

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA MULTIMEDIA COMO ALTERNATIVA APRENDIZAJE-  
ENSEÑANZA DE LODOS DE PERFORACION**

**KAROLL WAITILA CARO ORJUELA  
DALGY LORENA ZAPATA SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA MULTIMEDIA COMO ALTERNATIVA APRENDIZAJE-  
ENSEÑANZA DE LODOS DE PERFORACION**

**KAROLL WAITILA CARO ORJUELA  
DALGY LORENA ZAPATA SÁNCHEZ**

**Trabajo presentado como requisito para optar el título de:  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**DIRECTOR  
M. Sc. JOHN ALEXANDER LEÓN PABÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

“Hubiera yo desmayado si no creyese que veré la bondad de Jehová.”  
Primero dedico a **DIOS**, autor y creador de mi vida.

A mi motor de mi vida, mi persona, a Tí padre mío **Jesús Zapata**  
Por su ayuda, su esfuerzo, su paciencia, su tranquilidad y su bondad.  
El fruto de amor de su juventud está alcanzando uno de sus sueños... Gracias por sus enseñanzas,  
sus regaños, sus lágrimas... Infinitas Gracias

A mi madre mía **Faride**, mujer esforzada, valiente y virtuosa...  
Porque nadie más que tu ha trabajado, luchado y anhelado este logro para mí.  
Tu autoridad, firmeza y oraciones me hicieron ser quien soy. Disfruta este logro.

A mi hermanita Lesly Lilianna por su apoyo incondicional... “Que nada te detenga”.

A mi eterno Amor, compañero, amigo **Oliver A. Ruíz** porque con su gran amor, su ayuda  
desinteresada, su inocencia disfrazada de picardía hizo que esta etapa se pintara de Rosa.

A mis tíos: Wilson, Arelis, Alexander, Maribel, Evelio, Pablito, Ines, Dennis, Mery, Dilverto (Por su  
regalo de grado) y especialmente a mi **Tía Hilda**, mi segunda mamá... Siempre está ahí cuando he  
necesitado, su preocupación, su apoyo, su buena energía, su sonrisa y su chiste aún en los momento  
más difíciles.

A mi Abuelita **Elvira**, mujer cálida y amorosa, responsable de una descendencia ideal.

A todos mis primos, mayormente a esas primas que son como hermanas **Farley** y **Betica**.

A mi compadre **Didier**, por esas niñas que me trajo tan bellas.

A mi otra Familia **Dayaríth, Alex** y **Ezequiel**, los conocí y pasó el tiempo para quererlos más.

A mis amigos y compañeros de la carrera, que de una u otra manera aportaron en este proceso:  
**Mike, Karen, Yenis, Jesus**, La chiquis, Fer, Andrés, La costeña, Liza, Rodolfín y a **Tiven** por sus  
explicaciones de Álgebra.

A las Malukis **Yerle, Heilyn Tatiana** y especialmente a **Mayeli Matiz** por sus oraciones, por ser una  
gran amiga e incondicional.

A mi compañerísimo de Tesis **Karoll** por su esfuerzo y ayuda.

A todos los que están en mi corazón... **Dedico Este Pequeño Logro!**  
**Dalgys Lorena Zapata Sánchez**

## DEDICATORIA

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar donde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

**Papá y mamá** gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí, por darme fuerza cuando más lo necesité, por los momentos agradables y las escapadas para salir de la rutina, por innumerables cosas que día a día colocaron de su parte y otras que quisieron compartir conmigo, por eso y mucho más estoy infinitamente agradecido.

Hermanos **Cristo y Mari**, gracias por todos los aporte que no solo colocaron en mi vida académica sino en todos los campos en general gracias por las salvaditas en momentos difíciles gracias por ser hermanos y amigos.

Amigotes de la universidad, **Alejo, Lucho, J.L, Yilmer**, gracias por de una u otra forma contribuir a mi formación en la universidad, por sus concejos, regaños, montadera, por las pláticas para arreglar el mundo o arreglarnos nosotros, por los momentos que hicieron muchísimo más agradable este paso por la universidad. Gracias por aparecer en este proceso de mi vida.

**Heidy y su familia**, gracias por el apoyo que me dieron y por el buen recibimiento que siempre tuve en su casa de parte de cada uno de ustedes, gracias por los regaños y por el querer estar al tanto de mis cosas y la finalización casi infinita de este proyecto.

Amigos de infancia, **Jose, Jhon, Karito, Luisa**, gracias

**Anje**, gracias porque con tu personalidad y carisma siempre alegraste mi vida, por la comprensión y la paciencia que siempre tuviste conmigo, gracias.

**Samu**, tu eres el motor más grande en mi vida, gracias por llegar casi inesperadamente y por ganarte mi amor con tan solo verte. Los hijos siempre son la alegría del hogar y para tí lo que más deseo es felicidad y abundancia para toda tu vida, gracias por existir.

Compañera de tesis **Lore**, gracias por tu comprensión, paciencia y dedicación en la elaboración de nuestro proyecto.

Gracias a todas esas personas especiales en mi vida que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, mil y mil gracias por dar su granito o bloque de arena para que una meta más se cumpliera.

Karoll Waitila Caro Orjuela

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos agradecimientos:

Al M. S.c John Alexander León Pabón, Director de este proyecto, por su ayuda y orientación.

Al Ing. Jorge Iván Torres Camacho, por su ayuda desinteresada en nuestro proyecto.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería de Petróleos.

A la Universidad Industrial de Santander.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
1	TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN (TIC)..... 20
1.1	CONTRIBUCIÓN DE LAS TIC EN LA EDUCACIÓN ..... 21
1.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS TIC ..... 22
1.3	LAS TIC EN EL FUTURO DE LA EDUCACIÓN ..... 23
1.4	MOODLE COMO PLATAFORMA DE APRENDIZAJE ..... 25
1.4.1	Ventajas de Moodle..... 26
1.5	LAS TIC COMO HERRAMIENTA PARA DESARROLLAR COMPETENCIAS TRANSVERSALES EN EL AULA..... 27
1.6	NOCIONES SOBRE COMPETENCIAS EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR..... 27
1.6.1	El concepto de competencia..... 29
1.6.2	La evaluación a través de tareas complejas o situaciones problema . ..... 32
1.6.3	Competencias genéricas y específicas para un ingeniero de petróleos. .... 33
2	LODOS Y CEMENTOS ..... 36
2.1	FLUIDOS DE PERFORACION..... 41
2.1.1	Funciones principales de los lodos de perforación..... 42
2.1.2	Composición, Fases Y Tipos De Lodos..... 60
2.1.3	Descripción Del Equipo. .... 68
2.1.4	Análisis Químico De Fluidos De Perforación. .... 72
2.1.5	Laboratorio 1..... 83
2.2	REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN..... 86
2.2.1	Tipos de Fluidos. .... 87
2.2.2	Regímenes de flujo..... 89
2.2.3	Estabilidad de pozo. .... 92
2.2.4	Influencia de la temperatura. .... 94
2.2.5	Ecuaciones de flujo. .... 95
2.2.6	Propiedades Físicas del Lodo - Reológicas ..... 97
2.2.7	Eficiencia de la Limpieza del Pozo..... 121
2.2.8	LABORATORIO 2 ..... 127
2.3	QUÍMICA DE LAS ARCILLAS ..... 129
2.3.1	Características Básicas de las Arcillas..... 129

2.3.2	Características de los Sistemas Coloidales.....	132
2.3.3	Cargas sobre la superficie de las Arcillas. ....	134
2.3.4	Clases de Arcillas. ....	135
2.3.5	Arcillas en los Fluidos de Perforación. ....	140
2.3.6	Capacidad De Intercambio Catiónico (CEC). ....	146
2.3.7	Laboratorio 3.....	153
2.3.8	Laboratorio 11.....	155
2.4	PROPIEDADES DE FLUJO Y DENSIDAD DE LOS LODOS .....	157
2.4.1	Modelos Reológicos. ....	157
2.4.2	Densidad de los Lodos.....	162
2.4.3	Control de sólidos. ....	163
2.4.4	Laboratorio 4.....	170
2.4.5	Laboratorio 5.....	173
2.5	CONTAMINANTES Y TRATAMIENTO .....	176
2.5.1	Contaminación por Cemento.....	176
2.5.2	Contaminación por Anhidrita-Yeso.....	179
2.5.3	Contaminación con Cloruro de Sodio (Sal). ....	183
2.5.4	Contaminación con Carbonatos/Bicarbonatos. ....	187
2.5.5	Contaminación con Gases.....	189
2.5.6	Laboratorio 6.....	192
2.6	LODOS DE AGUA SALADA.....	195
2.6.1	Usos de los lodos de agua salada.....	195
2.6.2	Características de los lodos de agua salada.....	195
2.6.3	Lodos de agua salada saturada.....	197
2.6.4	Lodos salados.....	198
2.6.5	Lodos de agua salobre y lodos de agua de mar.....	199
2.7	LODOS DISPERSOS.....	201
2.7.1	Lodos de Lignosulfonato.....	202
2.7.2	Lodos dispersos con fosfatos.....	203
2.8	LODOS NO DISPERSOS .....	205
2.8.1	Lodos no dispersos con Acuagel.....	206
2.8.2	Lodos no dispersos con polímeros.....	206
2.8.3	Lodos no dispersos con almidón.....	207
2.9	LODOS CON CALCIO .....	208

2.9.1 Factores que pueden afectar la conversión de los lodos.....	210
2.9.2 Ventajas y desventajas de los lodos con calcio.....	210
2.9.3 Lodos calados.....	210
2.9.4 Lodos de cloruro de calcio. ....	212
2.9.5 Lodos con yeso.....	213
2.9.6 Comparación de las propiedades de los lodos base calcio.....	214
2.10 LODOS EMULSIONADOS .....	215
2.10.1 Teoría de las emulsiones inversas.....	215
2.10.2 Aplicación de los lodos base aceite.....	216
2.10.3 Preparar lodos de los sistemas de lodo base.....	217
2.11 CEMENTOS .....	219
2.11.1 Cementación primaria. ....	220
2.11.2 Objetivos de la cementación.....	221
2.11.3 Generalidades del cemento.....	222
2.11.4 Condiciones en el diseño de una lechada.....	230
3 IMPLEMENTACIÓN DEL AULA VIRTUAL .....	244
3.1 Etapa De Inicio. ....	244
3.2 Etapa De Diseño.....	253
3.3 Etapa De Implementación.....	259
4 CONCLUSIONES.....	264
5 RECOMENDACIONES.....	266
BIBLIOGRAFÍA.....	267

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>FIGURA 1</b> DIMENSIONES DE UNA COMPETENCIA. ....	30
<b>FIGURA 2</b> COMPETENCIA COMO INTEGRADOR DE PROBLEMAS EN LA PROFESIÓN. ....	30
<b>FIGURA 3</b> . ETAPAS BÁSICAS DE LA EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS. ....	36
<b>FIGURA 4</b> . PROCESO DE EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS. ....	37
<b>FIGURA 5</b> . PROCESO DE EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS. ....	38
<b>FIGURA 6</b> . RECORRIDO DEL LODO. ....	39
<b>FIGURA 7</b> . OTROS FACTORES A CONSIDERAR EN LAS ESTRATEGIAS DE EXPLOTACIÓN. ....	40
<b>FIGURA 8</b> . PROCESO DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS. ....	41
<b>FIGURA 9</b> . FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN. ....	42
<b>FIGURA 10</b> . PRESIÓN Y GRADIENTE DE PRESIÓN NORMAL. ....	44
<b>FIGURA 11</b> . PRESIÓN DE LAS PAREDES DEL HUECO. ....	45
<b>FIGURA 12</b> . PERDIDA DE FILTRADO DE LODO. ....	47
<b>FIGURA 13</b> . DAÑO A LA FORMACIÓN. ....	49
<b>FIGURA 14</b> . LODO BASE ACEITE, EN PREPARACIÓN. ....	51
<b>FIGURA 15</b> . PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE POZOS. ....	52
<b>FIGURA 16</b> . MUD LOGGERS. ....	53
<b>FIGURA 17</b> . REGISTRO DE POZOS. ....	54
<b>FIGURA 18</b> . FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN DE LOS POZOS. ....	55
<b>FIGURA 19</b> . BONDADDES DEL FLUIDO EN LA CEMENTACIÓN Y COMPLETAMIENTO. ....	56
<b>FIGURA 20</b> . TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN. ....	60
<b>FIGURA 21</b> . LODOS INHIBIDOS. ....	61
<b>FIGURA 22</b> . LODOS NO INHIBIDOS. ....	62
<b>FIGURA 23</b> . CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS SEGÚN SU CARGA ELÉCTRICA. ....	63
<b>FIGURA 24</b> . DISPERSIÓN DE UNA EMULSIÓN. ....	64
<b>FIGURA 25</b> . CIRCUITO DE LODO. ....	68
<b>FIGURA 26</b> . TANQUES DE ASENTAMIENTO. ....	70
<b>FIGURA 27</b> . ALCALINIDAD. ....	74
<b>FIGURA 28</b> . PROCESO PARA HALLAR LA ALCALINIDAD MF DE UN FLUIDO. ....	75
<b>FIGURA 29</b> . PROCESO PARA HALLAR EL CONTENIDO DE CLORUROS. ....	78

