestro lodo de perforación son 8/10/10, respectivamente, y no varían mucho entre sí, por lo tanto la elaboración del lodo es buena.
- Los valores de contenido de líquidos y sólidos están dentro del rango de valores permisibles por lo que me indica que el lodo está en parámetros eficientes.
- El valor reportado del filtrado del lodo es de 7,6 ml, ya que debemos tener valores menores a 10 ml, para tener un buen lodo. Por lo que este ayudará hacer un buen revoque y no habrá una dañina invasión del filtrado a la formación.
- La costra del lodo es delgada, homogénea y no invasiva, lo cual ayudará a un buen control de filtrado en la pared del pozo.
- Como este es un lodo nuevo el cual fue preparado en el laboratorio y no se le ha expuesto a ningún tipo de contaminación con restos de cortes de perforación, los valores de arena marcaron cero (0).
- Este presenta un pH de 10,5 el cual para la segunda sección (12 ¼”) es un pH que se encuentra en los parámetros de manejo.

- En cuanto a la prueba de MBT con respecto al lodo de perforación no mostró ningún tipo de reactividad por lo que su valor es cero (0).

4.3 PREPARACIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA PRUEBAS

4.3.1 SELECCIÓN DE MUESTRAS

No todas las muestras que se recolectan son hábiles para proceder hacer las pruebas por lo que hay que seleccionarlas según su tamaño y composición. Con la coordinación de la empresa de geología GEOSERVICES se obtuvo la litología y composición mineralógica de las diferentes muestras. A continuación se detalla las características que determinaron la selección:

4.3.1.1 SELECCIÓN PARA LUTITAS

En la toma de muestras para la prueba de Dureza al Humectar se tomaron entre cortes medianos a grandes, aproximadamente cortes de 4mm en delante de largo, ya que estos son idóneos para la prueba y para que los resultados se ajusten de manera más efectiva a la realidad.

4.3.1.2 SELECCIÓN PARA ARCILLAS

Se toman los cortes más pequeños aproximadamente granos más pequeños de un diámetro 3mm excluyendo en lo posible indicios de lutita para la prueba de Hinchamiento Lineal, ya que estas lutitas alterarán los efectos naturales de las arcillas. Se realiza la prueba de Methyl Blue Test (MBT) para tomar las muestras con mayor porcentaje de reactividad presente en las arcillas.

Después de la selección y clasificación de las muestras obtenidas del Pozo X se obtuvieron las siguientes muestras que se indican en la tabla 4.3.

TABLA 4.3 Muestras seleccionadas para las pruebas especiales			
Nº	FORMACIÓN	PROFUNDIDAD (ft)	LITOLÓGÍA (%)
1	ORTEGUAZA	6400 – 6495	80 % LUTITA, 10% LIMOLITA Y 10% ARENISCA
2	ORTEGUAZA	6800 – 6850	90 % LUTITA, 10% LIMOLITA
3	TIYUYACU	7230 – 7300	100% ARCILLOLITA
4	TIYUYACU	7590 – 7660	100% ARCILLOLITA
5	TIYUYACU	7740 – 7800	90% ARCILLOLITA, 10% LIMOLITA
6	TENA	9090 – 9180	100% ARCILLOLITA
7	TENA	9270 – 9360	100% ARCILLOLITA
8	NAPO (SHALE)	9450 – 9540	90% LUTITA, 10% CALIZA
9	NAPO (SHALE)	9770 – 9860	90% LUTITA, 10% CALIZA

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

4.4 PRUEBA ESPECIAL PARA LUTITAS

4.4.1 DUREZA AL HUMECTAR



Figura 4.4 Equipo de Dureza al Humectar
Elaborado por Pedro Orbe

4.4.1.1 Orteguzza (6400-6495)ft

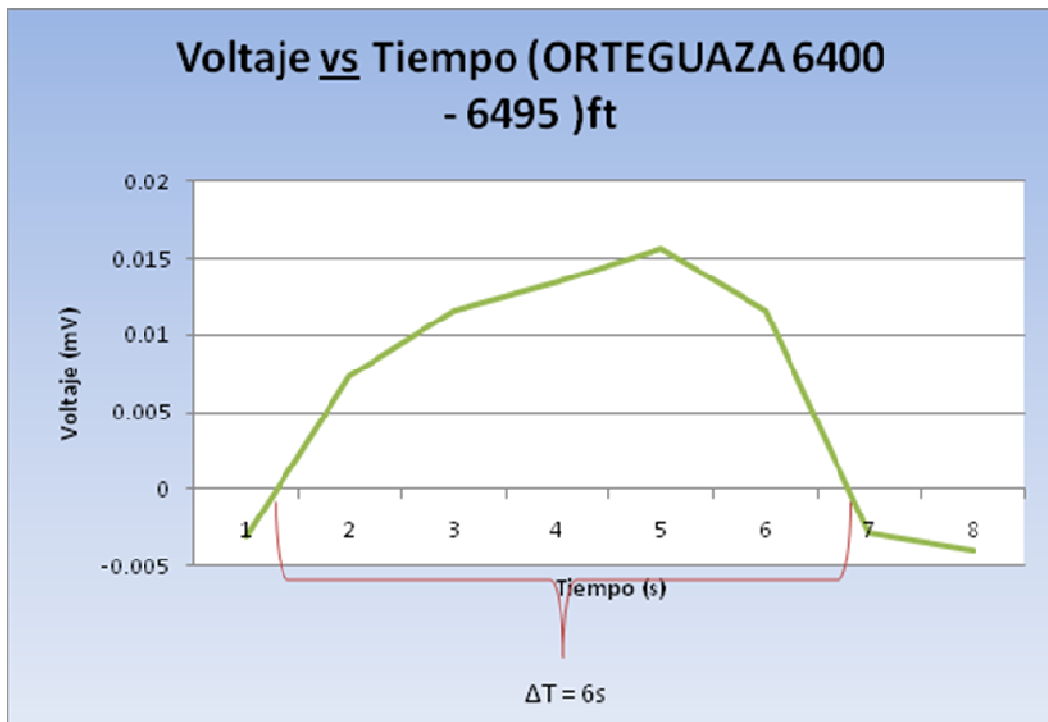
Esta es una prueba cualitativa, la cual me proporciona una noción de que tan humectables e inestables son las lutitas, si estas se humedecen o son resquebrajables. Se tomó 30 gramos de muestra y se dejó rolar por 16 horas para simular las condiciones del pozo.



**Figura 4.5 Pesaje de la muestra de lutitas
Elaborado por Pedro Orbe**

Se aplicó el máximo torque que se debe proporcionar a las lutitas que fue de 225 lb/ft. Este torque aportó con valores en mili voltios (mV) con respecto al tiempo. Estos resultados fueron los que se indican en la Figura 4.6. El valor máximo corresponde al torque de 225 lb/in (pico de la gráfica de figura 4.6). En esta figura de voltaje con respecto al tiempo observamos un ΔT de 6 segundos, el cual pasa entre los segundos (del 1 al 7) desde el inicio de la prueba hasta su declinación. Como resultado del torque ejercido, las lutitas se compactaron dando una pastilla con muy pocos restos que pasaron por los agujeros que se encuentran en la parte inferior de

la cámara del cilindro del sistema (Figura 4.7), y posteriormente dicha pastilla fue pesada la cuál marcó 29.62 gramos, el restante se divide en los pocos restos de muestra y el lodo con el cual se pesó al inicio de la prueba.



**Figura 4.6 Voltaje vs Tiempo Orteguaza (6400 - 6495)ft
Elaborado por Pedro Orbe**



**Figura 4.7 Pastilla de lutita de Orteguaza (6400 - 6495)ft
Elaborado por Pedro Orbe**

4.4.1.2 Orteguaza (6800-6850)ft

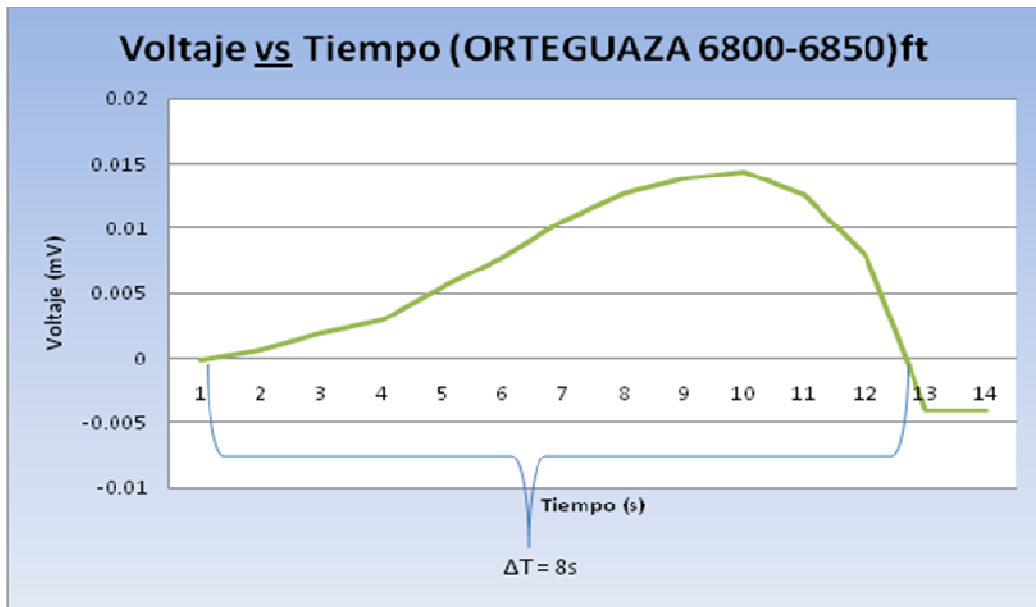


Figura 4.8 Voltaje vs Tiempo Orteguaza (6800 - 6850)ft
Elaborado por Pedro Orbe

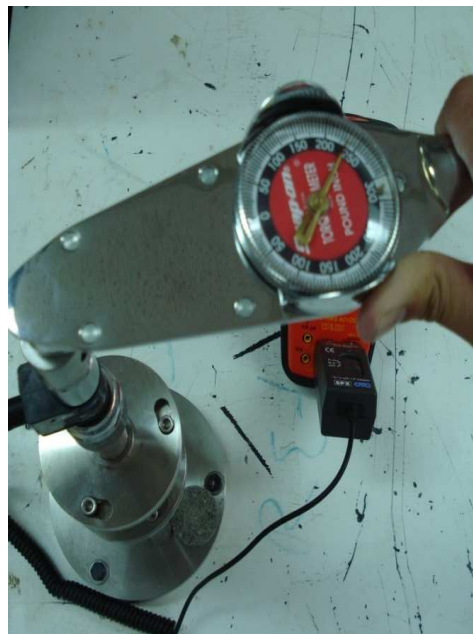


Figura 4.9 Torquímetro a 225 lb/ft
Elaborado por Pedro Orbe

De igual manera se procedió a tomar 30 gramos de muestra de lutitas que previamente fueron roladas, la que fue sometida a una torsión máxima de 225 lb/in (Figura 4.9). La figura 4.8 indica que el tiempo transcurrido hasta que la prueba llegue a su tope en torque fue un ΔT de 8 segundos que transcurrió entre los segundos (1 - 9). En este periodo de tiempo las lutitas se compactaron formando una pastilla como se muestra en la Figura 4.10, la cual es bastante consistente, dura y para comprobar que no existió desperdicios de lutita, la pastilla fue pesada y esta pesó 29.7 gramos asumiendo que el restante fue lodo que no pudo ser extraído antes de la prueba.