<b>FIGURA 30.</b> PROCESO PARA EL CÁLCULO DE DUREZA.....	79
<b>FIGURA 31.</b> TIPOS DE FLUIDOS. ....	88
<b>FIGURA 32.</b> PATRONES DE FLUJO EN TUBOS HORIZONTALES .....	89
<b>FIGURA 33.</b> PERFIL DE VELOCIDAD EN CADA PATRÓN DE FLUJO.....	90
<b>FIGURA 34</b> CLASIFICACIÓN DE REGÍMENES DE FLUJO.....	90
<b>FIGURA 35</b> CAUSAS DE INESTABILIDAD DEL HUECO EN LAS LUTITAS .....	92
<b>FIGURA 36</b> INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA REOLOGÍA.....	94
<b>FIGURA 37</b> BALANZA DE LODO .....	99
<b>FIGURA 38</b> PROCEDIMIENTO PARA HALLAR LA DENSIDAD .....	100
<b>FIGURA 39</b> COMPARACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS Y NEWTONIANOS RESPECTO A LA VISCOSIDAD EFFECTIVA.....	101
<b>FIGURA 40</b> COMPONENTES Y CLASIFICACIÓN DE LA VISCOSIDAD.....	101
<b>FIGURA 41</b> VISCOSIDAD DE EMBUDO MARSH .....	103
<b>FIGURA 42</b> EMBUDO MARSH .....	104
<b>FIGURA 43</b> VISCOSIDAD APARENTE: AUMENTO Y DISMINUCIÓN .....	105
<b>FIGURA 44</b> VISCOSIDAD PLÁSTICA: INCREMENTOS Y REDUCCIÓN.....	106
<b>FIGURA 45</b> VISCOSÍMETRO DE FANN.....	107
<b>FIGURA 46</b> TIPOS DE GELES EN LODOS.....	110
<b>FIGURA 47</b> TIPOS DE TIXOTROPÍA EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN .....	111
<b>FIGURA 48</b> CONTROL DE FILTRADO “FORMACIÓN DE REVOQUE” .....	112
<b>FIGURA 49</b> FILTRACIÓN DINÁMICA.....	116
<b>FIGURA 50</b> INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TORTA SOBRE LA FILTRACIÓN .....	117
<b>FIGURA 51</b> FILTRO PRENSA API ESTÁNDAR .....	120
<b>FIGURA 52</b> CLASIFICACIÓN DE LOS SÓLIDOS SEGÚN LA PROCEDENCIA.....	122
<b>FIGURA 53</b> KIT DE CAMPO “CONTENIDO DE ARENA” .....	123
<b>FIGURA 54</b> PROCEDIMIENTO PARA HALLAR EL CONTENIDO DE ARENA .....	124
<b>FIGURA 55</b> KIT RETORTA .....	125
<b>FIGURA 56</b> ESTRUCTURAS BÁSICAS DE LAS ARCILLAS .....	130
<b>FIGURA 57</b> RENDIMIENTO DE LAS ARCILLAS .....	132
<b>FIGURA 58</b> CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS COLOIDALES .....	133
<b>FIGURA 59</b> CARGAS EN LOS BORDES DE LA PLACA DE ACUERDO AL PH.....	135
<b>FIGURA 60</b> ESTRUCTURA DE LA CAOLINITA .....	136
<b>FIGURA 61</b> ESTRUCTURA DE LA MICA .....	137

<b>FIGURA 62</b> MONTMORILLONITA .....	139
<b>FIGURA 63</b> ESTRUCTURA DE LA CLORITA .....	140
<b>FIGURA 64</b> MODELOS DE ASOCIACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE ARCILLA .....	141
<b>FIGURA 65</b> CAPA GOUY.....	142
<b>FIGURA 66</b> MECANISMOS DESFLOCULANTES.....	143
<b>FIGURA 67</b> MECANISMOS DE FLOCULACIÓN .....	144
<b>FIGURA 68</b> FACTORES QUE AFECTAN LA VISCOSIDAD .....	144
<b>FIGURA 69</b> CONTROL DE VISCOSIDAD .....	145
<b>FIGURA 70</b> CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (MEQ/100G) DE MINERALES ARCILLOS COMUNES ....	146
<b>FIGURA 71</b> PROCESO PRUEBA AZUL DE METILENO.....	151
<b>FIGURA 72</b> PRUEBAS DE GOTAS PARA EL PUNTO FINAL DE LA TITULACIÓN CON AZUL DE METILENO.....	152
<b>FIGURA 73</b> ESFUERZO DE CORTE VS TASA DE CORTE PARA UN FLUIDO REAL Y UNO MODELADO POR LA ECUACIÓN DE FLUJO DE NEWTON. ....	158
<b>FIGURA 74</b> ESFUERZO DE CORTE VS TASA DE CORTE PARA UN FLUIDO REAL Y UNO MODELADO POR LA ECUACIÓN DE BINGHAM. ....	159
<b>FIGURA 75</b> COMPORTAMIENTO DE UN FLUIDO REAL Y UNO MODELADO POR LA LEY DE POTENCIA.....	161
<b>FIGURA 76</b> COMPORTAMIENTO DEL MODELO DE LEY DE POTENCIA EN ESCALA LOGARÍTMICA .....	162
<b>FIGURA 77</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE CENTRÍFUGA DECANTADORA .....	167
<b>FIGURA 78</b> PROCESO DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS POR HIDROCICLÓN .....	168
<b>FIGURA 79</b> PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LOS LODOS.....	176
<b>FIGURA 80</b> TRATAMIENTO AL LODO CONTAMINADO CON CEMENTO.....	179
<b>FIGURA 81</b> FUENTES DE CARBONATOS Y BICARBONATOS .....	187
<b>FIGURA 82</b> EQUILIBRIO CARBONATO-BICARBONATO .....	187
<b>FIGURA 83</b> EFECTO DE LA SAL EN LA VISCOSIDAD Y EL FILTRADO .....	196
<b>FIGURA 84</b> EFECTO DEL IÓN CALCIO SOBRE LA VISCOSIDAD .....	209
<b>FIGURA 85</b> VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LODOS CON CALCIO .....	210
<b>FIGURA 86</b> ESQUEMA DEL REGISTRO DE ADHERENCIA .....	237
<b>FIGURA 87</b> INTRODUCCIÓN A LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN .....	258
<b>FIGURA 88</b> EQUIPOS UTILIZADOS EN UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA.....	259
<b>FIGURA 89</b> IMAGEN DE LA PANTALLA DE INICIO DEL CURSO.....	260
<b>FIGURA 90</b> DISTRIBUCIÓN DE TEMAS EN EL CURSO. REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN .....	261
<b>FIGURA 91</b> CONFIRMACIÓN DE ACCESO AL QUIZ .....	262
<b>FIGURA 92</b> MODELO DE QUIZ TEÓRICO EN LA SECCIÓN: REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN .....	262

<b>FIGURA 93</b> CONFIRMACIÓN DEL ENVÍO DE ACTIVIDAD.....	263
<b>FIGURA 94</b> VISUALIZACIÓN DEL ESTADO DE LA ACTIVIDAD.....	263

## LISTA DE TABLAS

	Página
<b>TABLA 1.</b> COMPETENCIAS GENÉRICAS .....	34
<b>TABLA 2</b> COMPETENCIAS ESPECÍFICAS .....	35
<b>TABLA 3</b> FUNCIONES DEL LODO Y SUS PROPIEDADES .....	57
<b>TABLA 4</b> SISTEMAS DE FLUIDO BASE ACEITE .....	66
<b>TABLA 5</b> FASES DE LOS LODOS Y SUS PROPIEDADES .....	67
<b>TABLA 6</b> FUENTE DE ALCALINIDAD.....	76
<b>TABLA 7</b> PPM DE CADA ION, SEGÚN SU ALCALINIDAD .....	76
<b>TABLA 8</b> CLASIFICACIÓN DE LODOS SALADOS .....	79
<b>TABLA 9</b> CLASIFICACIÓN DE LODOS CON CALCIO .....	80
<b>TABLA 10</b> CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS RESPECTO AL PH.....	82
<b>TABLA 11</b> LABORATORIO 1: ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA.....	84
<b>TABLA 12</b> EFECTO DE LA REOLOGÍA SOBRE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN. ....	86
<b>TABLA 13</b> DENSIDADES DE LOS AGENTES DENSIFICANTES.....	98
<b>TABLA 14</b> PARÁMETROS QUE AFECTAN LA FILTRACIÓN ESTÁTICA: TIEMPO, PRESIÓN Y TEMPERATURA .....	114
<b>TABLA 15</b> TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE PUENTEO .....	119
<b>TABLA 16</b> LABORATORIO 2: PROPIEDADES DEL LODO .....	128
<b>TABLA 17</b> LABORATORIO 2: REOLOGÍA .....	128
<b>TABLA 18</b> LABORATORIO 2: ANÁLISIS DE FILTRADO.....	128
<b>TABLA 19</b> RADIOS IÓNICOS ANTES Y DESPUÉS DE LA HIDRATACIÓN .....	138
<b>TABLA 20</b> ÁREAS SUPERFICIALES DE MUESTRAS DE ARCILLAS DETERMINADAS POR ADSORCIÓN DE NITRÓGENO Y VAPOR DE AGUA. ....	139
<b>TABLA 21</b> ARCILLAS ENCONTRADAS COMÚNMENTE .....	148
<b>TABLA 22</b> LABORATORIO 3: RENDIMIENTO DE LAS ARCILLAS.....	154
<b>TABLA 23</b> LABORATORIO 11: PRUEBA AZUL DE METILENO PARTE A.....	156
<b>TABLA 24</b> LABORATORIO 11: PRUEBA AZUL DE METILENO PARTE B .....	156
<b>TABLA 25</b> COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS REOLÓGICOS EN LOS DIFERENTES REGÍMENES DE FLUJO....	162
<b>TABLA 26</b> TAMAÑOS APROXIMADOS DE LOS SÓLIDOS CONTAMINANTES.....	164
<b>TABLA 27</b> EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS Y AMPLITUDES EFECTIVAS DE FUNCIONAMIENTO EN MICRONES	165

<b>TABLA 28</b> LABORATORIO 4: PROPIEDADES DE FLUJO Y DENSIDAD .....	172
<b>TABLA 29</b> LABORATORIO 5: ANÁLISIS DE FILTRADO Y TORTA B .....	174
<b>TABLA 30</b> LABORATORIO 5: ANÁLISIS DE FILTRADO Y TORTA A .....	175
<b>TABLA 31</b> AGENTES PARA DESCONTAMINAR EL FLUIDO DE ANHIDRITA-YESO .....	181
<b>TABLA 32</b> SAL CONTAMINANTE HALITA Y SU TRATAMIENTO .....	184
<b>TABLA 33</b> SAL CONTAMINANTE SILVITA Y SU TRATAMIENTO .....	185
<b>TABLA 34</b> SAL CONTAMINANTE CARNALITA Y SU TRATAMIENTO.....	185
<b>TABLA 35</b> FLUJOS DE AGUA SALADA Y SU TRATAMIENTO .....	186
<b>TABLA 36</b> RECONOCIMIENTO DE CONTAMINANTES Y TRATAMIENTO DEL LODO .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>TABLA 37</b> LABORATORIO 6: CONTAMINANTES Y TRATAMIENTO .....	194
<b>TABLA 38</b> COMPOSICIÓN TÍPICA DE UNA MUESTRA DE AGUA DE MAR.....	200
<b>TABLA 39</b> COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS LODOS BASE CALCIO .....	214
<b>TABLA 40</b> CONCENTRACIONES DE ADITIVOS DE LOS LODOS BASE CALCIO.....	215
<b>TABLA 41</b> <i>COMPUESTOS QUÍMICOS DE LOS CEMENTOS PORTLAND</i> .....	223
<b>TABLA 42</b> CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS.....	227

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA MULTIMEDIA COMO ALTERNATIVA APRENDIZAJE-ENSEÑANZA DE LODOS DE PERFORACION<sup>1</sup>.

**AUTORES:** DALGY LORENA ZAPATA SÁNCHEZ.  
KAROLL WAITILA CARO ORJUELA. <sup>\*\*2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Herramienta, multimedia, lodos de perforación, aula virtual.

### CONTENIDO:

El desarrollo de la herramienta multimedia “Lodos de perforación” como aula virtual en la plataforma Moodle, tiene como propósito ofrecer una alternativa de estudio de lodos de perforación para los alumnos y un soporte al proceso de enseñanza por parte de los profesores.

La herramienta es diseñada en una interfaz de fácil manejo para cualquier usuario, profesor o estudiante, donde se puede encontrar información de forma organizada correspondiente al plan de la asignatura en diferentes formatos; imagen, texto, video y animación.

En su estructura misma el aula virtual permite a los alumnos navegar fácilmente en los módulos y otorga a los profesores un espacio donde además de subir los contenidos de la asignatura y los complementarios que se crean convenientes, tienen en su poder herramientas propias de Moodle para la distribución de tareas, talleres, exámenes y también para la calificación de estos.

La facilidad de configuración de la herramienta proporcionará a los profesores de Lodos y Cementos versátil adaptación a la forma en la que se imparte la temática del curso, en pro de hacer el aprendizaje de los alumnos más autónomo y enfocado al desarrollo de competencias.

Su estructura proporciona un apoyo a la asignatura Lodos y Cementos y no debe tomarse como el único medio de consulta, distribución, encuentro y calificación para la materia.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

<sup>2\*\*</sup>Facultad de físico-químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director MSc. John Alexander León Pabón.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A MULTIMEDIA TOOL AS AN ALTERNATIVE LEARNING-TEACHING OF DRILLING MUD\*.

**AUTHORS:** ZAPATA DALGY LORENA SANCHEZ.  
KAROLL WAITILA ORJUELA CARO\*\*.

**KEYWORDS:** Tools, multimedia, drilling muds, virtual classroom.

### CONTENTS:

The development of the multimedia tool "drilling muds" as a virtual classroom tool in the platform Moodle, aims to offer an alternative drilling muds study for students and a support for the teaching by teachers.

The tool is designed in a user-friendly interface for any user, teacher or student; where you can find information in an organized way for the plan of the subject in different formats; image, text, video and animation.

In its structure the virtual classroom allows students to easily navigate the modules and gives teachers a place where in addition to upload the subject content and the supplementary information appropriate, are holding their own tools of Moodle for distribution of tasks, homeworks, exams and also for the classification of these.

Easy configuration of the tool will provide to mud and cement teachers a versatile adaptation to the shape in that the theme of the course is taught, towards making learning of the students more autonomous, and focused on the developing of competences of a mud Engineer.

---

\*Work Degree.

\*\* Faculty of Engineering Physical-Chemical. School of Petroleum Engineering. MSc Director. John Alexander León Pabón.

## 1 TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN (TIC)

De un par de décadas hacia acá los computadores, las redes de difusión, los televisores, los aparatos móviles de comunicación y una enorme variedad de objetos electrónicos han invadido el mundo, han dado lugar a una vertiginosa evolución de la tecnología aplicada a las tele comunicaciones logrando conectividad a nivel global que ha transformado la vida diaria y las relaciones sociales. La estrella de este nuevo escenario es sin duda la Internet.

Las TIC, están presentes en todos los aspectos de nuestra sociedad actual, desde las más grandes corporaciones multinacionales, gobiernos, universidades, centros educativos, organizaciones socioeconómicas privadas y personales hasta las más naturales tareas en el hogar de las personas comunes que buscan información y la forma de transformarla útilmente para su desarrollo y continuo crecimiento.

Los rápidos avances en las TIC han proporcionado una rica fuente de información además de cambios en la enseñanza y el aprendizaje para profesores y estudiantes en cualquier disciplina. Más recientemente, los entornos de aprendizaje en línea, tecnologías, y los medios de comunicación social ofrecen muchas nuevas formas de difusión que permiten a profesores y estudiantes intercambiar información e ideas a través del tiempo y el espacio en las aulas universitarias. Todos estos cambios pueden ofrecer desafíos adicionales para el proceso de enseñanza y aprendizaje<sup>3</sup>, no sólo a través de la disponibilidad de cursos en línea, sino también para apoyar y ayudar el aprendizaje del estudiante.<sup>4</sup>

La capacidad de aprender por si mismo se ha convertido en un requisito para vivir en el mundo actual, desarrollando autonomía en su propio proceso de aprendizaje de tal manera que esté

---

<sup>3</sup> TANG, T. & AUSTIN, M., Students' perceptions of teaching technologies, application of technologies, and academic performance, *Computers and Education*, [on line], vol. 53, (2009), [citado enero 2014] p. 1241–1255 disponible en internet:< <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1613565> >

<sup>4</sup> GUTIÉRREZ, E., et al., A new Moodle module supporting automatic verification of VHDL-based assignments, *Computers & Education*, [on line], vol. 54, (2010), [citado enero 2014] p. 562–577 disponible en internet:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131509002462> >

en capacidad de relacionar problemas por resolver y buscar sus propios propósitos de aprendizaje como un componente esencial de madurez.

### **1.1 CONTRIBUCIÓN DE LAS TIC EN LA EDUCACIÓN<sup>5</sup>**

La contribución de las TIC proviene principalmente de sus características tecnológicas, que permiten la gestión de un gran volumen de datos e información en un corto tiempo, la presentación de información a través de dinámicas interactivas, múltiples representaciones y la comunicación de datos e información. Sin embargo, la contribución esencial de las TIC al proceso de aprendizaje viene directamente a través de su desarrollo pedagógico y ciertas particularidades que se derivan de las características tecnológicas anteriores. Esta contribución se centra principalmente en las tareas para la participación activa en el proceso de aprendizaje para estudiantes y profesores, la acción y la retroalimentación a través de los escenarios educativos y actividades interactivas de aprendizaje significativo basado en un modelo teórico determinado, así como los procesos que apoyan la creación de los modelos mentales<sup>6</sup>.

La educación virtual es una oportunidad presente en la sociedad de hoy para facilitar el acceso a contenidos que se acoplan al tiempo, el espacio y la necesidad del estudiante. Además del hecho de que la Internet es una vasta fuente de información, hay algunas aplicaciones específicas basadas en web que se conciben para ser utilizado como un recurso didáctico. Estas aplicaciones a menudo llamadas plataforma *e-learning* o entorno de aprendizaje virtual (EVA) son especialmente útiles en la enseñanza de la ciencia en general porque permiten a los docentes proporcionar a los estudiantes materiales de diferentes tipos, así como interactuar con ellos en tiempo real. Los entornos virtuales de aprendizaje suelen proporcionar herramientas para apoyar las actividades en línea, incluyendo carga de contenido, regreso de trabajo de los estudiantes, administración de grupos de estudiantes, cuestionarios, evaluaciones, la comunicación entre estudiantes, estudiantes y profesores (blogs, chats, foros) y algunas herramientas de apoyo a trabajo en grupo (por ejemplo, espacios de presentación

---

<sup>5</sup> INZUNSA C, et al. Asignatura Virtual como Herramienta de Apoyo en la Enseñanza Universitaria de Ciencias Básicas: Implementación y Satisfacción de los Estudiantes. En: Formación universitaria. Marzo, 2012. Vol. 5, p. 2-3.

<sup>6</sup> MIKROPOULOS, T. A. y Natsis. A., Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research, *Computers and Education*[on line], vol. 56, (2011), [citado 10 enero 2014] p. 769–780 disponible en internet:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131510003052> >

virtuales, espacios de escritura en colaboración, wikis y blogs). También permiten a los docentes seguir la evolución del proceso de aprendizaje y de conocer el rendimiento de cada estudiante en tareas específicas

Un EVA puede ser empleado como soporte para la docencia a distancia y también, como un entorno virtual complementario que permite enriquecer la docencia presencial. El propósito de un EVA es facilitar el *e-learning* o aprendizaje electrónico, definido por la ASTD *Learning Circuits* (<http://www.astd.org/LC/glossary>) como un amplio conjunto de aplicaciones y procesos, tales como aprendizaje basado en Web, aprendizaje basado en computadoras, aulas virtuales y colaboración digital. Incluye la entrega de contenido a través de Internet, intranet / extranet (LAN / WAN), audio y video, transmisión vía satélite, TV interactiva, CD-ROM, y mucho más.

## 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS TIC

Las tecnologías de la información y la comunicación se destacan por tener las siguientes características:

- **Inmaterialidad** (Posibilidad de digitalización). Con las TIC mediante la digitalización de información es posible almacenar grandes cantidades de información que tradicionalmente estaban sujetas a almacenamiento en medios físicos. De esta manera los usuarios pueden acceder a información lejana en un tiempo muy corto, mediante la utilización de las redes de información y comunicación. Esta característica ha permitido que las comunidades se generalicen, creando un mundo virtual donde las computadoras y el internet eliminan las distancias, dejando el conocimiento al alcance de todos.
- **Instantaneidad**. Se puede transmitir la información instantáneamente a lugares muy alejados físicamente. Se han acuñado términos como ciberespacio, para definir el espacio virtual, en el que se sitúa la información, al no asumir las características físicas del objeto utilizado para su almacenamiento, adquiriendo ese grado de inmediatez e inmaterialidad.
- **Aplicaciones Multimedia**: Las aplicaciones o programas multimedia han sido desarrollados como una interfaz amigable y sencilla de comunicación, para facilitar el acceso a las TIC de todos los usuarios. Una de las características más importantes de

estos entornos es *La interactividad*, esta es posiblemente la característica más significativa a diferencia de las tecnologías más clásicas (TV, radio) que permiten una interacción unidireccional.

Otra de las características más relevantes de las aplicaciones multimedia, y que tiene mayor incidencia sobre el sistema educativo, es la posibilidad de *transmitir información a partir de diferentes medios* (texto, imagen, sonido, animaciones, etc.). Por primera vez, en un mismo documento se pueden transmitir informaciones multisensoriales, desde un modelo interactivo.

### **1.3 LAS TIC EN EL FUTURO DE LA EDUCACIÓN**

Aparecerán nuevos actores con nuevos roles en la medida en que las tecnologías de la información y comunicación penetren en la sociedad transformándola paulatinamente en la sociedad del conocimiento. Esto será dado para cada sector por separado dependiendo del grado de penetración, aceptación y la forma de aprovechar las ventajas que ofrece como medio trasmisor transformador de conocimiento sin dejar de lado la forma en que se altere el sentido social y lo que esto suscitará. Además los actores tradicionales que son el docente y el alumno tendrán un significativo cambio de roles. Los profesores abandonarán su papel de meros transmisores de conocimientos para convertirse en inductores, dinamizadores y supervisores del proceso de enseñanza y de lo que hacen los alumnos. Los alumnos serán entonces los participantes principales en el proceso del aprendizaje con un papel mucho más activo con unas necesidades mayores de capacidades de aprendizaje e investigación.

Las ventajas que indudablemente trae consigo este nuevo modelo de uso de Internet y las TIC en la educación son:

- Herramientas de apoyo y soporte para una mejor práctica docente.
- Mayor participación y motivación para los alumnos.
- Mejora en el seguimiento curricular.

Pero el nuevo modelo de uso de las TIC en la educación también presenta inconvenientes, muy parecidos a los experimentados en otros ámbitos cuando se ha utilizado la informática:

- Heterogeneidad de ordenadores, de sistemas operativos, de herramientas, de plataformas.
- Mayores costes para el desarrollo de cursos y para la integración de sistemas.
- Poca posibilidad de reutilización y adaptación de contenidos o aplicaciones ya existentes cuando cambia algún factor, como, por ejemplo, la plataforma o el contexto educativo o curricular. Un ejemplo puede ser la evolución desde el videodisco interactivo al CD-ROM y a Internet.

Esto es solucionable con la estandarización de los contenidos, así se obtendrían ventajas tales como:

- **Interoperabilidad:** Que se pueda intercambiar y mezclar contenido de múltiples fuentes, que se pueda usar en distintos sistemas, que sistemas distintos puedan comunicarse, intercambiar información e interactuar de forma transparente unos con otros.
- **Reusabilidad:** El contenido puede ser agrupado, desagrupado, reutilizado de forma rápida y sencilla. Los objetos de contenido pueden ensamblarse y utilizarse en un contexto distinto a aquel para el que fueron inicialmente diseñados. La gestión de los propios sistemas puede obtener y trazar la información adecuada sobre el usuario y el contenido que ha hecho sobre el sistema.
- **La accesibilidad:** un usuario puede acceder al contenido apropiado en el momento justo y con el dispositivo correcto.
- **La permanencia o durabilidad en el tiempo:** no quedar atrapados en una tecnología propietaria, que no haya que hacer una inversión significativa para lograr la reutilización o la interoperabilidad. Escalabilidad: que las tecnologías puedan configurarse para aumentar la funcionalidad, de modo que se pueda dar servicio a más usuarios respondiendo a las necesidades de la institución; y que esto no exija un esfuerzo económico desproporcionado.

Entre las tendencias de la industria de las TIC en la educación, cabe destacar la producción de contenidos cada vez más ricos, con técnicas de simulación de entornos reales e imágenes 3D; la incorporación de mundos virtuales al mundo de la educación; el uso de realidad aumentada.

#### 1.4 MOODLE COMO PLATAFORMA DE APRENDIZAJE

Existen diferentes plataformas *e-learning*, algunas de ellas son comerciales y otras de código abierto. En la primera categoría la más empleada en el ámbito universitario es *WebCt* fusionada el año 2005 con *blackboard* (<http://www.blackboard.com/>). En la categoría plataformas de código abierto la mayoría está disponible en LMS (Software que automatiza la administración de acciones de formación (<http://www.astd.org/LC/glossary>), y un ejemplo de ellas es Moodle (<http://moodle.org>) siendo este uno de los más empleados.

La palabra Moodle responde al acrónimo de *Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment* (Entorno Modular de Aprendizaje Dinámico Orientado a Objetos). Es un Sistema de Gestión de Cursos de Código Abierto (*Open Source Course Management System, CMS*), conocido también como Sistema de Gestión del Aprendizaje (*Learning Management System, LMS*) o como Entorno de Aprendizaje Virtual (*Virtual Learning Environment, VLE*). Es una aplicación web gratuita que los educadores pueden utilizar para crear sitios de aprendizaje efectivo en línea (Moodle.org).