Los valores de las 2 muestras que pertenecen a la formación Orteguzza indican una similitud en el tiempo que les tomó llegar al límite de torsión establecido por el sistema por lo que podemos establecer que estas lutitas tienen la misma consistencia y dureza.



**Figura 4.10 Pastilla de lutita de Orteguzza (6800 - 6850)ft
Elaborado por Pedro Orbe**

4.4.1.3 Napo Shale (9450 – 9540)ft

El tiempo que le tomó a las lutitas compactarse, los 30 gramos durante 16 horas en el horno de rolado simulando condiciones del pozo en presión y temperatura, de una muestra humectada a una pastilla compacta fue un ΔT de 15 segundos (Figura 4.11), los que transcurrieron entre los segundos (1 al 16) llegando hasta 225 lb/ft que es el torque máximo ejercido por el sistema. La pastilla resultante al fin de la prueba

(Figura 4.12) fue pesada y esta marcaba 29.6 gramos, deduciendo que el restante de los 30 gramos fue el lodo restante que estaba presente antes de la prueba, comprobando así que existe un mínimo de residuos que fueron expulsados por la parte inferior del sistema de Dureza al Humectar. A diferencia de las muestras anteriores el periodo de tiempo en la cual la muestra se compactó fue de casi el doble de tiempo por lo que podemos decir que este tipo de lutitas es menos humectable que las lutitas de la formación Orteguaza.

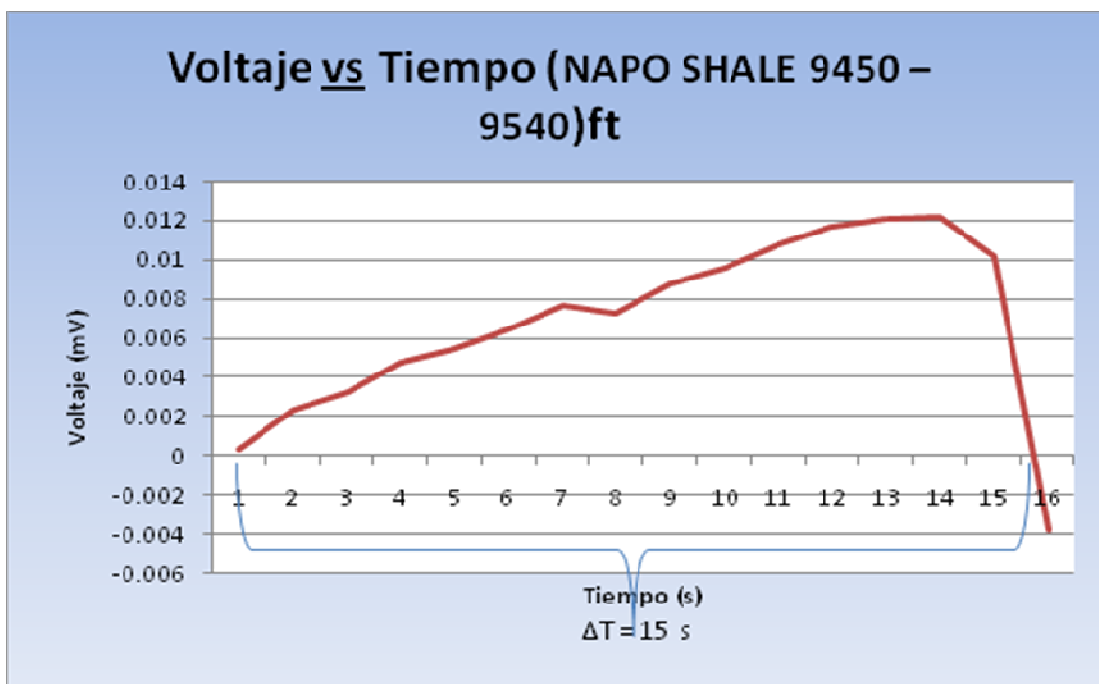


Figura 4.11 Voltaje vs Tiempo Napo Shale (9450 - 9540)ft
Elaborado por Pedro Orbe



Figura 4.12 Pastilla de lutita de Napo Shale (9450 - 9540)ft
Elaborado por Pedro Orbe

4.4.1.4 Napo Shale (9770 - 9860)ft

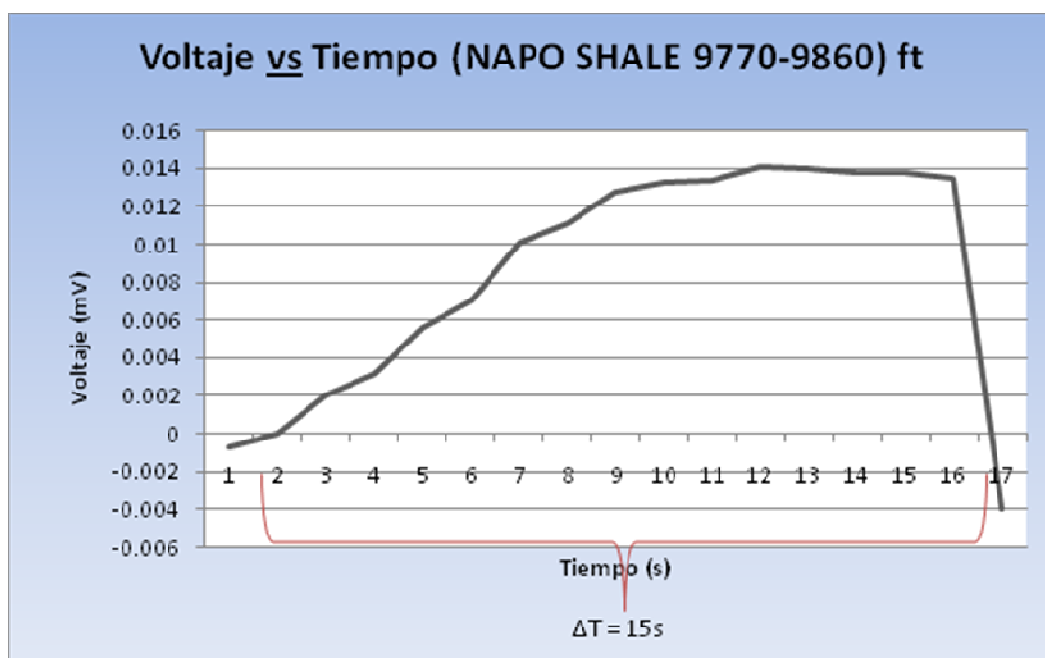


Figura 4.13 Voltaje vs Tiempo Napo Shale (9770 - 9860)ft
Elaborado por Pedro Orbe

De acuerdo con el procedimiento se tomó 30 gramos de muestra de lutitas de la formación Napo que previamente fueron roladas, la que fue sometida a una torsión máxima de 225 lb/in. La figura 4.13 indica que el tiempo transcurrido hasta que la prueba llegue a su tope en torque fue un ΔT de 15 segundos que transcurrió entre los segundos (2 - 17). En este periodo de tiempo las lutitas se compactaron formando una pastilla como se muestra en la Figura 4.14, esta pastilla fue pesada la cual marcó 29.73 gramos, el restante de los 30 gramos fue el lodo restante que estaba presente antes de la prueba, comprobando así que existe un mínimo de residuos que fueron expulsados por la parte inferior del sistema. En concordancia con la muestra anterior el tiempo en la cual la muestra se compactó fue el mismo con el cual se nota que las propiedades de dureza y de inestabilidad son muy similares y estas dos muestras de lutitas de Napo Shale son de casi doble de tiempo con respecto a las dos primeras muestras de lutitas, por lo que podemos decir que este

tipo de lutitas (Napo Shale) es menos humectable que las lutitas de la formación Ortegua.



**Figura 4.14 Pastilla de lutita de Napo Shale (9770-9860)ft.
Elaborado por Pedro Orbe**

4.5 PRUEBA PARA FORMACIONES COMPUESTAS DE ARCILLA

4.5.1 HINCHAMIENTO LINEAL



**Figura 4.15 Equipo Dinámico de Hinchamiento Lineal
Fuente: M-ISWACO**

Previamente, antes de correr la prueba de hinchamiento lineal, se realizó la prueba de MBT (Methyl Blue Test) para verificar el grado de reactividad de las arcillas al

agua. Los resultados fueron los que se indican en la Tabla 4.4. Como se indica en la descripción de la prueba MBT los valores obtenidos son considerados altos por lo que son buenos candidatos para observar lo que sucede al interactuar la arcilla con el lodo de perforación base amina. La figura 4.16 indica cómo se tabulan los grados de reactividad de las arcillas en la prueba MBT.

TABLA 4.4 Resultados de MBT de las arcillas		
FORMACIÓN	cm ³ de Azul de Metileno	CEC $\left(\frac{\text{miltequivalentes}}{100\text{g de arcilla}}\right)$
TIYUYACU (7230 – 7300)	7	35
TIYUYACU (7590 – 7660)	8	40
TIYUYACU (7740 – 7800)	7	35
TENA (9090 – 9180)	7	35
TENA (9270 – 9360)	7	35

Elaborado por Pedro Orbe
Fuente: M-I SWACO

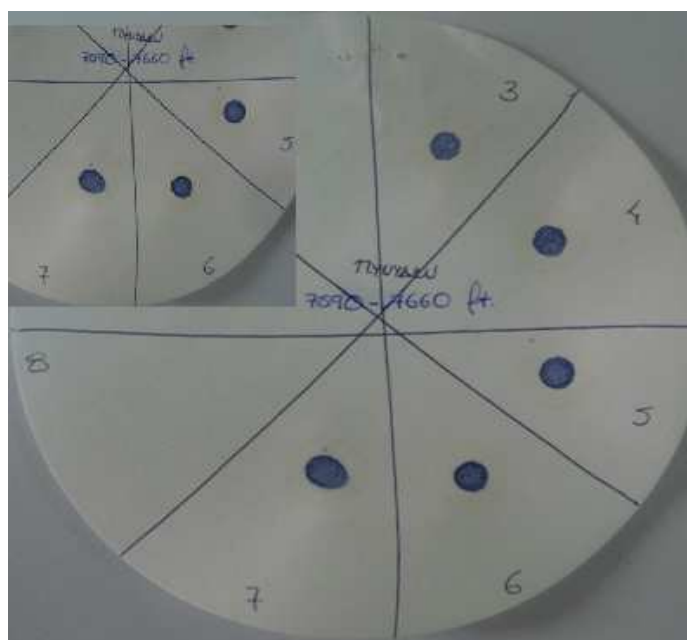


Figura 4.16 Resultado de MBT para Tiyuyacu (7590-7660)ft
Elaborado por Pedro Orbe

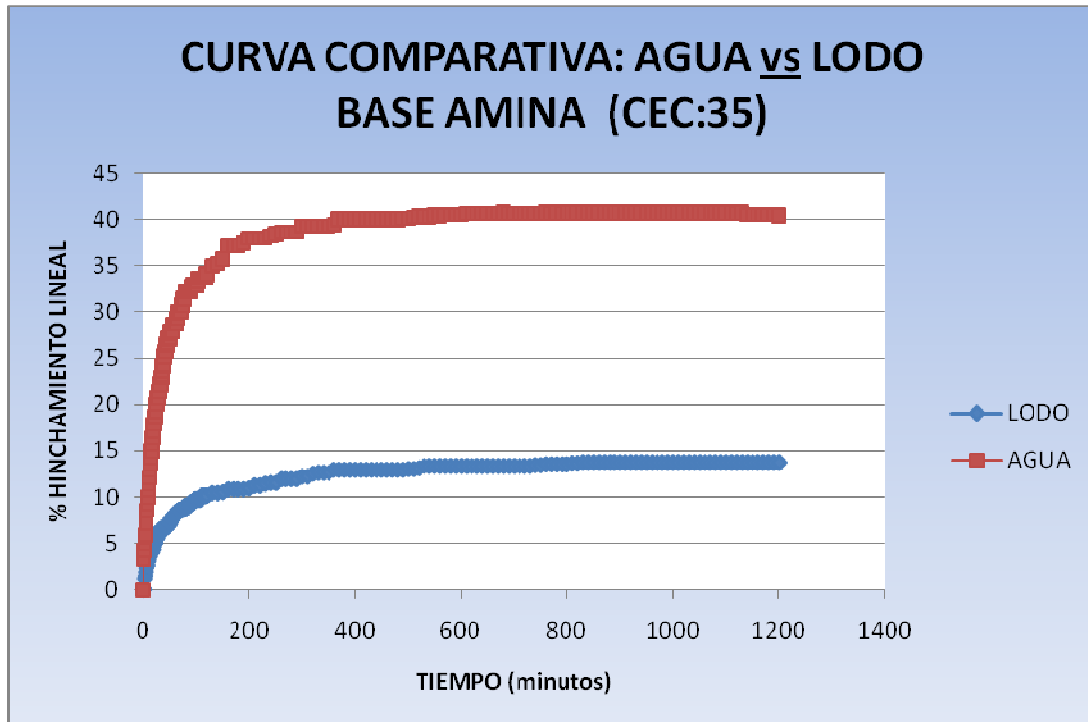
4.5.1.1 Tiyuyacu (7230 – 7300)ft

Se tomó 10 gramos de arcilla, 5 gramos para la prueba de hinchamiento con agua y 5 gramos para la prueba de hinchamiento con lodo rolado base amina, se llevó al compactador por un tiempo de 40 minutos y se obtuvo 2 pastillas con las mismas características de composición e idénticas en peso. Una vez extraídas, estas pastillas fueron llevadas a celdas diferentes (Figura 4.17), se agregó en la primera celda 250 ml de agua y en la segunda celda 250 ml de lodo base amina que se utilizó para la perforación del Pozo “X”.



Figura 4.17 Inicio de prueba (agregando fluidos)
Elaborado por Pedro Orbe

Se inició la prueba y se sometió la celda a calentamiento y agitación simulando las condiciones del pozo, luego de 20 horas (1200 minutos) expuesto al medidor de hinchamiento lineal se obtuvo un porcentaje de hinchamiento, tanto del agua como del lodo de perforación lo cual nos permitió realizar una comparación entre ellos como indica la Figura 4.18.



**Figura 4.18 Curva Comparativa Agua vs Lodo base amina: Tiyuyacu (7230 – 7300)ft
Elaborado por Pedro Orbe**

El tiempo que fue expuesta esta prueba tanto al lodo base amina como al agua en el sistema, observamos que la pastilla que estaba en el fluido de perforación base amina se hinchó un 13.7 % con respecto a su estado original, mientras que la pastilla que se encontraba sumergida en agua se hinchó el 40.4% de su estado original. La Figura 4.19 indica las diferencias físicas que existen entre la pastilla original y las pastillas corridas tanto con el agua como con el lodo base amina.



**Figura 4.19 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y
c) Hinchamiento con Agua
Elaborado por Pedro Orbe**

4.5.1.2 Tiyuyacu (7590 - 7660)ft

De la misma manera, se realizó 2 pastillas de arcilla de la profundidad de 7590 pies a 7660 pies pertenecientes a la formación Tiyuyacu, las que fueron expuestas al agua y al lodo rogado base amina por un lapso de tiempo de 20 horas (1200 minutos) como se puede observar en la Figura 4.20 en la que se está corriendo la prueba.

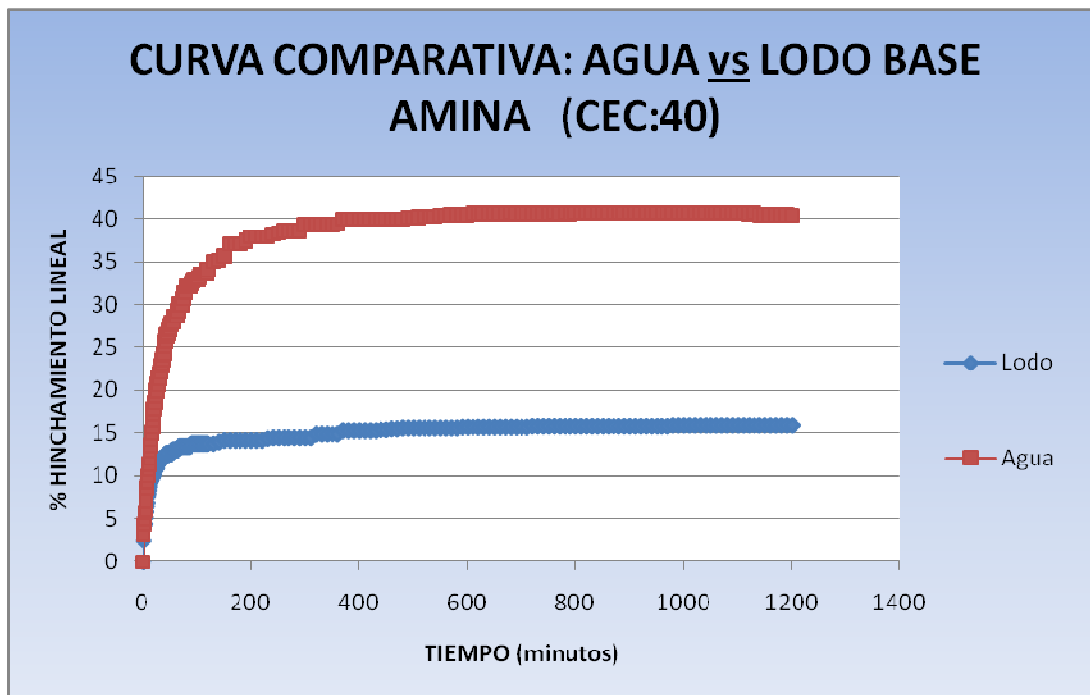


**Figura 4.20 Equipo de hinchamiento corriendo prueba
Elaborado por Pedro Orbe**

El aumento de volumen que se presentan en las pastillas es por efecto de la unión física y química de moléculas de agua que entran en la estructura de la arcilla como consecuencia del intercambio catiónico. Se expresó como porcentaje de hinchamiento medido en una dimensión, por el lapso de tiempo predeterminado (Figura 4.21).

El tiempo que duró esta prueba, la pastilla que estaba en el fluido de perforación base amina se hinchó un 15.5 % con respecto a su estado original, mientras que la pastilla que se encontraba sumergida en agua se hinchó el 40.4% de su estado original. La Figura 4.22 indica las diferencias físicas que existen entre la pastilla

original sin prueba alguna y las pastillas corridas el hinchamiento lineal tanto con el agua como con el lodo base amina.



**Figura 4.21 Curva Comparativa Agua vs Lodo base amina: Tiyuyacu (7590 - 7660)ft
Elaborado por Pedro Orbe**



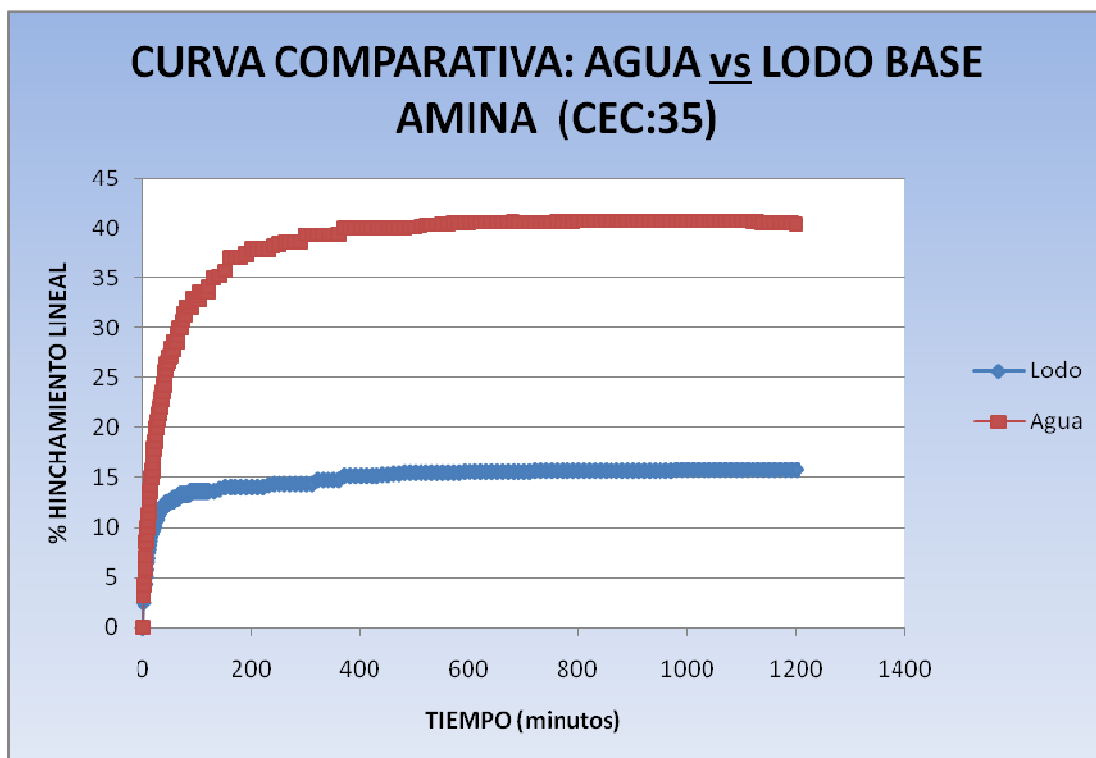
**Figura 4.22 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y
c) Hinchamiento con Agua
Elaborado por Pedro Orbe**

4.5.1.3 Tiyuyacu (7740 – 7800)ft

Las arcillas que corresponden a la profundidad de 7740 pies a 7800 pies fueron llevadas al compactador en 2 porciones de 5 gramos cada una, fueron sometidas a

una presión de 10000 psi por un tiempo de 40 minutos y después estas pastillas resultantes de la compactación de las arcillas fueron puestas en las celdas la una con lodo base amina y la otra celda con agua. La prueba de hinchamiento fue corrida por un tiempo de 20 horas (1200 minutos).