Moodle se ha instalado en las universidades e instituciones en todo el mundo, en 2011 Moodle fue utilizado en 211 países, y está traducido a 78 idiomas, con 41,5 millones de usuarios, de los cuales 1,2 millones son profesores. Gracias a este tipo de plataforma profesores universitarios han pasado de la publicación convencional de documentos en formato HTML o PDF en su página web personal a diseñar y desarrollar cursos de formación o programas que combinan la oferta de un tutorial en línea con sesiones en el aula entre los estudiantes y el personal docente.<sup>7</sup> Su diseño modular hace que sea fácil para crear nuevos cursos, la adición de contenido que va a involucrar a los estudiantes y está diseñado para apoyar un estilo de aprendizaje llamado pedagogía constructivista social.<sup>8</sup> La pedagogía constructivista social plantea que los estudiantes aprenden mejor cuando interactúan con el material de

---

<sup>7</sup> ESCOBAR-RODRIGUEZ, T. y MONGE-LOZANO, P., The acceptance of Moodle technology by business administration students, *Computers and Education* [en línea] vol. 58 (2012) [citado 05 enero 2014], p. 1085–1093 (2012). Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131511002934>>

<sup>8</sup> RICE, W. H., Moodle e-learning course development. A complete guide to successful learning using Moodle. [en línea]. Packt Publishing (2006). [citado 15 enero 2014] Disponible en internet: <[http://moodle.bgu.ac.il/moodle/file.php/1/Packt\\_Moodle.pdf](http://moodle.bgu.ac.il/moodle/file.php/1/Packt_Moodle.pdf)>.

aprendizaje, al construir nuevo material para otros, e interactuar con otros estudiantes sobre el material.<sup>9</sup> Moodle es compatible con esta pedagogía constructivista al contar una gran variedad de servicios interactivos de material (tareas, diario, lección, cuestionarios y encuestas) y, actividades donde los estudiantes interactúan entre sí como chat, foro, glosario, wiki y taller.<sup>10</sup> Entre las características más importantes y bien conocidas de Moodle se encuentran que es gratuita, fácil de usar y muy flexible, que permite personalizar completamente el diseño y la navegación, permite una gestión directa de los estudiantes, grupos, equipos y departamentos, hay una comunidad de código abierto muy fuerte con una gran cantidad de usuarios activos y útiles. Además, el software sigue mejorando y permite cargar una variedad de diferentes contenidos, tales como: paquetes *elearning*, documentos de Word, documentos PDF, audio y video, *podcasts* enlaces web, *screencasts*, diagramas, presentaciones, etc.<sup>11</sup>

**1.4.1 Ventajas de Moodle.** A continuación, se enumeran las principales ventajas de Moodle, como la plataforma para gestión de cursos para educadores y capacitadores:

- Sistema escalable en cuanto a la cantidad de alumnos
- Creación de cursos virtuales y entornos de aprendizaje virtuales
- Complemento digital para cursos presenciales.
- Posibilidad de diversos métodos de evaluación y calificación.
- Accesibilidad y compatibilidad desde cualquier navegador web, independiente del sistema operativo utilizado.

---

<sup>9</sup> ROMERO, C., Ventura, S y GARCÍA, E., Data mining in course management systems: Moodle case study and tutorial, *Computers and Education*, [en línea] vol. 51 (2008), [citado 20 Diciembre 2013] p. 368–384 disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131507000590/pdf?md5=3402aea8c535109b8cc94dbe3a4d2c47&pid=1-s2.0-S0360131507000590-main.pdf>>.

<sup>10</sup> KAMINSKI, J., Moodle – a User-Friendly, Open Source Course Management System, *Online Journal of Nursing Informatics (OJNI)*, [en línea] vol. 9 (2005) [citado 20 febrero 2013] disponible en internet: <[http://eaaknowledge.com/ojni/ni/9\\_1/talktech.htm](http://eaaknowledge.com/ojni/ni/9_1/talktech.htm)>.

<sup>11</sup> SAVA, S., MALITA, L. y NUISSI, E., Quality of the online delivery in the European Master in Adult Education, *En: Social and Behavioral Sciences*, [en línea] vol. 9 (2010), [citado 15 febrero 2014] p.1687–1691. Disponible en internet: <[http://www.academia.edu/2097274/Quality\\_of\\_the\\_online\\_delivery\\_in\\_the\\_European\\_Master\\_in\\_Adult\\_Education](http://www.academia.edu/2097274/Quality_of_the_online_delivery_in_the_European_Master_in_Adult_Education)>

## **1.5 LAS TIC COMO HERRAMIENTA PARA DESARROLLAR COMPETENCIAS TRANSVERSALES EN EL AULA<sup>12</sup>**

La premisa a seguir en el diseño de actividades que utilicen servicios TIC como herramientas, debe ser: se aprende haciendo. Los estudiantes necesitan alcanzar metas de desarrollo de competencias concretas, enunciadas por sus profesores y sus planes de estudio y, más adelante, por sus carreras profesionales. No necesitan desarrollar herramientas TIC (salvo los estudiantes de informática), sino que necesitan mejorar sus habilidades comunicativas mediante presentaciones, y sus habilidades escritas para poder redactar informes, correos electrónicos o entradas en un blog profesional. Es decir necesitan adquirir competencias vinculadas a un objeto formativo concreto relacionado con futuro.

Los docentes deben crear entornos de aprendizaje, donde sea posible que el alumno experimente un aprendizaje profundo, duradero, para que pueda enfrentarse a los cambios futuros. Para crear estos entornos de aprendizaje, los servicios de las TIC son una herramienta potente al poner al servicio del alumno una multitud de recursos fuera del aula de clase, facilitando así que él mismo sea el escultor de su aprendizaje y el que maneja donde y cuando aprende. Al mismo tiempo ese aumento de autocontrol dota al alumno del contexto necesario para aumentar su responsabilidad, madurez; donde siente la necesidad de planificar su tiempo de forma más eficaz.

## **1.6 NOCIONES SOBRE COMPETENCIAS EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR**

La formación por competencias se basa en el reencuentro de dos teóricas de las ciencias de la educación: el cognitivismo y el constructivismo. El cognitivismo se ocupa de la manera en que el aprendiz adquiere y aplica los conocimientos y las habilidades<sup>13</sup>. Por lo tanto propone estrategias de formación susceptibles de favorecer la construcción gradual de conocimiento en

---

<sup>12</sup> RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, Rosa. Las TIC como herramienta para desarrollar competencias trasversales en el aula. En: BLANCO FERNÁNDEZ, Ascensión. Desarrollo y evaluación de competencias en la educación superior. Madrid, España. Narcea, S.A. de ediciones, 2009. P. 159-164.

<sup>13</sup> LASNIER, François. (2000). Réussir la formation par compétences. Montréal: Guérin. Pédagogie collégiale [en línea] Vol. 15 no 1, Octobre 2001 [citado 25 febrero 2014] p. 28-33. Disponible en: <[http://www.cvm.qc.ca/aqpc/Auteurs/Lasnier,%20Fran%C3%A7ois/Lasnier,%20Fran%C3%A7ois%20\(15,1\).pdf](http://www.cvm.qc.ca/aqpc/Auteurs/Lasnier,%20Fran%C3%A7ois/Lasnier,%20Fran%C3%A7ois%20(15,1).pdf)>

el estudiante tomando en cuenta los elementos afectivos, cognitivos y metacognitivo de los mismos. Además según Tardif (2002)<sup>14</sup>, la psicología cognitiva reconoce que los tres niveles de tratamiento de la información (afectivo, cognitivo y metacognitivo) son extremadamente importantes en la comprensión del aprendizaje. La formación por competencias se basa de igual forma en el constructivismo ya que hace hincapié en el papel activo del aprendiz como primer artesano de su aprendizaje. Bajo esta perspectiva el constructivismo sostiene que los nuevos conocimientos se adquieren progresivamente relacionándolos con los conocimientos anteriores. Así mismo el constructivismo propone aumentar la autonomía y la iniciativa del aprendiz, de presentarle tareas que le signifiquen algo, de favorecer el aprendizaje por medio de la manipulación del material y la interacción con los demás, de apoyar al aprendiz y de guiarlo por su aprendizaje y, finalmente, de poner al aprendiz en acción para llevarlo a construir sus conocimientos su saber y su saber hacer<sup>15</sup>.

Evidentemente, la decisión de tomar el rumbo de la formación por competencias en una facultad o centro universitario, nada ajeno a la escuela de ingeniería de petróleos UIS, debe reposar en una larga discusión entre los miembros del equipo docente. Este cambio tanto paradigmático como pedagógico, provoca ajustes en la organización de las actividades de enseñanza y aprendizaje siendo este trabajo un ejemplo de la voluntad cambio hacia este nuevo nivel, en los papeles respectivos de los profesores y los estudiantes y en la evaluación de los aprendizajes. Por lo tanto, conviene contar con un núcleo sólido de personas firmemente convencidas de lo bien fundada de esta nueva orientación, así con el apoyo de la dirección (proceso que se está llevando a cabo en la escuela de ingeniería de petróleos UIS). Desde la perspectiva más paradigmática la pregunta clave para poder alinear la evaluación en el marco del currículo es: ¿cómo se puede desarrollar una formación por competencias en el contexto universitario? Diversos autores han desarrollado propuestas, entre ellos, es de destacar la realizada por Tardif (2003)<sup>16</sup>. Este autor presenta un modelo de desarrollo de formación por competencias integrado por las siguientes fases:

---

<sup>14</sup>TARDIF, Jacques. Intégrer les nouvelles technologies de l'information quel cadre pédagogique? La revue. Apprentissage des langues et systèmes d'information et de communication [en línea] Paris: ESF, (2002) [citado 03 febrero 2014] p. 126. Disponible en < <http://alsic.revues.org/1903?file=1>>.

<sup>15</sup>LASNIER, Op.cit., p.28

<sup>16</sup> TARDIF, Jacques. Développer un programme par compétences : de l'intention à la mise en œuvre. Pédagogie collégiale,[en línea]. vol.16(3), [citado febreo 2014] p.36-44. Disponible en < <http://www.aqpc.qc.ca/developper-un-programme-par-competences-de-lintention-la-mise-en-oeuvre>>.

- Determinar las competencias que serán contempladas por el programa.
- Determinar el grado de desarrollo de las competencias al final del programa.
- Determinar los recursos internos que los estudiantes deberán adquirir y movilizar para desarrollar las competencias desarrolladas en el programa.
- Determinar las modalidades de evaluación de las competencias.
- Planificar el escalonamiento de las competencias sobre el conjunto de la formación.
- Determinar los métodos de enseñanza aprendizaje.
- Determinar la organización del trabajo de los profesores y de los estudiantes durante las actividades de aprendizaje.
- Establecer las modalidades de seguimiento de los aprendizajes.

Aunque estas ocho operaciones se presentan en un orden que parece secuencialmente lógico y lineal se debe entender como algo mucho más iterativo, de hecho es un constante ir y venir de una operación a otra y para algunas de ellas no es sino hasta después de la puesta en práctica del programa cuando es verdaderamente posible dar el toque final a las tareas necesarias para su realización.

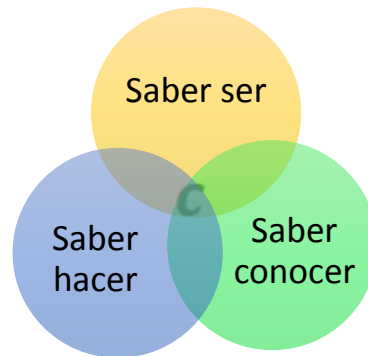
**1.6.1 El concepto de competencia.** Siguiendo el trabajo de diferentes autores, competencia se define como: “un saber actuar complejo que se apoya en la movilización y la combinación eficaz de una variedad de recursos internos y externos en una familia de situaciones”<sup>17</sup>.

Una competencia tiene como característica ser integradora, combinatoria, en desarrollo, contextual y evolutiva, además emerge de la intersección entre los conocimientos factuales y declarativos (saber conocer), habilidades y destrezas (saber hacer), y actitudes y valores (saber ser). Pero es inadecuado afirmar que solamente es conjunto intersección de estas, puesto que, durante el desempeño precisamente todo esto es lo que activa una competencia en el sujeto.

---

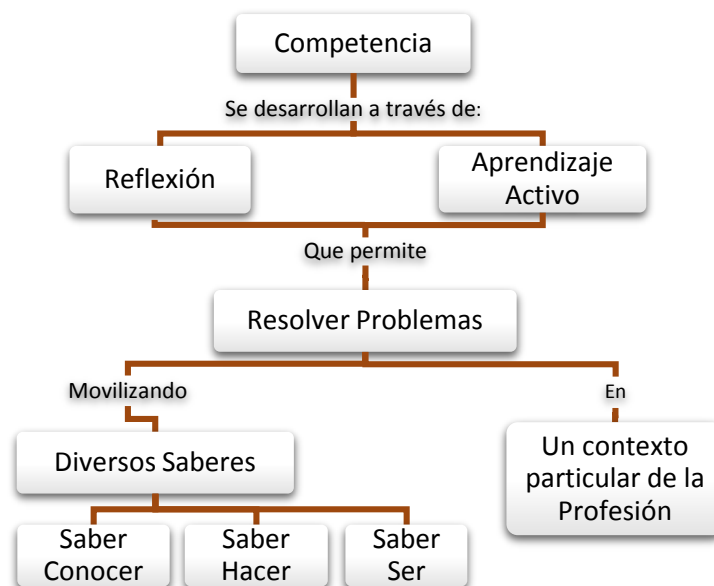
<sup>17</sup> TARDIF, J. (2006). L'évaluation des compétences. Documenter le parcours de développement [La evaluación de las competencias. Documentar el trayecto de desarrollo]. Montréal : Chenelière Éducation [en línea] [citado febrero 2014] p. 22. Disponible en < <http://www.cheneliere.ca/918-livre-l-evaluation-des-competences.html>>.