El intercambio catiónico del Potasio presente en el lodo base amina por los cationes de Calcio y Sodio presentes en las arcillas fue efectivo ya que la pastilla de arcilla sumergida en el lodo base amina se hinchó tan solo un 15.8% frente a un 40.4% correspondiente al hinchamiento de las arcillas sumergidas en agua como se indica en la Figura 4.23.



**Figura 4.23 Curva Comparativa Agua vs Lodo base amina: Tiyuyacu (7740 – 7800)ft
Elaborado por Pedro Orbe**

La figura 4.24 muestra las diferencias físicas entre las pastilla original la cual no ha sido sometida a ninguna interacción con ningún fluido, la pastilla de arcilla corrida la

prueba de hinchamiento con lodo base amina y por último la pastilla de arcilla corrida la prueba de hinchamiento con agua.



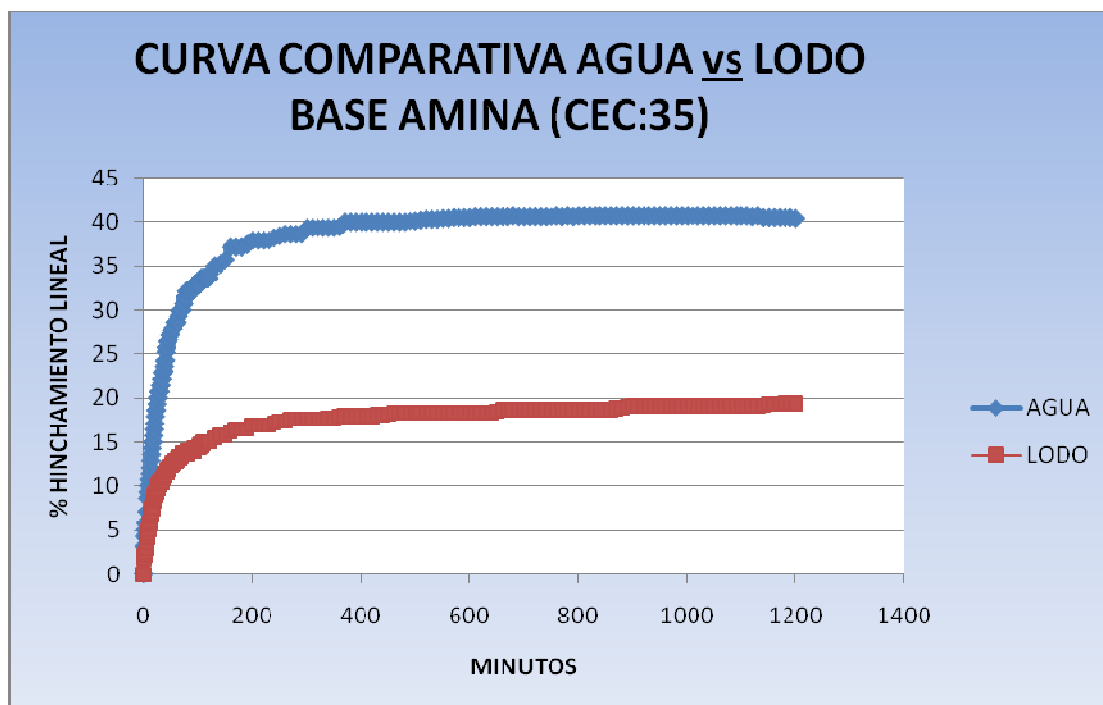
**Figura 4.24 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y c) Hinchamiento con Agua
Elaborado por Pedro Orbe**

4.5.1.4 Tena (9090 – 9180)ft

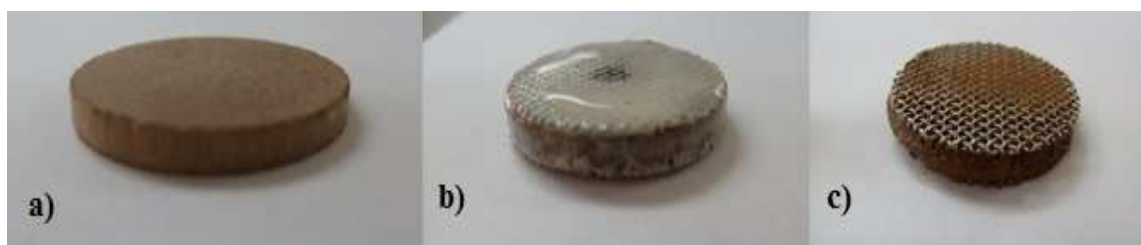
Se realizó 2 pastillas de arcilla (5 gramos cada una) de la profundidad de 9090 pies a 9180 pies pertenecientes a la formación Tena, las que fueron expuestas al agua y al lodo rolado base amina por un lapso de tiempo de 20 horas (1200 minutos).

El aumento de volumen que se presentan en las pastillas de arcilla es por efecto de la unión física y química de moléculas de agua que entran en la estructura de la arcilla como consecuencia del intercambio catiónico. Se expresó como porcentaje de hinchamiento medido en una dimensión, por el lapso de tiempo ya mencionado (Figura 4.25).

En el tiempo que duró la prueba de hinchamiento lineal, la pastilla que estaba sumergida en el fluido de perforación base amina se hinchó un 19.4 % con respecto a su estado original, mientras que la pastilla que se encontraba sumergida en agua se hinchó el 40.4% de su estado original. La Figura 4.26 indica las diferencias físicas que existen entre la pastilla original sin prueba alguna y las pastillas corridas el hinchamiento lineal tanto con el agua como con el lodo base amina.



**Figura 4.25 Curva Comparativa Agua vs Lodo base amina: Tena (9090 – 9180)ft
Elaborado por Pedro Orbe**



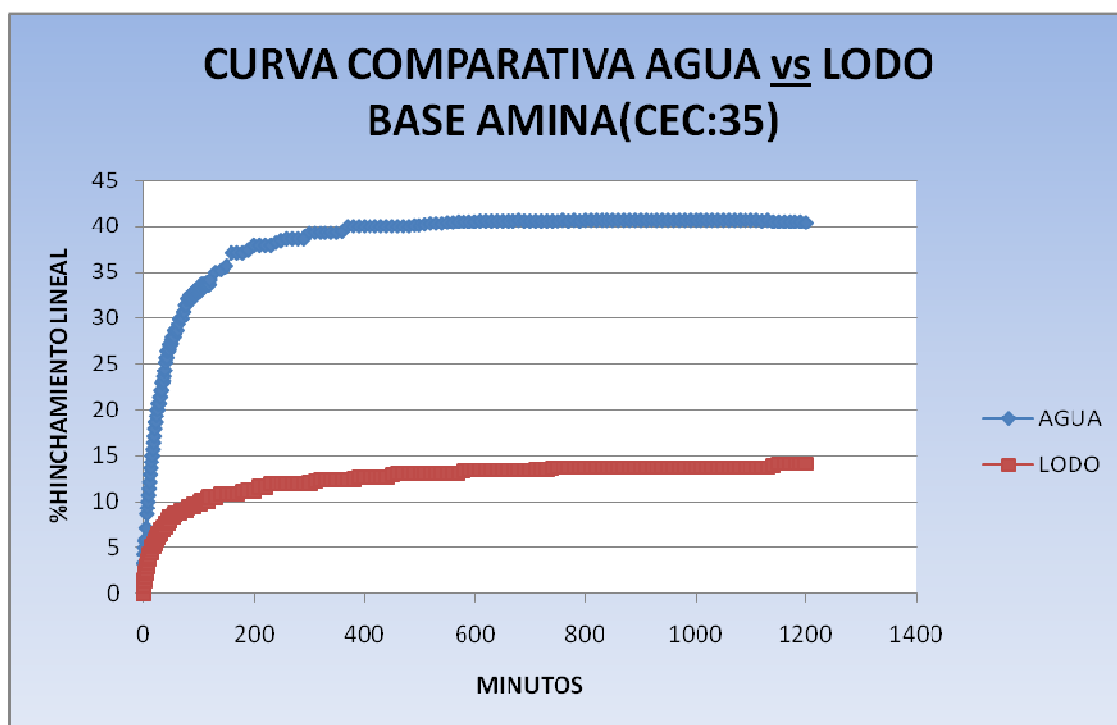
**Figura 4.26 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y
c) Hinchamiento con Agua
Elaborado por Pedro Orbe**

4.5.1.5 Tena (9270 – 9360)ft

Se tomó 10 gramos de arcilla, correspondiente a la profundidad entre 9270 pies y 9360 pies de la formación Tena, 5 gramos para la prueba de hinchamiento con agua y 5 gramos para la prueba de hinchamiento con lodo base amina, se llevó al compactador por un tiempo de 40 minutos y se obtuvo 2 pastillas con las mismas

características de composición e idénticas en peso. Se agregó en la primera celda 250 ml de agua y en la segunda celda 250 ml de lodo base amina que se utilizó para la perforación del Pozo "X".

Se inició la prueba y se sometió la celdas a calentamiento y agitación simulando las condiciones del pozo, luego de 20 horas (1200 minutos) expuesto al medidor de hinchamiento lineal se obtuvo un porcentaje de hinchamiento, tanto de las arcillas en presencia del agua como de las arcillas en presencia del lodo de perforación lo cual nos permitió realizar una comparación entre ellos como indica la Figura 4.27.



**Figura 4.27 Curva Comparativa Agua vs Lodo base amina: Tena (9270 – 9360)ft
Elaborado por Pedro Orbe**

Se pudo observar que la pastilla sumergida en el fluido de perforación base amina se hinchó un 14.1 % con respecto a su estado original, mientras que la pastilla que estaba sumergida en agua se hinchó el 40.4% con respecto a su estado original. La

figura 4.28 indica las diferencias físicas que existen entre la pastilla original y las pastillas corridas tanto con el agua como con el lodo base amina.



**Figura 4.28 a) Pastilla Original b) Hinchamiento con Lodo base amina y
c) Hinchamiento con Agua
Elaborado por Pedro Orbe**

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo con la toma de muestras, a éstas se las retiró el exceso de lodo y se las depositaron en bolsas de polipropileno, cada una marcadas con su respectiva numeración y profundidad para evitar que éstas sean afectadas o contaminadas para que conserven todas sus propiedades litológicas y su composición tanto para las arcillas como las lutitas.
- La prueba de filtración aseguró que los controladores de filtrado fueron aceptables evitando que la fase continua del lodo penetre hacia la formación causando el menor daño posible al Pozo "X".
- Fue indispensable trabajar con el lodo base amina alcalino ya que de esta manera evitamos que el fluido de perforación se corroa y sea mucho más manejable en situaciones de seguridad.
- Las pruebas básicas que se realizó al lodo base amina fueron satisfactorias ya que los resultados están bajo los rangos permisibles para ser considerado un buen fluido de perforación con lo que se garantizó un buen desempeño en los análisis de las pruebas especiales.
- El uso de las aminas en lodos de perforación proporciona al sistema una serie de ventajas ante las arcillas ya que impiden la invasión del agua en la estructura cristalina de estos minerales para que se hidraten e hinchen y se derive en

problemas de embolamiento, obturación del diámetro del hueco, entre otros, en el Pozo "X".

- Para las lutitas, los efectos inhibidores de las aminas y los polímeros evitaron que el agua se absorba en las superficies planas de las arcillas, que se encuentran en las lutitas evitando así, atascamientos de tubería, derrumbes, ensanchamientos del pozo entre otros problemas basados en el mismo problema que se puedan desencadenar en la perforación del Pozo "X".
- Los valores pico de voltaje en la prueba de Dureza al Humectar son muy similares lo que demuestra que las cuatro pruebas realizadas están dentro de un rango que no sobrepasa ni se aleja de los 225 lb/in. que es el torque máximo que se impone al sistema.
- En las pruebas de Dureza al Humectar con lutitas, las cuatro muestras se compactaron de manera casi perfecta, ya que al momento de ejercer torque, estas no se filtraron por las hendiduras que se encuentran en la parte inferior del sistema, lo que fue comprobado al volver a pesarlas, de los 30 gramos iniciales, al final de las pruebas éstas perdieron aproximadamente de 0.27 gramos la mínima hasta 0.40 gramos de su peso total
- Los diferentes valores de tiempo presentes en la prueba de Dureza al Humectar indican que en la Formación Orteguzza, las lutitas llegaron a su torque máximo en tiempos de 6 y 8 segundos pertenecientes a profundidades de 6400-6495 ft y 6800-6850 ft respectivamente, mientras que en la formación Napo Shale las dos pruebas marcaron un tiempo igual de 15 segundos pertenecientes a las profundidades de 9450-9540 ft y 9770-9860 ft. Con lo que podemos comparar que la Formación Orteguzza alberga lutitas mucho más hidratables e inestables que las lutitas presentes en la Formación Napo Shale, ya que los tiempos de ambas formaciones están en una relación aproximada de 1:2 respectivamente.

- En general, las lutitas presentes en las formaciones Orteguzza y Napo Shale se inhibieron de manera satisfactoria ya que al realizar las pruebas de Dureza al Humectar éstas no sobrepasaron en ninguna de las pruebas los 20 segundos al exponerse a torque.
- Las muestras escogidas para la prueba de Hinchamiento Lineal manifestaron valores altos de reactividad en la prueba de MBT con los que se obtuvieron buenos resultados de la interacción de las arcillas con el fluido de perforación base amina.
- En la prueba de Hinchamiento Lineal, los valores resultantes en porcentaje para la Formación Tiyuyacu en las profundidades de 7230-7300 ft, 7590-7660 ft y 7740-7800 ft fueron de un 13.7%, 15.5% y 15.8% de hinchamiento de la pastilla de arcilla en presencia del lodo base amina versus el 40.4% de hinchamiento de la pastilla de arcilla en presencia de agua de las tres profundidades respectivamente. Con lo que se concluye que las arcillas reactivas se inhibieron de manera sustancial e importante con respecto a la exposición de las mismas con el lodo base amina y el agua en una relación de 2.8:1 veces aproximadamente.
- En las pruebas de Hinchamiento Lineal para la Formación Tena en las profundidades de 9270-9360 ft y 9090-9180 ft, mostraron valores de 14.1% y 19.4% de hinchamiento de las arcillas en presencia del lodo base amina frente a un 40.4% de hinchamiento de las mismas en presencia de agua, con lo que se concluye que las arcillas reactivas se inhibieron efectivamente en una relación aproximada promedio de 2.4:1 veces, las arcillas con el lodo y el agua respectivamente, evitando que las moléculas de agua presentes en el fluido de perforación ingresen en la estructura de las arcillas por efectos del intercambio catiónico.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para asegurar el éxito en la inhibición de las arcillas reactivas y de las lutitas inestables en la perforación del Pozo “X” como la perforación de cualquier otro pozo del Oriente Ecuatoriano se recomienda realizar una correcta formulación del lodo base amina y así evitar problemas que suscitan en los procesos de perforación.
- Se recomienda reportar los resultados de las pruebas realizadas del lodo base amina una vez que se lo haya rolado por un periodo de 16 horas tanto para las pruebas básicas como para las especiales con mucho cuidado y exactitud ya que los valores erróneos causarían graves problemas en el pozo.
- En el momento de realizar las pruebas de Hinchamiento Lineal se sugiere trabajar con muestras que tengan un alto valor de reactividad para estimar una formulación que tenga un rango que pueda inhibir eficientemente las arcillas y lutitas.
- Se debe tener en cuenta un porcentaje de error al aplicar las pruebas especiales en campo, pues las condiciones de laboratorio, en especial la presión y temperatura aunque el lodo esté rolado, no son las mismas que a una profundidad determinada.
- En el caso que pese a que formulación del lodo base amina está diseñado para inhibir las arcillas y lutitas, si existe desmoronamiento de lutitas se recomienda en primera instancia aumentar la densidad del lodo en grado suficiente para exceder la presión existente dentro de la formación.

- Para el tratamiento de los problemas de las arcillas, lutitas frágiles y fracturadas, es importante reducir al mínimo la pérdida de filtrado del lodo, con el fin de evitar humedecer esas arcillas y lutitas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE PERFORACIÓN, Biodegradabilidad Aerobia De Aditivos Empleados En Fluidos De Perforación, México 2000.
- BARBERI, Efraín. El Pozo Ilustrado I y II. Ediciones PDVSA. Caracas-Venezuela.
- ChevronTexaco, Progression of Water-Based Fluids Based on Amine Chemistry Can the Road Lead to True Oil Mud Replacements, April 2003
- Dowell Schlumberger de Venezuela, S.A, FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y SISTEMAS DE DOWELL SCHLUMBERGER DRILLING FLUIDS.
- Folleto de Ingeniería de Yacimientos, Petroecuador.
- <http://www.fann.com>
- http://www.monografías.com/ecologia/el_petróleo.polimeros_y_derivados
- <http://www.oakton.com>
- <http://www.ofite.com>
- <http://www.uclm.es>
- LARA ARIAS SANTIAGO JAVIER, "ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DEL SISTEMA ROMPEDOR DE REVOQUE N-FLOW EN POZOS HORIZONTALES EN UN CAMPO DEL ORIENTE ECUATORIANO", Escuela Politécnica Nacional, Septiembre 2007.
- M-I SWACO, CURSO FLUIDOS DE PERFORACIÓN, preparado por Ing. Luis Díaz, Febrero 2006

- Malvern Instrument Limited, Instrument Manual Master Sizer E, pp 2.1-2.3, Inglaterra, 1992.
- Manual de Fluidos M-I SWACO, Manual, Febrero 14, 2001
- PDVSA, Control De Filtrado En Zonas Productoras De Interés Con El Uso De Sólidos Y Su Efecto En La Productividad De Pozos
- RAMÍREZ Jorge. Arcilla, Química Industrial 2003-2004

GLOSARIO

- **Absorción:** Dicho de una sustancia sólida: Ejercer atracción sobre un fluido con el que está en contacto, de modo que las moléculas de este penetren en aquella. La penetración o desaparición aparente de moléculas o iones de una o varias sustancias dentro de un sólido o líquido.
- **Acidez:** Potencia ácida relativa de los líquidos, que se mide por medio del pH. Acidez implica un pH inferior a 7.0
- **Adhesión:** Fuerza que mantiene juntas a moléculas diferentes.
- **Adsorción:** Atraer y retener en la superficie de un cuerpo moléculas o iones de otro cuerpo. Un fenómeno superficial demostrado por un sólido (adsorbente) para mantener o concentrar gases, líquidos o sustancias disueltas (adsortivos) sobre su superficie, una propiedad causada por la adhesión.
- **Aglomeración:** Agrupamiento de partículas individuales.
- **Alúmina:** Óxido de aluminio que se halla en la naturaleza algunas veces puro y cristalizado, y por lo común formando, en combinación con la sílice y otros cuerpos, los feldespatos y las arcillas.
- **Apical:** Perteneciente o relativo a un ápice o punta, o localizado en ellos.
- **Arcilla:** Dícese de aquella materia plástica, blanda, de varios colores, generalmente compuesta por silicato de aluminio, formada por la descomposición del feldespato y otros silicatos de aluminio.
- **Atapulgita:** Arcilla coloidal compuesta por silicato hidratado de aluminio y magnesio utilizada en agua salada.
- **Barita:** Sulfato de bario natural que se usa para aumentar la densidad de los lodos. El mineral se manifiesta en depósitos de color gris, blanco, verdoso y/o rojizo, y en estructuras masivas de cristal.
- **Bentonita:** Arcilla plástica, coloidal, constituida principalmente por Montmorillonita sódica, que es un silicato de aluminio hidratado.

- **Brucita:** Mineral formado de magnesia hidratada, de color blanco o gris y brillo nacarado, infusible al soplete, y que se halla en cristales o masas compactas. Se emplea en medicina.
- **Catión:** Partícula positivamente cargada en la solución de un electrolito que bajo la influencia de un potencial eléctrico, se moviliza hacia el cátodo (electrodo negativo).
- **Cohesión:** La fuerza de atracción entre moléculas del mismo tipo. Acción y efecto de reunirse o adherirse las cosas entre sí o la materia de que están formadas
- **Coloide:** Estado de subdivisión de la materia que consiste en grandes moléculas individuales o en agregados de moléculas más pequeñas, dispersadas en el grado que la fuerza de superficie se convierte en un factor importante para determinar sus propiedades. El tamaño de las partículas coloidales varían entre 0.001 a 0.005 micrones.
- **Copolímero:** Una sustancia formada cuando dos o más sustancias se polimerizan al mismo tiempo para generar un producto que no constituye una mezcla de polímeros separados, sino un complejo cuyas propiedades son diferentes de las propiedades individuales de cualquiera de estos polímeros.
- **Embolamiento:** Acumulación de material perforado por encima de la broca o barrena impidiendo que se continúe perforando.
- **Filtrado:** Líquido forzado a través de un medio poroso durante el proceso de filtración.
- **Gumbo:** Cualquier formación de consistencia pegajosa, como las arcillas encontradas durante la perforación.
- **Hidratación:** Acto por el cual una sustancia admite agua por medio de absorción y / o adsorción.
- **Junta Tórica:** Elemento de caucho circular en forma de anillo. Sirve como sellador para obtener cierre hermético de dos elementos por lo general de metal.
- **Lutitas:** Arcilla de origen rocoso, finamente granular, con clivaje tipo pizarra, que es una sustancia orgánica parecida al petróleo.
- **Monómero:** Unión de polímeros repetidos.