**Figura. 1** Dimensiones de una competencia.



Es importante plantear que las competencias existen por la necesidad de resolver problemas y situaciones. Cuando se realiza un diseño curricular basado en competencias, los problemas de la profesión son los que hacen precisamente necesarias las competencias.

**Figura. 2** Competencia como integrador de problemas en la profesión.



**Fuente:** Modificado de: PIMIENTO PRIETO, Julio. Las competencias en la docencia universitaria. Pearson educación de México. S.A. Primera edición 2012. P.5

La movilización y la combinación de recursos se encuentran en el núcleo de la competencia y varían según las situaciones. Además una competencia se desarrolla a lo largo de toda la vida. Se habla entonces de carácter “*desarrollacional*” de la competencia. Este desarrollo se lleva a

cabo de manera compleja y exige tiempo. En el marco de la formación, es muy importante, teniendo en cuenta esta característica, reflexionar sobre el nivel de desarrollo que debe alcanzarse para cada una de las competencias al finalizar la formación para que los futuros profesionales practiquen de manera autónoma, reflexiva y ética.

Las situaciones imponen una elección en la movilización y las combinaciones de los recursos para ser el detonador y el marco de acción, así que los docentes tienen entonces la responsabilidad de elegir muy juiciosamente las situaciones a las que quieren exponer a sus estudiantes. Los procesos evaluativos se deben cimentar en la explicación de los conceptos y deben estar orientados al aprendizaje a través de tareas auténticas con posibilidad de retroalimentación eficaz que suponga la posibilidad de cambio o mejora. Los *sets* evaluativos propuestos en el desarrollo de los subcapítulos de lodos y cementos a simple vista podrían parecer que se tratan de un simple cambio tecnológico, sin embargo esto no es así, ya que tienen componentes en su estructura encaminados a empezar un proceso evaluativo por competencias que esta de la mano con la labor de la escuela de petróleos de la Universidad Industrial de Santander en miras de asegurar a la excelencia y productividad de sus egresados. Aunque esta ardua labor no puede ser medible solamente en este curso ya que las competencias tienen componentes desarrollativas y evolutivas a través del tiempo, se deja este trabajo como base para futuros desarrollos en esta asignatura y en todas las demás que estén encaminados a medir de forma más acorde según los lineamientos que la escuela de petróleos disponga son necesarios e indispensables para medir las competencias y su grado de profundización de cada una de ellas en cada uno de los alumnos. El sistema evaluativo se sitúa en el centro del proceso educativo y su uso se justifica en cuanto regula la calidad de los aprendizajes y, por ende, la calidad de la docencia universitaria. En el ámbito de las definiciones se encuentran dos fuentes principales:

- *La competencia definida desde el mundo del trabajo.* Aquí se concibe como una capacidad que solo se puede desplegar en una situación de trabajo. Este despliegue tiene sus reglas, procedimientos e indicadores bien definidos y propiamente fundamentados e idealizados según cada tipo de trabajo y la filosofía particular de cada empresa.

- *La competencia definida desde el mundo de la educación.* En las escuelas y universidades el concepto parece responder a la misma idea básica pero se acepta que su demostración se lleve a cabo en situaciones de evaluación educativa.

**1.6.2 La evaluación a través de tareas complejas o situaciones problema<sup>18</sup>.** La complejidad se encuentra en el centro mismo de un modelo de formación por competencias. Ser competente significa saber gestionar lo complejo, porque la vida, los grupos de individuos o el entorno son en sí mismos complejos. Desde esta perspectiva evaluar competencias implica plantear estrategias evaluativas que se centren en la realización por parte de los estudiantes de actividades lo más auténticas posibles y con un nivel adecuado de complejidad según el momento formativo. El énfasis en la contextualización de la evaluación auténtica se debe basar en que:

- Las tareas de evaluación se asemejan a las que han de desarrollarse en el ejercicio de su profesión.
- Las condiciones de ejecución de las tareas de evaluación están cercanas a las condiciones del contexto de trabajo.
- El contexto social en que se desarrolla la evaluación se parece al contexto social del lugar de trabajo.
- Los criterios de evaluación de la actividad de evaluación son similares a los criterios que utilizan los expertos para valorar una tarea.

La complejidad de la evaluación por competencias hace necesario fundamentar la valoración o apreciación de los aprendizajes sobre la base de la utilización de criterios sobre la calidad de las tareas y sobre la capacidad de los estudiantes para movilizar sus recursos: saber, saber hacer, saber ser y combinarlos de manera que les permitan dar solución a las situaciones problema. La importancia del juicio en los primeros momentos en los que se realizan las actividades de aprendizaje. La movilización de diversos recursos para tratar situaciones problema o para responder a tareas complejas es el fruto de un largo aprendizaje que debe ser seguido de cerca y debe ser fruto de regulación. La elección de situaciones propicias para este

---

<sup>18</sup> VIDALES BUJAN Karmele, RODRÍGUEZ RECALDE Itziar, JÁUREGUI ARAMENDI Pello. La evaluación de competencias en la educación superior: La evaluación orientada al aprendizaje en un modelo de formación por competencias en la enseñanza universitaria. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P 47.

aprendizaje y las fuentes de información sobre el grado de desarrollo de una competencia es fundamentalmente una cuestión de juicio. Cada situación que se diseñe debe ser coherente con el proceso en desarrollo diseñado para el aprendizaje de la competencia, incluyendo también todos los recursos diferentes que han de movilizar.

**1.6.3 Competencias genéricas y específicas para un ingeniero de petróleo.** Estando las competencias fuertemente ligadas a la actividad laboral tiene bastante sentido que una unión entre la academia y la industria sea la que otorgue las pautas a seguir en medida de que competencias son las más valoradas para los ingenieros de petróleo y en qué grado de desarrollo son apetecibles para los recién graduados. En medida de esto valiéndose de un trabajo presentado por la SPE (*Society of Petroleum Engineers*) se dan a conocer los resultados de una encuesta presentada a la industria en Estados Unidos tanto nacional como internacional basada en los planes de estudio de las universidades más prestigiosas que ofrecen la carrera de ingeniería de petróleo y afines; sobre la necesidad de definir las habilidades específicas que deben tener los recién graduados en ingeniería de petróleo.

El nivel en el cual fueron medidas las competencias fueron:

- Indispensable
- Valioso, deseado pero no necesario
- No necesario o no aplicable (para recién graduados)

La matriz se construye a partir de una exhaustiva revisión de las fuentes industriales y académicas, así como mediante el aporte de colegas expertos en la industria. En particular, los planes de estudios universitarios y el aprendizaje fueron compilados por conjuntos de conocimiento en ingeniería general y los distintos aspectos técnicos de las disciplinas en ingeniería petrolera. Además, al personal en la industria se le pidió que proporcionará juegos de conocimientos técnicos específicos en su área de experiencia que creen que se debe exigir o no es necesario para los nuevos graduados de ingeniería de petróleo. Se utilizó personal y recursos SPE en la producción de la encuesta y la tabulación de los resultados.<sup>19</sup> La propuesta presentada por SPE no pretende ser un camino definitivo para la puesta en acreditación de las universidades, más bien es una referencia para los planes de estudio y en medida de esto se presentan las competencias genéricas y específicas de un ingeniero de petróleo enfocado

---

<sup>19</sup> Society of Petroleum Engineers. The SPE Technical Knowledge for Graduating Engineers Matrix [En línea]. [citado 31 de marzo 2014], Disponible en:  
< [http://www.spe.org/training/docs/graduating\\_matrix.pdf](http://www.spe.org/training/docs/graduating_matrix.pdf) >

como ingeniero de lodos de perforación. La encuesta fue creada y enviada a 109 empresas (incluidas las empresas nacionales e internacionales del petróleo, así como las empresas de tamaño medio y las empresas del sector de servicios). La tasa de participación fue aproximadamente el 51 por ciento, lo que es representativo para validar los resultados de la encuesta.

**Tabla 1.** Competencias genéricas

COMPETENCIA GENERAL	Indispensable	Valioso	No necesario
Capaz de aplicar conocimientos de matemáticas, ciencia e ingeniería	97.7%	2.3%	
Capaz de identificar, formular y resolver problemas de ingeniería	88.4%	11.6%	
Capaz de comunicarse de manera efectiva	76.7%	23.3%	
Comprende la responsabilidad y ética profesional	76.7%	23.3%	
Capaz de utilizar las técnicas, habilidades y herramientas modernas de ingeniería necesarias para la práctica de la ingeniería.	74.4%	18.6%	7%
Capaz de diseñar y realizar experimentos, así como analizar e interpretar los datos	72.1%	23.3%	4.7%
Capaz de funcionar en equipos multidisciplinarios	69.8%	30.2%	
Capaz de diseñar un sistema, componente o proceso para satisfacer las necesidades deseadas dentro de las limitaciones realistas como económica, ambiental, social, político, ético, de salud y seguridad.	62.8%	30.2%	7%
Capaz de hacer frente a un alto nivel de incertidumbre en la definición y solución de los problemas de yacimientos de petróleo.	60.5%	34.9%	4.7%
El reconocimiento de la necesidad de y la capacidad de participar en el aprendizaje de por vida	39.5%	58.1%	2.3%
El amplio estudio necesario para entender el impacto de las soluciones de ingeniería en un contexto global, económico, ambiental y social	37.2%	60.5%	2.3%
El conocimiento de los problemas contemporáneos	23.3%	62.8%	14%

**Fuente:** Modificado de: Society of Petroleum Engineers. The SPE Technical Knowledge for Graduating Engineers Matrix [En línea]. [Citado en 31 de marzo 2014]. Disponible en: < [http://www.spe.org/training/docs/graduating\\_matrix.pdf](http://www.spe.org/training/docs/graduating_matrix.pdf) >

**Tabla 2** Competencias específicas

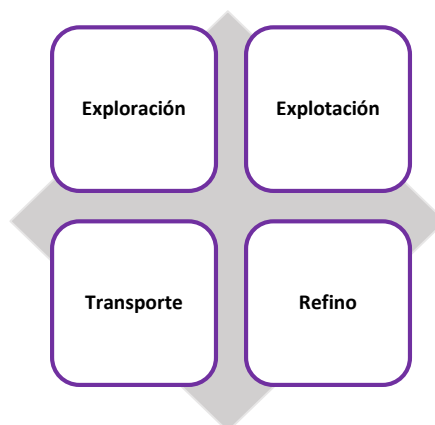
Competencias Específicas	Indispensable	Valioso	No necesario
Conocer el propósito de bentonita, barita y aditivos de los lodos comunes	77.1%	20%	2.9%
Capaz de describir cómo el cambio de la temperatura afecta la densidad de la salmuera y la presión de fondo de pozo.	65.7%	28.6%	5.7%
Evaluar y especificar sistemas de cemento y cuando se utilizan sistemas de peso ligero y de cemento de peso pesado	62.9%	28.6%	8.6%
Conocer las salmueras de terminación de uso común (composición química, peso y punto de cristalización)	54.3%	34.3%	11.4%
Capaz de aumentar o disminuir la densidad de un sistema de lodo existente	54.3%	34.3%	11.4%
Aplicar, seleccionar y utilizar el modelo de reología apropiado: newtoniano, ley de la potencia y plástico de Bingham	54.3%	40%	5.7%
Capaz de medir la densidad de líquidos utilizando una balanza de lodo y de saber cuándo hay que especificar una balanza de lodo a presión	51.4%	40%	8.6%
Capaz de realizar pruebas rutinarias de diagnóstico de contaminación de lodo	45.7%	45.7%	8.6%
Capaz de medir la viscosidad del fluido usando un viscosímetro rotatorio y embudo Marsh	45.7%	48.6%	5.7%
Capaz de utilizar un filtro prensa de baja presión para evaluar las propiedades de construcción de pared de un sistema de lodo	42.9%	51.4%	5.7%
Capaz de medir el contenido de sólidos utilizando réplica	37.1%	60%	2.9%

**Fuente:** Modificado de: Society of Petroleum Engineers. The SPE Technical Knowledge for Graduating Engineers Matrix [En línea]. [Citado en 31 de marzo 2014]. Disponible en: < [http://www.spe.org/training/docs/graduating\\_matrix.pdf](http://www.spe.org/training/docs/graduating_matrix.pdf) >