- **Poliacrilato:** Un polímero sintético de alto peso molecular, usado principalmente como agente de control de filtrado.
- **Polímero:** Sustancia formada por la unión de dos o más moléculas iguales, unidas extremo con extremo, dando por resultado una sustancia que posee los mismos elementos en la misma proporción que las moléculas originales, pero de mayor peso molecular y con diferentes propiedades físicas.
- **Presión Osmótica:** La que ejercen las partículas del disolvente en una disolución sobre la membrana semipermeable que la separa de otra de mayor concentración.
- **Revoque:** Los sólidos suspendidos que se depositan sobre un medio poroso durante el proceso de filtración.
- **Tensión Superficial:** Generalmente, la fuerza que actúa dentro de la superficie de contacto entre un líquido y su propio vapor, y que tiende a minimizar el área de la superficie, expresada en dinas por centímetro. Como la tensión superficial de un líquido es aproximadamente igual a la tensión interfacial entre el líquido y el aire, los valores medidos respecto al aire son frecuentemente usados para indicar la tensión superficial, y se suele usar el término "tensión interfacial" para las medidas tomadas en una superficie de contacto entre dos líquidos, o un líquido y un sólido.
- **Tixotropía:** Capacidad de un fluido para desarrollar resistencia de gel con el tiempo. Cualidad de una suspensión coloidal de desarrollar una fuerza gelificante cuando se encuentra en reposo, pero que se convierte nuevamente en fluido por agitación mecánica.
- **Viscosidad:** Resistencia interna al flujo ofrecido por un fluido debido a atracciones entre moléculas.

ANEXO A

Tablas de datos de Dureza al Humectar de Orteguaza

ORTEGUAZA (6400-6450) ft

Tiempo (s)	Voltaje (mV)
0	-0.0031
1	0.0093
2	0.0156
3	0.0205
4	0.0231
5	0.0156
6	-0.0028
7	-0.004

ORTEGUAZA (6800-6850) ft

Tiempo (s)	Voltaje (mV)
0	-0.0002
1	0.0006
2	0.0016
3	0.001
4	0.0043
5	0.0074
6	0.011
7	0.0131
8	0.0133
9	0.0133
10	0.0126
11	0.0109
12	-0.0041
13	-0.0041

ANEXO B

Tabla de datos de las pruebas de Dureza al Humectar de Napo (Shale)

NAPO SHALE (9450-9540) ft		NAPO SHALE (9770-9860) ft	
Tiempo (s)	Voltaje (mV)	Tiempo (s)	Voltaje (mV)
0	-0.0008	1	-0.0007
1	0.0003	2	0
2	0.0023	3	0.002
3	0.0032	4	0.0032
4	0.0048	5	0.0056
5	0.00548	6	0.007
6	0.0065	7	0.0101
7	0.0077	8	0.0111
8	0.0073	9	0.0127
9	0.0088	10	0.0133
10	0.0096	11	0.0134
11	0.0108	12	0.0141
12	0.0117	13	0.014
13	0.0121	14	0.0138
14	0.0122	15	0.0138
15	0.0102	16	0.0135
16	-0.0038	17	-0.004

ANEXO C

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal Tiyuyacu (7230 – 7300) ft

Minutos	H. Lodo	H. Agua
0	0	0
1	0	3.2
2	0	4.3
3	1.1	5
4	1.4	5.7
5	1.8	5.9
6	2.2	7.1
7	2.5	8.6
8	2.5	9.3
9	2.9	10
10	3.2	10.7
11	3.6	11.4
12	3.6	12.1
13	4	12.9
14	4	13.6
15	4	14.3
16	4	15
17	4.3	15
18	4.3	15.7
19	4.3	16.4
20	4.7	17.1
21	5	17.9
22	5	18.6
23	5	18.6
24	5.4	19.3
25	5.4	20
26	5.5	20
27	5.8	20.7
28	5.8	20.7
29	5.8	20.7
30	6.1	21.4
31	6.1	21.4
32	6.1	22.1
33	6.5	22.1
34	6.5	22.9
35	6.5	22.9
36	6.5	23.1
37	6.5	23.6
38	6.5	24.2

Continuación Tiyuyacu (7230-7300) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
39	6.5	24.3
40	6.5	25.2
41	6.5	25.7
42	6.8	25.7
43	6.8	26.4
44	6.8	26.4
45	6.8	26.4
46	6.8	26.6
47	6.8	27.1
48	6.9	27.1
49	7.2	27.1
50	7.2	27.2
51	7.2	27.6
52	7.6	27.9
53	7.6	27.9
54	7.6	27.9
55	7.9	27.9
56	7.9	28.6
57	7.9	28.6
58	7.9	28.6
59	7.9	28.6
60	7.9	28.6
61	8.3	28.6
62	8.3	28.6
63	8.3	29.3
64	8.3	29.3
65	8.3	29.9
66	8.5	30
67	8.6	30
68	8.6	30
69	8.6	30
70	8.6	30
71	8.6	30
72	8.6	30.7
73	8.6	30.7
74	8.6	30.7
75	8.6	31.4
76	8.6	31.4

Continuación Tiyuyacu (7230-7300) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
77	8.7	31.4
78	9	31.4
79	9	32.1
80	9	32.1
81	9	32.1
82	9	32.1
83	9	32.1
84	9	32.1
85	9	32.1
86	9	32.1
87	9	32.1
88	9	32.1
89	9.4	32.1
90	9.4	32.5
91	9.4	32.6
92	9.4	32.8
93	9.4	32.9
94	9.4	32.9
95	9.4	32.9
96	9.4	32.9
97	9.6	32.9
98	9.7	32.9
99	9.7	32.9
100	9.7	32.9
101	9.7	32.9
102	9.7	32.9
103	9.7	32.9
104	9.7	33.2
105	9.7	33.6
106	9.7	33.6
107	9.7	33.6
108	9.7	33.6
109	9.7	33.6
110	9.9	33.6
111	10.1	33.6
112	10.1	33.6
113	10.1	33.6
114	10.1	33.6
115	10.1	33.6
116	10.1	33.6

Continuación Tiyuyacu (7230-7300) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
117	10.1	33.6
118	10.1	33.6
119	10.1	33.6
120	10.1	34.1
130	10.4	35
140	10.4	35.2
150	10.5	35.7
160	10.8	37.1
170	10.8	37.1
180	10.8	37.1
190	10.8	37.4
200	10.9	37.9
210	11.2	37.9
220	11.2	37.9
230	11.4	37.9
240	11.5	38.2
250	11.5	38.4
260	11.9	38.6
270	11.9	38.6
280	11.9	38.6
290	11.9	38.6
300	12.2	39.3
310	12.2	39.3
320	12.5	39.3
330	12.6	39.3
340	12.6	39.3
350	12.6	39.3
360	12.9	39.4
370	12.9	40
380	12.9	40
390	12.9	40
400	12.9	40
410	12.9	40
420	12.9	40
430	12.9	40
440	12.9	40
450	12.9	40
460	12.9	40
470	12.9	40
480	12.9	40

Continuación Tiyuyacu (7230-7300) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
490	12.9	40.1
500	13	40.1
510	13	40.2
520	13.1	40.3
530	13.3	40.3
540	13.3	40.3
550	13.3	40.4
560	13.3	40.4
570	13.3	40.5
580	13.3	40.5
590	13.3	40.5
600	13.3	40.5
610	13.3	40.6
620	13.3	40.6
630	13.3	40.6
640	13.3	40.6
650	13.3	40.6
660	13.3	40.6
670	13.3	40.6
680	13.3	40.7
690	13.3	40.6
700	13.3	40.6
710	13.3	40.6
720	13.3	40.6
730	13.3	40.6
740	13.4	40.6
750	13.4	40.6
760	13.5	40.7
770	13.5	40.6
780	13.5	40.7
790	13.5	40.6
800	13.5	40.7
810	13.6	40.7
820	13.6	40.7
830	13.7	40.7
840	13.7	40.7
850	13.7	40.7
860	13.7	40.7
870	13.7	40.7
880	13.7	40.7

Continuación Tiyuyacu (7230-7300) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
890	13.7	40.7
900	13.7	40.7
910	13.7	40.7
920	13.7	40.7
930	13.7	40.7
940	13.7	40.7
950	13.7	40.7
960	13.7	40.7
970	13.7	40.7
980	13.7	40.7
990	13.7	40.7
1000	13.7	40.7
1010	13.7	40.7
1020	13.7	40.7
1030	13.7	40.7
1040	13.7	40.7
1050	13.7	40.7
1060	13.7	40.7
1070	13.7	40.7
1080	13.7	40.7
1090	13.7	40.7
1100	13.7	40.7
1110	13.7	40.7
1120	13.7	40.6
1130	13.7	40.7
1140	13.7	40.5
1150	13.7	40.5
1160	13.7	40.5
1170	13.7	40.5
1180	13.7	40.5
1190	13.7	40.5
1200	13.7	40.4

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal Tiyuyacu (7590 - 7660)ft

Minutos	H. Agua	H. Lodo
	0	0
1	3.2	2.5
2	4.3	4.3
3	5	4.3
4	5.7	4.4
5	5.9	5.1
6	7.1	5.8
7	8.6	6.5
8	9.3	6.9
9	10	7.6
10	10.7	7.9
11	11.4	8.3
12	12.1	8.7
13	12.9	9.1
14	13.6	9.4
15	14.3	9.4
16	15	9.7
17	15	9.7
18	15.7	9.8
19	16.4	10.1
20	17.1	10.1
21	17.9	10.5
22	18.6	10.8
23	18.6	10.8
24	19.3	10.8
25	20	10.8
26	20	11.2
27	20.7	11.2
28	20.7	11.6
29	20.7	11.6
30	21.4	11.6
31	21.4	11.9
32	22.1	11.9
33	22.1	11.9
34	22.9	11.9
35	22.9	11.9
36	23.1	11.9
37	23.6	11.9
38	24.2	12.3

Continuación Tiyuyacu (7590-7660) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
39	24.3	12.3
40	25.2	12.3
41	25.7	12.3
42	25.7	12.6
43	26.4	12.6
44	26.4	12.6
45	26.4	12.6
46	26.6	12.6
47	27.1	12.6
48	27.1	12.6
49	27.1	12.6
50	27.2	12.6
51	27.6	12.6
52	27.9	12.6
53	27.9	12.6
54	27.9	13
55	27.9	13
56	28.6	13
57	28.6	13
58	28.6	13
59	28.6	13
60	28.6	13
61	28.6	13
62	28.6	13
63	29.3	13
64	29.3	13.1
65	29.9	13.1
66	30	13.4
67	30	13.4
68	30	13.4
69	30	13.4
70	30	13.4
71	30	13.4
72	30.7	13.4
73	30.7	13.4
74	30.7	13.4
75	31.4	13.4
76	31.4	13.4

Continuación Tiyuyacu (7590-7660) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
77	31.4	13.4
78	31.4	13.4
79	32.1	13.4
80	32.1	13.4
81	32.1	13.4
82	32.1	13.4
83	32.1	13.4
84	32.1	13.4
85	32.1	13.4
86	32.1	13.4
87	32.1	13.6
88	32.1	13.7
89	32.1	13.7
90	32.5	13.7
91	32.6	13.7
92	32.8	13.7
93	32.9	13.7
94	32.9	13.7
95	32.9	13.7
96	32.9	13.7
97	32.9	13.7
98	32.9	13.7
99	32.9	13.7
100	32.9	13.7
101	32.9	13.7
102	32.9	13.7
103	32.9	13.7
104	33.2	13.7
105	33.6	13.7
106	33.6	13.7
107	33.6	13.7
108	33.6	13.7
109	33.6	13.7
110	33.6	13.7
111	33.6	13.7
112	33.6	13.7
113	33.6	13.7
114	33.6	13.7
115	33.6	13.7
116	33.6	13.7

Continuación Tiyuyacu (7590-7660) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
117	33.6	13.7
118	33.6	13.7
119	33.6	13.7
120	34.1	13.7
130	35	13.7
140	35.2	13.9
150	35.7	14.1
160	37.1	14.1
170	37.1	14.1
180	37.1	14.1
190	37.4	14.1
200	37.9	14.1
210	37.9	14.1
220	37.9	14.1
230	37.9	14.3
240	38.2	14.4
250	38.4	14.4
260	38.6	14.4
270	38.6	14.4
280	38.6	14.4
290	38.6	14.4
300	39.3	14.4
310	39.3	14.4
320	39.3	14.8
330	39.3	14.8
340	39.3	14.8
350	39.3	14.8
360	39.4	14.8
370	40	15.2
380	40	15.2
390	40	15.2
400	40	15.2
410	40	15.2
420	40	15.2
430	40	15.2
440	40	15.3
450	40	15.3
460	40	15.4
470	40	15.4
480	40	15.5

Continuación Tiyuyacu (7590-7660) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
490	40.1	15.5
500	40.1	15.5
510	40.2	15.5
520	40.3	15.5
530	40.3	15.5
540	40.3	15.5
550	40.4	15.5
560	40.4	15.5
570	40.5	15.5
580	40.5	15.5
590	40.5	15.5
600	40.5	15.5
610	40.6	15.5
620	40.6	15.5
630	40.6	15.5
640	40.6	15.5
650	40.6	15.5
660	40.6	15.5
670	40.6	15.5
680	40.7	15.5
690	40.6	15.5
700	40.6	15.5
710	40.6	15.5
720	40.6	15.5
730	40.6	15.5
740	40.6	15.5
750	40.6	15.5
760	40.7	15.5
770	40.6	15.5
780	40.7	15.5
790	40.6	15.5
800	40.7	15.5
810	40.7	15.5
820	40.7	15.5
830	40.7	15.5
840	40.7	15.5
850	40.7	15.5
860	40.7	15.5
870	40.7	15.5
880	40.7	15.5

Continuación Tiyuyacu (7590-7660) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
890	40.7	15.5
900	40.7	15.5
910	40.7	15.5
920	40.7	15.5
930	40.7	15.5
940	40.7	15.5
950	40.7	15.5
960	40.7	15.5
970	40.7	15.5
980	40.7	15.5
990	40.7	15.5
1000	40.7	15.5
1010	40.7	15.5
1020	40.7	15.5
1030	40.7	15.5
1040	40.7	15.5
1050	40.7	15.5
1060	40.7	15.5
1070	40.7	15.5
1080	40.7	15.5
1090	40.7	15.5
1100	40.7	15.5
1110	40.7	15.5
1120	40.6	15.5
1130	40.7	15.5
1140	40.5	15.5
1150	40.5	15.5
1160	40.5	15.5
1170	40.5	15.5
1180	40.5	15.5
1190	40.5	15.5
1200	40.4	15.5

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal Tiyuyacu (7740 - 7800) ft

Minutos	H. Lodo	H. Agua
0	0	0
1	2.5	3.2
2	4.3	4.3
3	4.3	5
4	4.4	5.7
5	5.1	5.9
6	5.8	7.1
7	6.5	8.6
8	6.9	9.3
9	7.6	10
10	7.9	10.7
11	8.3	11.4
12	8.7	12.1
13	9.1	12.9
14	9.4	13.6
15	9.4	14.3
16	9.7	15
17	9.7	15
18	9.8	15.7
19	10.1	16.4
20	10.1	17.1
21	10.5	17.9
22	10.8	18.6
23	10.8	18.6
24	10.8	19.3
25	10.8	20
26	11.2	20
27	11.2	20.7
28	11.6	20.7
29	11.6	20.7
30	11.6	21.4
31	11.9	21.4
32	11.9	22.1
33	11.9	22.1
34	11.9	22.9
35	11.9	22.9
36	11.9	23.1
37	11.9	23.6
38	12.3	24.2

Continuación Tiyuyacu (7740-7800) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
39	12.3	24.3
40	12.3	25.2
41	12.3	25.7
42	12.6	25.7
43	12.6	26.4
44	12.6	26.4
45	12.6	26.4
46	12.6	26.6
47	12.6	27.1
48	12.6	27.1
49	12.6	27.1
50	12.6	27.2
51	12.6	27.6
52	12.6	27.9
53	12.6	27.9
54	13	27.9
55	13	27.9
56	13	28.6
57	13	28.6
58	13	28.6
59	13	28.6
60	13	28.6
61	13	28.6
62	13	28.6
63	13	29.3
64	13.1	29.3
65	13.1	29.9
66	13.4	30
67	13.4	30
68	13.4	30
69	13.4	30
70	13.4	30
71	13.4	30
72	13.4	30.7
73	13.4	30.7
74	13.4	30.7
75	13.4	31.4
76	13.4	31.4

Continuación Tiyuyacu (7740-7800) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
77	13.4	31.4
78	13.4	31.4
79	13.4	32.1
80	13.4	32.1
81	13.4	32.1
82	13.4	32.1
83	13.4	32.1
84	13.4	32.1
85	13.4	32.1
86	13.4	32.1
87	13.6	32.1
88	13.7	32.1
89	13.7	32.1
90	13.7	32.5
91	13.7	32.6
92	13.7	32.8
93	13.7	32.9
94	13.7	32.9
95	13.7	32.9
96	13.7	32.9
97	13.7	32.9
98	13.7	32.9
99	13.7	32.9
100	13.7	32.9
101	13.7	32.9
102	13.7	32.9
103	13.7	32.9
104	13.7	33.2
105	13.7	33.6
106	13.7	33.6
107	13.7	33.6
108	13.7	33.6
109	13.7	33.6
110	13.7	33.6
111	13.7	33.6
112	13.7	33.6
113	13.7	33.6
114	13.7	33.6
115	13.7	33.6
116	13.7	33.6

Continuación Tiyuyacu (7740-7800) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
117	13.7	33.6
118	13.7	33.6
119	13.7	33.6
120	13.7	34.1
130	13.7	35
140	13.9	35.2
150	14.1	35.7
160	14.1	37.1
170	14.1	37.1
180	14.1	37.1
190	14.1	37.4
200	14.1	37.9
210	14.1	37.9
220	14.1	37.9
230	14.3	37.9
240	14.4	38.2
250	14.4	38.4
260	14.4	38.6
270	14.4	38.6
280	14.4	38.6
290	14.4	38.6
300	14.4	39.3
310	14.4	39.3
320	14.8	39.3
330	14.8	39.3
340	14.8	39.3
350	14.8	39.3
360	14.8	39.4
370	15.2	40
380	15.2	40
390	15.2	40
400	15.2	40
410	15.2	40
420	15.2	40
430	15.2	40
440	15.3	40
450	15.3	40
460	15.4	40
470	15.4	40
480	15.5	40

Continuación Tiyuyacu (7740-7800) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
490	15.5	40.1
500	15.5	40.1
510	15.5	40.2
520	15.5	40.3
530	15.5	40.3
540	15.5	40.3
550	15.5	40.4
560	15.5	40.4
570	15.5	40.5
580	15.5	40.5
590	15.6	40.5
600	15.6	40.5
610	15.6	40.6
620	15.6	40.6
630	15.6	40.6
640	15.6	40.6
650	15.6	40.6
660	15.6	40.6
670	15.6	40.6
680	15.6	40.7
690	15.6	40.6
700	15.6	40.6
710	15.6	40.6
720	15.7	40.6
730	15.7	40.6
740	15.7	40.6
750	15.7	40.6
760	15.7	40.7
770	15.7	40.6
780	15.7	40.7
790	15.7	40.6
800	15.7	40.7
810	15.7	40.7
820	15.7	40.7
830	15.7	40.7
840	15.7	40.7
850	15.7	40.7
860	15.7	40.7
870	15.7	40.7
880	15.7	40.7

Continuación Tiyuyacu (7740-7800) ft		
Minutos	H. Lodo	H. Agua
890	15.7	40.7
900	15.7	40.7
910	15.7	40.7
920	15.7	40.7
930	15.7	40.7
940	15.7	40.7
950	15.7	40.7
960	15.7	40.7
970	15.7	40.7
980	15.8	40.7
990	15.8	40.7
1000	15.8	40.7
1010	15.8	40.7
1020	15.8	40.7
1030	15.8	40.7
1040	15.8	40.7
1050	15.8	40.7
1060	15.8	40.7
1070	15.8	40.7
1080	15.8	40.7
1090	15.8	40.7
1100	15.8	40.7
1110	15.8	40.7
1120	15.8	40.6
1130	15.8	40.7
1140	15.8	40.5
1150	15.8	40.5
1160	15.8	40.5
1170	15.8	40.5
1180	15.8	40.5
1190	15.8	40.5
1200	15.8	40.4