## 2 LODOS Y CEMENTOS

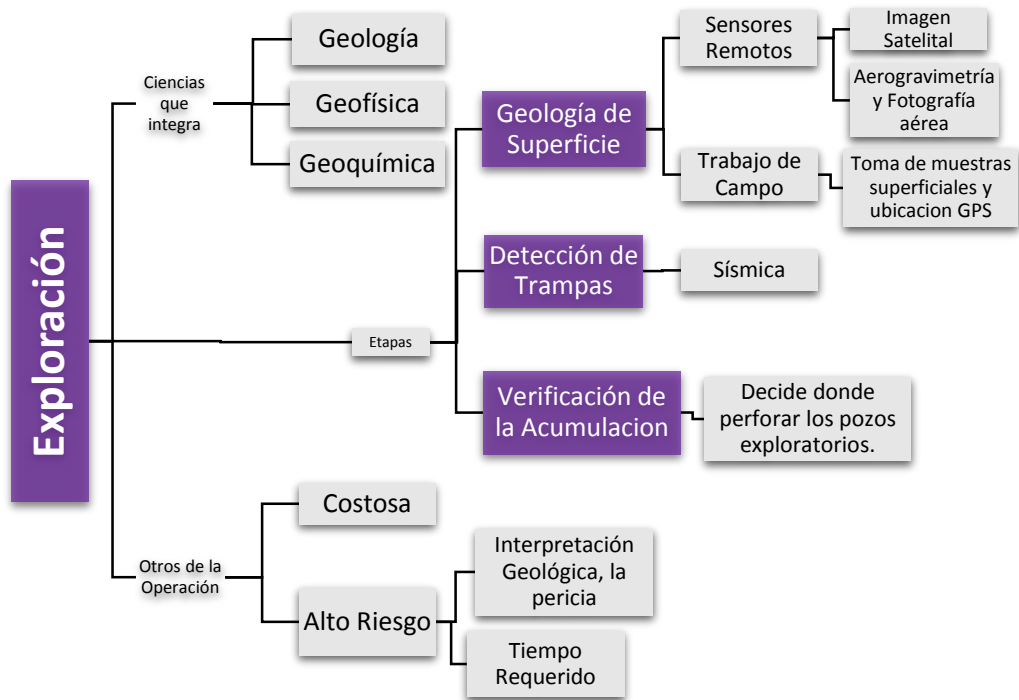
Las necesidades del mundo actual exigen alto nivel de conocimiento, con el fin de proveer nuevas tecnologías que aporten en la mejora de la calidad de vida. La industria del petróleo no está exenta de esta oleada, hace poco más de cien años atrás la explotación, explotación, transporte y refinación de crudos era muy rudimentaria, hoy se trata de técnicas sofisticadas, tecnología avanzada, frente a desafíos muy grandes por el declive de los yacimientos convencionales y el trámite de establecer una relación costo/beneficio favorable en la explotación de los yacimientos no convencionales que tienen las mismas etapas que los no convencionales, pero cada etapa difiere en las tecnologías usadas y en cómo se usan. A continuación se evoca cada etapa a grandes rasgos para finalmente adentrarnos en la parte esencial.

**Figura 3.** Etapas básicas de la explotación de hidrocarburos.



La exploración consiste básicamente en identificar y localizar acumulaciones de Hidrocarburo, desde sus inicios hasta hoy, se ha ido desarrollando nuevas y complejas tecnologías, y aun así no se ha logrado un método que de manera indirecta defina la presencia de Hidrocarburos, comprobar la existencia del mismo solo se logra solamente perforando pozos exploratorios con alto grado de incertidumbre. El proceso de explotación busca y reconoce estructuras geológicas (Trampas) en las cuales pudieran haberse acumulado, se apoya en métodos que aportan la geología, geofísica y geoquímica.

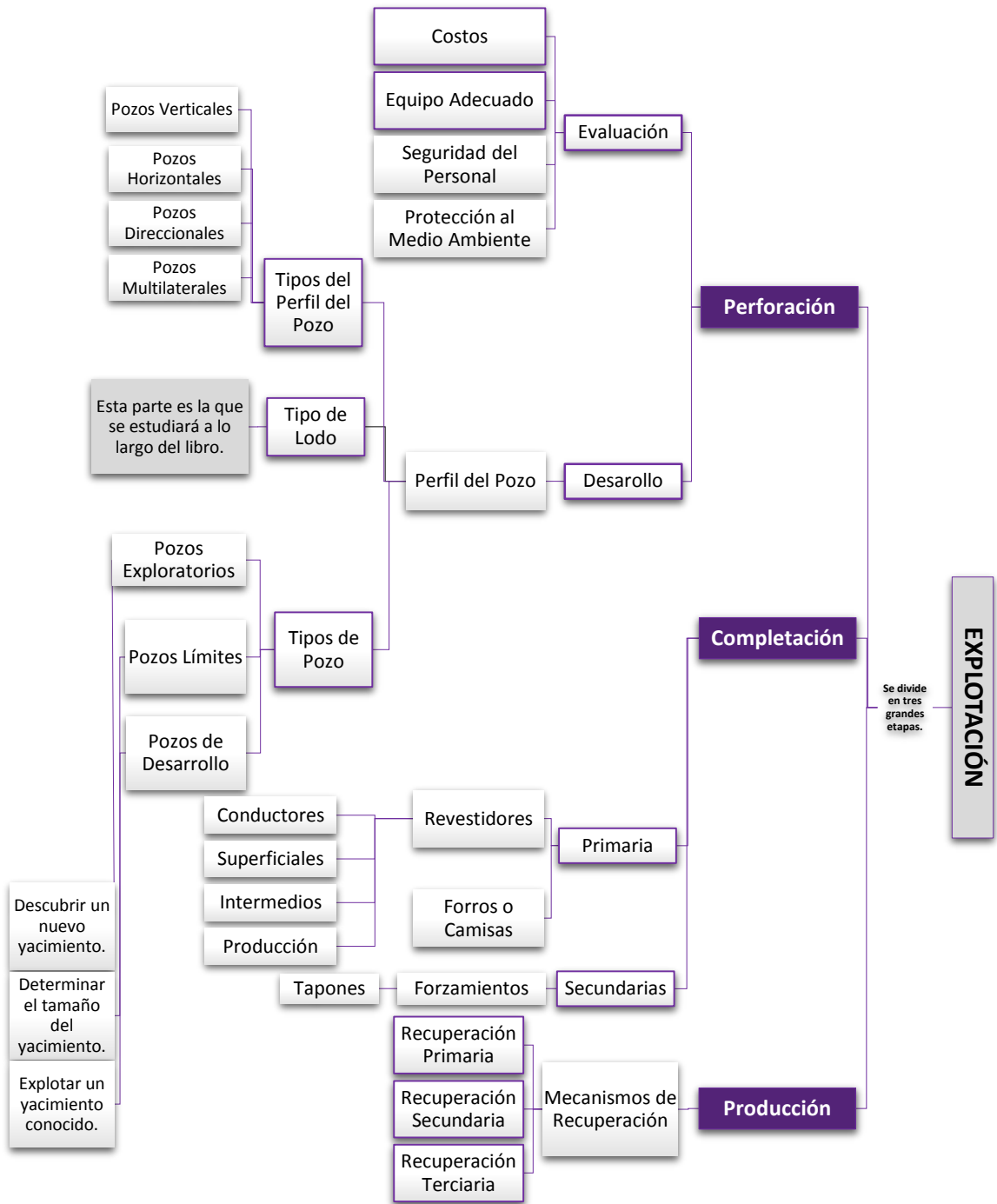
**Figura 4.** Poces de exploración de hidrocarburos



Con la información recolectada, los especialistas elaboran diferentes tipos de mapas de la zona examinada. Además de suministrar información acerca del espesor, inclinación, dirección y naturaleza de los estratos, sirven para decidir dónde conviene realizar la perforación de los pozos exploratorios, con los cuales se busca confirmar el modelo geológico y la existencia o no de hidrocarburos en dichas estructuras.

La explotación de pozos de petróleo es la operación que consiste en la extracción del Hidrocarburo, utilizando los métodos necesarios para que dicha extracción sea satisfactoria y se efectúe de manera adecuada aquí no existen procedimientos y normas específicas para elaborar un plan de explotación, se requiere, conocer el yacimiento y contar con las herramientas idóneas para elaborar una estrategia que explotación óptima

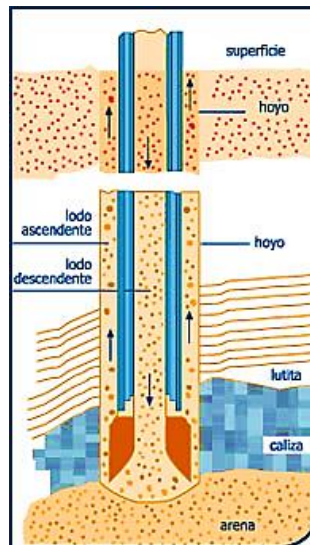
**Figura 5.** Proceso de explotación de hidrocarburos.



Los descubrimientos hechos durante la fase exploratoria se desarrollarán a través de la perforación y se determinará la magnitud del yacimiento para la etapa productiva. Las condiciones de las formaciones previstas a atravesar influyen potencialmente sobre el equipo usado y el lodo de perforación que se usará. La operación de un equipo de perforación implica la rotación de una barrena por medio de la sarta de perforación o tubo de perforación, en el

cual se hace necesario la utilización de un fluido que circule por su interior como se observa en la Figura 6<sup>20</sup>, y que pasa a través de la barrena para regresar a la superficie por el espacio anular (es decir, espacio entre el exterior de la tubería de perforación y el interior del agujero o la tubería de revestimiento), arrastrando con él los recortes de la operación.

**Figura 6.** Recorrido del lodo.



**Fuente:** PDVSA. Página oficial. Aspectos técnicos, producción. Enero 2014

Los lodos usados en la perforación son el tema principal de este proyecto. Se entra a detalle un propiedades, tipos, fases, selección, contaminantes, viscosificantes, densificantes, etc., todo lo que se refiere a lodos de perforación\*.

La otra etapa de la explotación es el completamiento del pozo, que prepara el agujero para la etapa productiva. Se desea que la efectividad de la comunicación entre yacimiento-superficie sea muy buena pues un factor relevante en la producción y en los costos. El completamiento debe ser diseñado para obtener la máxima rentabilidad del campo. Algunos factores necesarios en el logro de esta finalidad son:

---

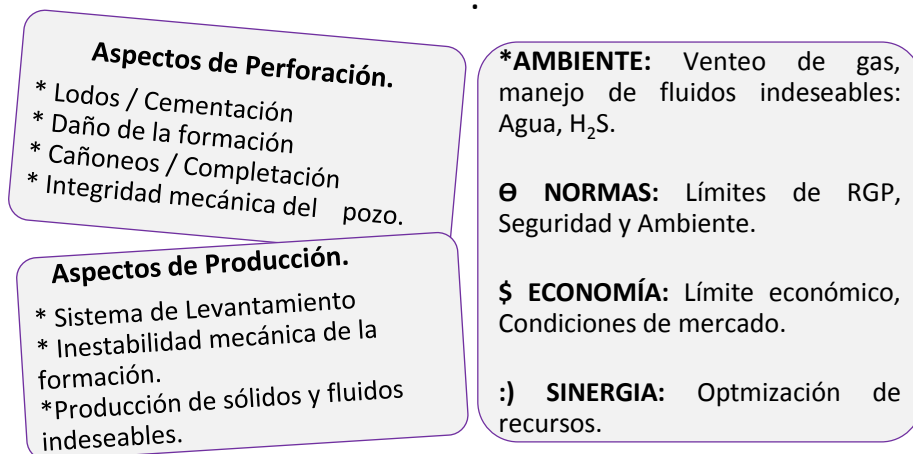
<sup>20</sup> PDVSA, Petróleos de Venezuela, S.A. Programa de Educación y Soberanía Petrolera. ¿Cómo se produce el petróleo? [en línea]. <[http://www.pdvs.com/PESP/Pages\\_pesp/aspectostecnicos/produccion/comoseprocesa.html](http://www.pdvs.com/PESP/Pages_pesp/aspectostecnicos/produccion/comoseprocesa.html)>

- A. El tipo de revestimiento: sea acorde a la profundidad y tipos de formaciones productoras.
- B. La disposición del equipo de producción: que consiste en el diseño de los equipos de tubería de producción, empaaduras, niples, etc., que conectados entre sí permiten la producción de zonas con hidrocarburos.
- C. Numero de zonas productoras: Se refiere a la cantidad de lentes productivos en posibilidad de ser abiertos a la producción lo cual depende de su potencial y profundidad.

Y finalmente la parte productiva del yacimiento. Para que un yacimiento produzca debe tener suficiente energía innata capaz de expulsar los hidrocarburos desde cada punto del yacimiento hasta el fondo de los pozos que lo penetran, y desde ahí hasta la superficie y las estaciones de recolección. A esta situación le llamamos flujo natural o etapa de producción primaria del yacimiento.