ANEXO D

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal Tena (9090 – 9180) ft

MINUTOS	H. AGUA	H. LODO	Continuación Tena (9090-9189) ft		
0	0	0	MINUTOS	H. AGUA	H. LODO
1	3.2	1.8	39	24.3	11.5
2	4.3	2.2	40	25.2	11.5
3	5	2.2	41	25.7	11.5
4	5.7	2.5	42	25.7	11.5
5	5.9	2.9	43	26.4	11.5
6	7.1	3.6	44	26.4	11.9
7	8.6	4.2	45	26.4	11.9
8	9.3	4.7	46	26.6	12.1
9	10	5	47	27.1	12.2
10	10.7	5.6	48	27.1	12.2
11	11.4	5.8	49	27.1	12.2
12	12.1	6.1	50	27.2	12.2
13	12.9	6.5	51	27.6	12.4
14	13.6	6.8	52	27.9	12.6
15	14.3	7.1	53	27.9	12.6
16	15	7.5	54	27.9	12.6
17	15	7.6	55	27.9	12.7
18	15.7	8.3	56	28.6	12.9
19	16.4	8.6	57	28.6	12.9
20	17.1	8.8	58	28.6	12.9
21	17.9	9	59	28.6	12.9
22	18.6	9	60	28.6	12.9
23	18.6	9.3	61	28.6	12.9
24	19.3	9.4	62	28.6	13
25	20	9.7	63	29.3	13.3
26	20	9.7	64	29.3	13.3
27	20.7	10.1	65	29.9	13.3
28	20.7	10.1	66	30	13.3
29	20.7	10.1	67	30	13.3
30	21.4	10.4	68	30	13.3
31	21.4	10.4	69	30	13.4
32	22.1	10.4	70	30	13.7
33	22.1	10.4	71	30	13.7
34	22.9	10.8	72	30.7	13.7
35	22.9	10.8	73	30.7	13.7
36	23.1	10.8	74	30.7	13.7
37	23.6	11.1	75	31.4	13.7
38	24.2	11.2	76	31.4	13.7

Continuación Tena (9090-9189) ft		
MINUTOS	H. AGUA	H. LODO
77	31.4	13.7
78	31.4	13.7
79	32.1	13.7
80	32.1	13.7
81	32.1	13.9
82	32.1	14
83	32.1	14
84	32.1	14
85	32.1	14
86	32.1	14
87	32.1	14
88	32.1	14
89	32.1	14
90	32.5	14
91	32.6	14
92	32.8	14
93	32.9	14.2
94	32.9	14.4
95	32.9	14.4
96	32.9	14.4
97	32.9	14.4
98	32.9	14.4
99	32.9	14.4
100	32.9	14.4
101	32.9	14.4
102	32.9	14.5
103	32.9	14.6
104	33.2	14.7
105	33.6	14.7
106	33.6	14.7
107	33.6	14.7
108	33.6	14.8
109	33.6	14.9
110	33.6	15.1
111	33.6	15.1
112	33.6	15.1
113	33.6	15.1
114	33.6	15.1
115	33.6	15.1
116	33.6	15.1

Continuación Tena (9090-9189) ft		
MINUTOS	H. AGUA	H. LODO
117	33.6	15.1
118	33.6	15.1
119	33.6	15.1
120	34.1	15.1
130	35	15.5
140	35.2	15.8
150	35.7	15.8
160	37.1	16.2
170	37.1	16.5
180	37.1	16.5
190	37.4	16.5
200	37.9	16.9
210	37.9	16.9
220	37.9	16.9
230	37.9	16.9
240	38.2	17.2
250	38.4	17.3
260	38.6	17.3
270	38.6	17.6
280	38.6	17.6
290	38.6	17.6
300	39.3	17.6
310	39.3	17.6
320	39.3	17.6
330	39.3	17.6
340	39.3	17.7
350	39.3	17.7
360	39.4	17.9
370	40	18
380	40	18
390	40	18
400	40	18
410	40	18
420	40	18
430	40	18.1
440	40	18.1
450	40	18.2
460	40	18.3
470	40	18.3
480	40	18.3

Continuación Tena (9090-9189) ft		
MINUTOS	H. AGUA	H. LODO
490	40.1	18.3
500	40.1	18.3
510	40.2	18.3
520	40.3	18.3
530	40.3	18.3
540	40.3	18.3
550	40.4	18.3
560	40.4	18.3
570	40.5	18.3
580	40.5	18.3
590	40.5	18.3
600	40.5	18.3
610	40.6	18.3
620	40.6	18.3
630	40.6	18.3
640	40.6	18.3
650	40.6	18.5
660	40.6	18.7
670	40.6	18.7
680	40.7	18.7
690	40.6	18.7
700	40.6	18.7
710	40.6	18.7
720	40.6	18.7
730	40.6	18.7
740	40.6	18.7
750	40.6	18.7
760	40.7	18.7
770	40.6	18.7
780	40.7	18.7
790	40.6	18.7
800	40.7	18.7
810	40.7	18.7
820	40.7	18.7
830	40.7	18.7
840	40.7	18.7
850	40.7	18.7
860	40.7	18.7
870	40.7	18.8
880	40.7	18.9

Continuación Tena (9090-9189) ft		
MINUTOS	H. AGUA	H. LODO
890	40.7	19
900	40.7	19.1
910	40.7	19.1
920	40.7	19.1
930	40.7	19.1
940	40.7	19.1
950	40.7	19.1
960	40.7	19.1
970	40.7	19.1
980	40.7	19.1
990	40.7	19.1
1000	40.7	19.1
1010	40.7	19.1
1020	40.7	19.1
1030	40.7	19.1
1040	40.7	19.1
1050	40.7	19.1
1060	40.7	19.1
1070	40.7	19.1
1080	40.7	19.1
1090	40.7	19.1
1100	40.7	19.1
1110	40.7	19.1
1120	40.6	19.1
1130	40.7	19.1
1140	40.5	19.2
1150	40.5	19.3
1160	40.5	19.3
1170	40.5	19.3
1180	40.5	19.4
1190	40.5	19.4
1200	40.4	19.4

Tabla de datos de la prueba de Hinchamiento Lineal Tena (9270 – 9360) ft

Minutos	H. Agua	H. Lodo	Continuación Tena (9270-9360) ft		
0	0	0	Minutos	H. Agua	H. Lodo
1	3.2	0.8	39	24.3	7.6
2	4.3	1.4	40	25.2	7.6
3	5	1.8	41	25.7	7.6
4	5.7	2.2	42	25.7	7.6
5	5.9	2.5	43	26.4	7.6
6	7.1	2.8	44	26.4	7.6
7	8.6	2.9	45	26.4	7.9
8	9.3	3.2	46	26.6	7.9
9	10	3.6	47	27.1	8.3
10	10.7	4	48	27.1	8.3
11	11.4	4.3	49	27.1	8.3
12	12.1	4.3	50	27.2	8.3
13	12.9	4.3	51	27.6	8.3
14	13.6	4.7	52	27.9	8.3
15	14.3	4.7	53	27.9	8.3
16	15	5.1	54	27.9	8.5
17	15	5.1	55	27.9	8.6
18	15.7	5.1	56	28.6	8.7
19	16.4	5.4	57	28.6	8.7
20	17.1	5.4	58	28.6	8.7
21	17.9	5.6	59	28.6	8.7
22	18.6	5.8	60	28.6	8.7
23	18.6	5.8	61	28.6	8.7
24	19.3	6.1	62	28.6	8.7
25	20	6.1	63	29.3	8.7
26	20	6.1	64	29.3	8.7
27	20.7	6.4	65	29.9	8.7
28	20.7	6.5	66	30	9
29	20.7	6.5	67	30	9
30	21.4	6.5	68	30	9
31	21.4	6.8	69	30	9
32	22.1	6.9	70	30	9
33	22.1	6.9	71	30	9
34	22.9	6.9	72	30.7	9
35	22.9	6.9	73	30.7	9
36	23.1	7.2	74	30.7	9
37	23.6	7.2	75	31.4	9
38	24.2	7.2	76	31.4	9

Continuación Tena (9270-9360) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
77	31.4	9
78	31.4	9
79	32.1	9.2
80	32.1	9.4
81	32.1	9.4
82	32.1	9.4
83	32.1	9.4
84	32.1	9.4
85	32.1	9.4
86	32.1	9.4
87	32.1	9.4
88	32.1	9.4
89	32.1	9.4
90	32.5	9.4
91	32.6	9.6
92	32.8	9.7
93	32.9	9.7
94	32.9	9.7
95	32.9	9.7
96	32.9	9.7
97	32.9	9.7
98	32.9	9.7
99	32.9	9.7
100	32.9	9.7
101	32.9	9.7
102	32.9	9.7
103	32.9	9.8
104	33.2	10
105	33.6	10.1
106	33.6	10.1
107	33.6	10.1
108	33.6	10.1
109	33.6	10.1
110	33.6	10.1
111	33.6	10.1
112	33.6	10.1
113	33.6	10.1
114	33.6	10.1
115	33.6	10.1
116	33.6	10.1

Continuación Tena (9270-9360) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
117	33.6	10.4
118	33.6	10.5
119	33.6	10.5
120	34.1	10.5
130	35	10.5
140	35.2	10.8
150	35.7	10.8
160	37.1	10.8
170	37.1	10.8
180	37.1	11.1
190	37.4	11.2
200	37.9	11.2
210	37.9	11.6
220	37.9	11.6
230	37.9	11.9
240	38.2	11.9
250	38.4	11.9
260	38.6	11.9
270	38.6	11.9
280	38.6	11.9
290	38.6	11.9
300	39.3	12
310	39.3	12.2
320	39.3	12.3
330	39.3	12.3
340	39.3	12.3
350	39.3	12.3
360	39.4	12.3
370	40	12.3
380	40	12.4
390	40	12.6
400	40	12.6
410	40	12.6
420	40	12.6
430	40	12.6
440	40	12.6
450	40	12.9
460	40	13
470	40	13
480	40	13

Continuación Tena (9270-9360) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
490	40.1	13
500	40.1	13
510	40.2	13
520	40.3	13
530	40.3	13
540	40.3	13
550	40.4	13
560	40.4	13
570	40.5	13
580	40.5	13.3
590	40.5	13.4
600	40.5	13.4
610	40.6	13.4
620	40.6	13.4
630	40.6	13.4
640	40.6	13.4
650	40.6	13.4
660	40.6	13.4
670	40.6	13.4
680	40.7	13.4
690	40.6	13.4
700	40.6	13.4
710	40.6	13.5
720	40.6	13.5
730	40.6	13.5
740	40.6	13.6
750	40.6	13.7
760	40.7	13.7
770	40.6	13.7
780	40.7	13.7
790	40.6	13.7
800	40.7	13.7
810	40.7	13.7
820	40.7	13.7
830	40.7	13.7
840	40.7	13.7
850	40.7	13.7
860	40.7	13.7
870	40.7	13.7
880	40.7	13.7

Continuación Tena (9270-9360) ft		
Minutos	H. Agua	H. Lodo
890	40.7	13.7
900	40.7	13.7
910	40.7	13.7
920	40.7	13.7
930	40.7	13.7
940	40.7	13.7
950	40.7	13.7
960	40.7	13.7
970	40.7	13.7
980	40.7	13.7
990	40.7	13.7
1000	40.7	13.7
1010	40.7	13.7
1020	40.7	13.7
1030	40.7	13.7
1040	40.7	13.7
1050	40.7	13.7
1060	40.7	13.7
1070	40.7	13.7
1080	40.7	13.7
1090	40.7	13.7
1100	40.7	13.7
1110	40.7	13.7
1120	40.6	13.7
1130	40.7	13.7
1140	40.5	13.9
1150	40.5	14.1
1160	40.5	14.1
1170	40.5	14.1
1180	40.5	14.1
1190	40.5	14.1
1200	40.4	14.1