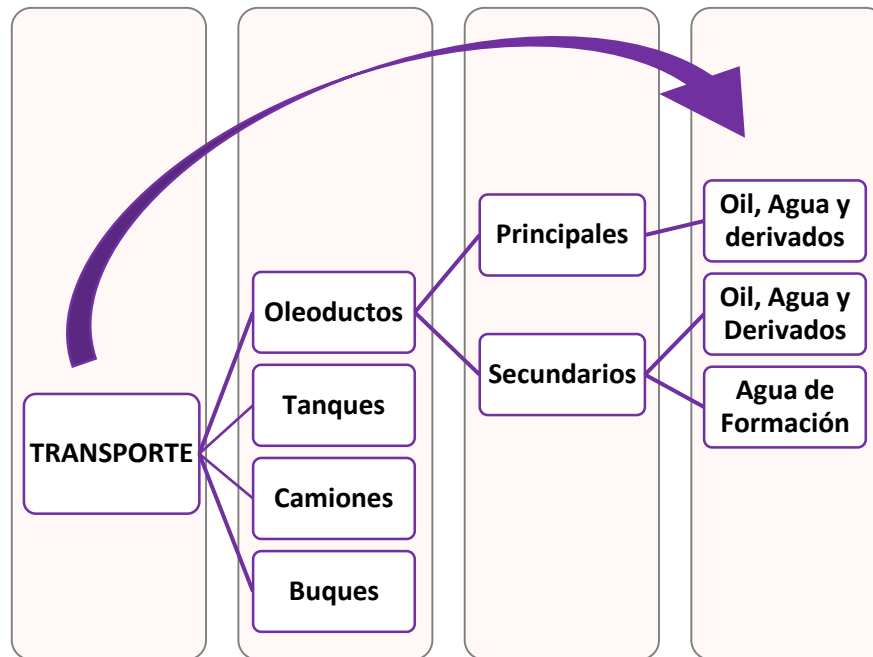
Las fuentes naturales de energía están representadas por la presión a la cual se encuentran confinados la roca y sus fluidos (Aceite, Gas y Agua) en el yacimiento. Estas energías y fuerzas disponibles se crearon durante el proceso de formación y acumulación del aceite, las cuales ayudan a desplazar el crudo a través de los poros; pero si la presión es no es suficiente para que los fluidos, especialmente el petróleo lleguen a la superficie el pozo deberá someterse a una ayuda adicional que le aporte energía a lo que llamamos Levantamiento Artificial. Esto se debe generalmente al incremento en el porcentaje de agua o a una declinación de presión del yacimiento. Los métodos de levantamiento artificial se clasifican en dos, los secundarios y los

**Figura 7.** Otros factores a considerar en las estrategias de explotación.



terciarios. Los secundarios no alteran las propiedades químicas del yacimiento mientras alteran sus propiedades físicas. Los terciarios alteran propiedades físicas y químicas.

**Figura 8.** Proceso de transporte de hidrocarburos.



## 2.1 FLUIDOS DE PERFORACION

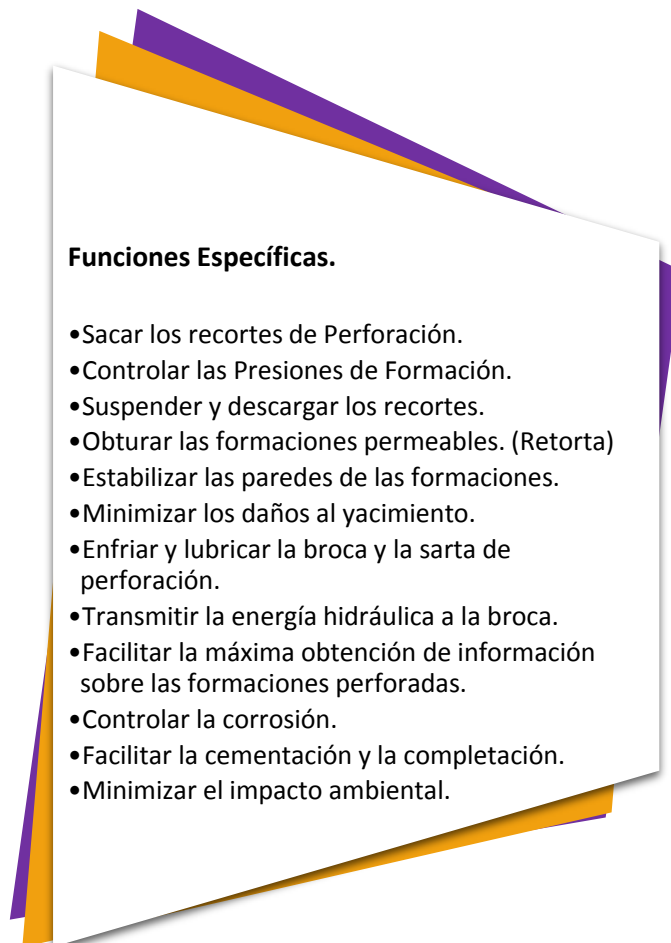
“El fluido de perforación es un líquido o gas que circula a través de la sarta de perforación hasta la barrena y regresa a la superficie por el espacio anular. Hasta la fecha un pozo de gas o aceite no se puede perforar sin este concepto básico de fluido circulante.”<sup>21</sup> Los fluidos más conocidos como Lodos, aportan la energía Hidráulica a la broca de perforación, no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable, pero sí inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales, estable a las altas temperaturas e inmune al desarrollo de bacterias. Además, debe mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones porque son varias las funciones, para saber si un lodo

<sup>21</sup> SCHLUMBERGER. Introducción a los Fluidos de Perforación: Programa de Entrenamiento Acelerado para Supervisores [en línea]. <[http://media.wix.com/ugd/de4c15\\_8c09ba7e47cc3319c961ff4c522be359.pdf](http://media.wix.com/ugd/de4c15_8c09ba7e47cc3319c961ff4c522be359.pdf)>. [Citado 7 de Febrero de 2014]

está cumpliendo sus funciones, que deben estar dentro de un rango de trabajo. Las propiedades fisicoquímicas que debe tener un lodo son medidas a través de una serie de instrumentos y métodos los cuales fueron diseñados paralelamente con el desarrollo de los fluidos y los problemas presentados en los mismos en la perforación de pozos.

**2.1.1 Funciones principales de los lodos de perforación.** Las funciones principales de un lodo de perforación en cualquiera de sus presentaciones (base agua, aceite, gas) según M-I SWACO<sup>22</sup> deben ser:

**Figura 9.** Funciones de los fluidos de perforación.



<sup>22</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001.

**2.1.1.1 Transportar los cortes de perforación.** La habilidad para sacar partículas de diversos tamaños fuera del pozo es una de las funciones más importante de un fluido de perforación. En la perforación los cortes hechos por la broca o en algunos casos, pedazos de la formación provenientes de las paredes del pozo al ocurrir algún derrumbe, deben ser continuamente evacuados desde el fondo hasta la superficie. La remoción de los cortes (limpieza del pozo) depende de:

- A. Tamaño, la forma y la densidad de los cortes.
- B. Velocidad de Penetración (ROP)
- C. Viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido.

En la mayoría de los casos, el mantener una velocidad anular suficiente da como resultado un movimiento neto hacia arriba de los cortes. Cuando la capacidad de la bomba es baja para proveer una velocidad anular suficiente para levantar los ripios, un incremento en la viscosidad del lodo particularmente por el incremento del punto cedente, debe resultar en una mejor limpieza del pozo. Cuando la velocidad de asentamiento de las partículas es mayor que la velocidad anular, los recortes tienden a asentarse en el pozo ocasionando múltiples problemas. Para disminuir la velocidad de asentamiento de las partículas es necesario aumentar la viscosidad del fluido de perforación, resultando en un aumento de la presión de funcionamiento de las bombas para mantener un caudal establecido. Otra forma de disminuir la velocidad de asentamiento de las partículas es mediante el incremento de la densidad del fluido, ya que trae como consecuencia un efecto de flotación mayor sobre las partículas.

En los pozos horizontales, los recortes se acumulan a lo largo de la parte inferior, formando camas de recortes. Estas camas restringen el flujo, aumentan el torque y son difíciles de eliminar; dos métodos usados para situaciones difíciles de limpieza sobre todo en pozo de alto ángulo y horizontales son:

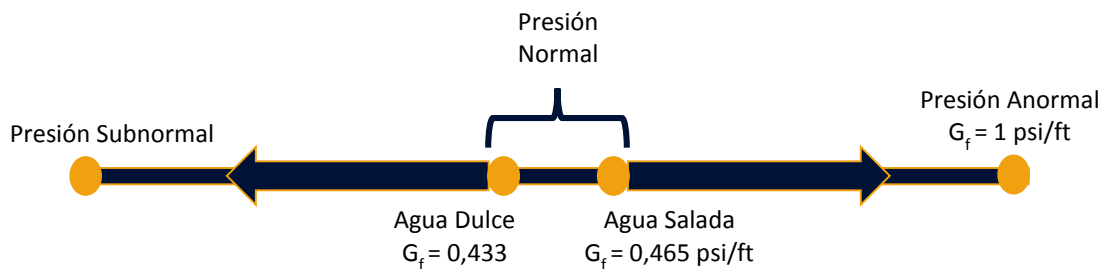
- A. El uso de fluidos tixotrópicos que disminuyan su viscosidad con el esfuerzo de corte y que tienen una alta viscosidad a muy baja velocidad de corte y condiciones de flujo laminar.
- B. El uso de un alto caudal y de un lodo fluido para obtener un flujo turbulento.

Los fluidos de alta densidad facilitan la limpieza del pozo aumentando las fuerzas de flotación que actúan sobre los recortes, lo que se traduce en limpieza de pozo. En comparación con los fluidos de menor densidad, los fluidos de alta densidad pueden limpiar el agujero de manera adecuada, aun con velocidades anulares más bajas y propiedades reológicas inferiores. Pero un peso del lodo al que se requiere para el equilibrio de las presiones de formación tiene un

impacto negativo sobre la perforación; por lo tanto, este peso no debe ser aumentado a efectos de limpieza del agujero.

**2.1.1.2 Controlar las Presiones de Formación.** Toda formación tiene una determinada presión en sus poros denominada presión de poro o presión de formación (Fig. 11<sup>23</sup>), esta presión puede ser normal si su gradiente es de 0.433 a 0.465 psi /ft (agua pura – agua salada de 1.07 g/cc); todo valor por encima se llama presión anormal y todo valor por debajo se llama presión sub-normal. Las formaciones con presiones por debajo de lo normal se perforan frecuentemente con aire, gas, niebla, espuma rígida, lodo aireado o fluidos especiales de densidad ultra-baja (generalmente a base de aceite). El control de las presiones anormales requiere que se agregue al fluido de perforación material de alta gravedad específica, como la barita, para aumentar la presión hidrostática; pues están producen un aumento en la densidad del fluido (peso del lodo) que es el factor de control F.

**Figura 10.** Presión y gradiente de presión normal.



Normalmente, la densidad del agua más la densidad de los sólidos obtenidos durante la perforación son suficientes para balancear la presión de la formación en las zonas superficiales.

Esta puede estimarse usando los gradientes de formación mediante la siguiente ecuación:

$$P_f = G_f * H \quad (1)$$

$P_f$  → Presión de formación [Psi]

<sup>23</sup> BARRIOL Yves y otros, Las Presiones de las operaciones de perforación y producción. En: OilField Review. Invierno de 2005/2006. p. 27.

$G_f \rightarrow$  Gradiente de Presión [Psi/ft]

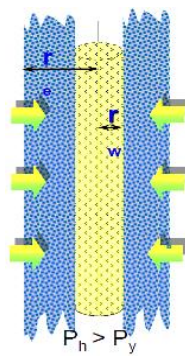
$H \rightarrow$  Profundidad del pozo [ft]

La presión hidrostática es la presión debida a la columna de fluido. La ecuación para el cálculo de presión hidrostática está definida por:

$$P_h = 0.0520 \text{ (psi/ pies * lpg) * Profundidad (pies) * Densidad (lpg)} \quad (2)$$

Si se conoce la presión y la profundidad de una formación se puede saber la densidad mínima que debe tener el lodo para controlar esa presión. Las flechas de la Figura 12 indican la presión que está ejerciendo la formación, el contraste lo ejerce el fluido que está representado por la parte amarilla punteada, la densidad mínima de trabajo debe estar por encima que la presión de formación, ( $P_h > P_y$ ) para prevenir un brote imprevisto del pozo o un amago de reventón.

**Figura 11.** Presión de las paredes del hueco.



Un factor de seguridad se debe incluir para cubrir la disminución de presión cuando se está sacando la herramienta del pozo; ya que casi siempre causa un efecto de pistón.

**2.1.1.3 Mantener en suspensión los ripios cuando se interrumpe la circulación.** El comportamiento del lodo como fluido NO-NEWTONIANO, tanto en estado dinámico como en estado de reposo es distinto al comportamiento de un fluido NEWTONIANO, el lodo tiene una propiedad muy importante que es la de mantener en suspensión a los sólidos que lo componen, con la finalidad de que los mismos no se depositen y obstruyan la perforación del pozo durante condiciones estáticas. Esta propiedad se llama Tixotropía, es decir, los lodos se gelifican bajo condiciones estáticas. Debe existir un equilibrio entre las propiedades del fluido de perforación que suspenden los recortes y las propiedades que facilitan la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos. La suspensión de los recortes requiere fluidos de alta viscosidad que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte con propiedades tixotrópicas, mientras que el equipo de remoción de sólidos suele funcionar más eficazmente con fluidos de viscosidad más baja. El equipo de control de sólidos no es tan eficaz con los fluidos de perforación que no disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte, los cuales tienen un alto contenido de sólidos y una alta viscosidad plástica.

Para lograr un control de sólidos eficaz, los sólidos de perforación deben ser extraídos del fluido de perforación durante la primera circulación proveniente del pozo. Al ser circulados se compara el porcentaje de arena en el lodo en la línea de flujo y en el tanque de succión.

#### **2.1.1.4 Obturar las formaciones permeables**

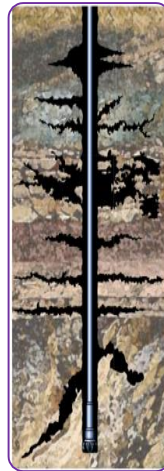
Depositar un Revoque o Retorta en la pared impermeable. A medida que avanza la perforación atravesamos muchas formaciones, cada formación tiene cierta permeabilidad (capacidad de los fluidos de fluir a través de formaciones porosas), las arenas por lo general son muy permeables, pero las arcillas no. Esta permeabilidad es lo que hace posible el paso del fluido a través de las rocas; debido a las exigencias de la perforación de tener una presión hidrostática mayor a la presión de formación, parte del líquido del lodo penetra en las formaciones, quedando sobre la pared del medio poroso una costra de sólidos conocidos como revoque o retorta, cuyo espesor queda definido por las características del lodo y las normas de perforación, un buen fluido debe estar diseñado para depositar sobre la formación un delgado revoque de baja permeabilidad, lubricada, flexible, lisa y no quebradiza.

“...Los posibles problemas relacionados con un grueso revoque y la filtración excesiva incluyen las condiciones de pozo “reducido”, registros de mala calidad, mayor torque y arrastre, tuberías atascadas, pérdida de circulación, y daños a la formación.

En las formaciones muy permeables con grandes gargantas de poros, el lodo entero puede invadir la formación, según el tamaño de los sólidos del lodo. Para estas situaciones, será necesario usar agentes puenteantes para bloquear las aberturas grandes, de manera que los sólidos del lodo puedan formar un sello. Para ser eficaces, los agentes puenteantes deben tener un tamaño aproximadamente igual a la mitad del tamaño de la abertura más grande. Los agentes puenteantes incluyen el carbonato de calcio, la celulosa molida y una gran variedad de materiales de pérdida por infiltración u otros materiales finos de pérdida de circulación. Según el sistema de fluido de perforación que se use, varios aditivos pueden ser aplicados para mejorar el revoque, limitando la filtración. Estos incluyen la bentonita, los polímeros naturales y sintéticos, el asfalto y la gilsonita, y los aditivos desfloculantes orgánicos...”<sup>24</sup>

Se dice que en general, las características de filtración de un lodo son inversas al espesor del revoque depositado en la cara de un medio poroso y a la cantidad de filtrado que pueda escapar del fluido de perforación (Figura. 13<sup>25</sup>), dentro o a través del medio poroso.

**Figura 12.** Perdida de filtrado de lodo.



**Fuente:** OilField Review, Primavera 2004

---

<sup>24</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001, p. 64.

<sup>25</sup> ABBAS Raafat, et al. Una red de seguridad para controlar las pérdidas de circulación. En: Oilfield Review. Primavera 2004.

**2.1.1.5 Estabilidad en las paredes de la formación.** Un buen fluido de perforación debe proporcionar estabilidad en el pozo, estabilizar el pozo constituye un complejo equilibrio de factores mecánicos (presión y esfuerzo) y químicos. La composición química y las propiedades del lodo deben combinarse para proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento.

La inestabilidad del pozo suele ser indicada por el derrumbe de la formación, causando condiciones de agujero reducido, puentes y atascamientos. Esto requiere generalmente el ensanchamiento del pozo hasta la profundidad original. La mejor estabilidad del pozo se obtiene cuando éste mantiene su tamaño y su forma cilíndrica original. Al desgastarse o ensancharse de cualquier manera, el pozo se hace más débil y es más difícil de estabilizar.

El ensanchamiento del pozo produce una multitud de problemas, incluyendo:

- A. Bajas velocidades anulares
- B. Falta de limpieza del pozo
- C. Mayor carga de sólidos
- D. Evaluación deficiente de la formación
- E. Mayores costos de cementación
- F. Cementación inadecuada.

En las formaciones de arena y arenisca el ensanchamiento se debe principalmente a las acciones mecánicas, siendo la erosión generalmente causada por las fuerzas hidráulicas y las velocidades excesivas a través de las toberas de la barrena. Se puede reducir considerablemente el ensanchamiento del pozo a través de las secciones de arena adoptando un programa de hidráulica más prudente, especialmente en lo que se refiere a la fuerza de impacto y a la velocidad de la tobera. Las arenas mal consolidadas y débiles requieren un ligero sobrebalance y un revoque de buena calidad que contenga bentonita para limitar el ensanchamiento del pozo.

En las lutitas, si el peso del lodo es suficiente para equilibrar los esfuerzos de la formación, los pozos son generalmente estables – inicialmente.

Con lodos a base de agua, las diferencias químicas causan interacciones entre el fluido de perforación y la lutita, las cuales pueden producir (con el tiempo) el hinchamiento o el ablandamiento. Esto causa otros problemas, tales como el asentamiento y condiciones de agujero reducido. Las lutitas secas, quebradizas, altamente fracturadas, con altos ángulos de buzamiento pueden ser extremadamente inestables cuando son perforadas. La insuficiencia de

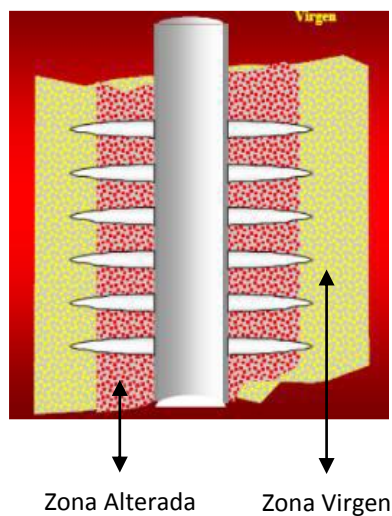
estas formaciones secas y quebradizas es principalmente de carácter mecánico y normalmente no está relacionada con las fuerzas hidráulicas o químicas.

Los fluidos de perforación a base de aceite o sintéticos se usan frecuentemente para perforar las lutitas más sensibles al agua, en áreas donde las condiciones de perforación son difíciles. Estos fluidos proporcionan una mejor inhibición de lutita que los fluidos de perforación a base de agua. Las arcillas y lutitas no se hidratan ni se hinchan en la fase continua, y la inhibición adicional es proporcionada por la fase de salmuera emulsionada (generalmente cloruro de calcio) de estos fluidos. La salmuera emulsionada reduce la actividad del agua y crea fuerzas osmóticas que impiden la adsorción del agua por las lutitas.

**2.1.1.6 Prevenir daño al mínimo en las paredes de la Formación.** El fluido de perforación usado para perforar la zona de producción tendrá un impacto importante en la productividad del pozo. Cualquier reducción en la porosidad o permeabilidad natural de una formación productiva es considerada como daño.

Estos daños pueden producirse como resultado de la obturación causada por el lodo o los sólidos de perforación, o de las interacciones químicas (lodo) y mecánicas (conjunto de perforación) con la formación. El daño a la formación es generalmente indicado por un valor de daño superficial o por la caída de presión que ocurre mientras el pozo está produciendo (diferencial de presión del yacimiento al pozo).

**Figura 13.** Daño a la formación.



**Fuente:** Arrieta Mario. Daño a la Formación

Aunque los daños causados por el fluido de perforación no sean casi nunca tan importantes que no se pueda producir el petróleo y/o gas, sería prudente tener en cuenta los posibles daños a la formación al seleccionar un fluido para perforar los intervalos productivos potenciales.

Algunos de los mecanismos más comunes causantes de daños a la formación son los siguientes:

- A. Invasión de la matriz de la formación por el lodo o los sólidos de perforación, obturando los poros.
- B. Hinchamiento de las arcillas de la formación dentro del yacimiento, reduciendo la permeabilidad.
- C. Precipitación de los sólidos como resultado de la incompatibilidad entre el filtrado y los fluidos de la formación.
- D. Precipitación de los sólidos del filtrado del lodo con otros fluidos, tales como las salmueras o los ácidos, durante los procedimientos de completación o estimulación.
- E. Formación de una emulsión entre el filtrado y los fluidos de la formación, limitando la permeabilidad.

**2.1.1.7 Enfriar, lubricar la Broca y la Sarta de Perforación.** La fricción originada por el contacto de la broca y de la sarta de perforación con las formaciones genera una cantidad considerable de calor. La circulación del lodo disipa esta energía y la distribuye en todo el pozo, de modo que logre disminuir este calor de la fuente y tener suficiente capacidad calorífica y conductividad térmica para permitir que el calor sea transportado desde el fondo del pozo a la superficie y disiparlo en la atmósfera.

Además de enfriar, el fluido lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor generado por fricción. El coeficiente de lubricación proporcionado por un fluido de perforación varía ampliamente y depende del tipo y de la cantidad de sólidos de perforación y materiales densificantes por lo tanto algunos lodos proporcionan una lubricación más eficaz que otros.

Entre los problemas asociados a lubricaciones deficientes tenemos:

1. Altos valores de torque y arrastre.
2. Desgaste anormal.
3. Agrietamiento por calor de la sarta de perforación.

**Figura 14.** Lodo base aceite, en preparación.



**Fuente:** PuroLite. Página oficial. México,

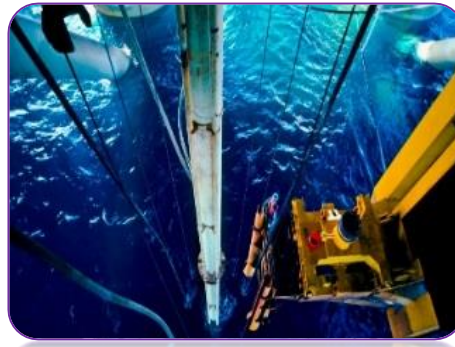
No obstante se debe tener cuidado porque estos problemas también pueden ser causados por patadas de perro, problemas de desviación, embolamiento, falta de limpieza del agujero y diseño incorrecto del equipo de perforación.

#### **2.1.1.8 Transmitir potencia hidráulica a la broca.**

El fluido de perforación es un medio para transmitir la potencia hidráulica disponible a través de la broca, la energía hidráulica puede ser usada para maximizar la velocidad de penetración (ROP), mejorando la remoción de recortes en la barrena. Esta energía también alimenta los motores de fondo que hacen girar la barrena y las herramientas de Medición al Perforar (MWD) y Registro al Perforar (LWD).

Esencialmente los programas de hidráulica se enfocan en el dimensionamiento correcto de las toberas de la barrena para utilizar la potencia disponible (presión o energía) de la bomba de lodo a fin de maximizar la caída de presión en la barrena u optimizar la fuerza de impacto del chorro sobre el fondo del pozo.

**Figura 15.** Perforación direccional de pozos.



**Fuente:** Libo Aljadeeda Oil Services. Página oficial. 2013

Los tamaños de las toberas se seleccionan con el fin de aprovechar la presión disponible en la barrena para maximizar el efecto del impacto de lodo en el fondo del pozo. Esto facilita la remoción de los recortes debajo de la barrena y ayudar a mantener limpia la estructura de corte.

En los pozos someros, la potencia hidráulica disponible es generalmente suficiente para asegurar la limpieza eficaz de la barrena. Como la presión disponible en la columna de perforación disminuye a medida que se aumenta la profundidad del pozo, se alcanzará una profundidad a la cual la presión será insuficiente para asegurar la limpieza óptima de la barrena. Se puede aumentar esta profundidad controlando cuidadosamente las propiedades del lodo.

**2.1.1.9 Facilitar la máxima obtención de información sobre las formaciones perforadas.** Las propiedades físicas y químicas del lodo afectan la evaluación correcta de la formación. Durante la perforación, técnicos llamados registradores de lodo (Mud Loggers en la figura 16<sup>26</sup>) controlan la circulación del lodo y de los recortes para detectar indicios de petróleo y gas.

Estos técnicos examinan los recortes para determinar la composición mineral, la paleontología y detectar cualquier indicio visual de hidrocarburos. Esta información se registra en un registro geológico (mud log) que indica la litología, la velocidad de penetración (ROP), la detección de

---

<sup>26</sup> MAHROUS Ramy y SOBRINHO Marcus, M-I SWACO; PACHECO M. Bruno, Schlumberger; GONCALVES Thomas, Petrobras. Micronized barite fluid helps Brazilian well walk narrow drilling window. Drilling Contractor 2013.

gas y los recortes impregnados de petróleo, además de otros parámetros geológicos y de perforación importantes.

**Figura 16.** Mud loggers.



**Fuente:** Drilling Contractor 2013

En la figura 17<sup>27</sup> se observan los registros eléctricos con cable son realizados para evaluar la formación con el fin de obtener información adicional. También se pueden obtener núcleos de pared usando herramientas transportadas por cable de alambre. Los registros con cable incluyen la medición de las propiedades eléctricas, sónicas, nucleares y de resonancia magnética de la formación, para identificar la litología y los fluidos de la formación.

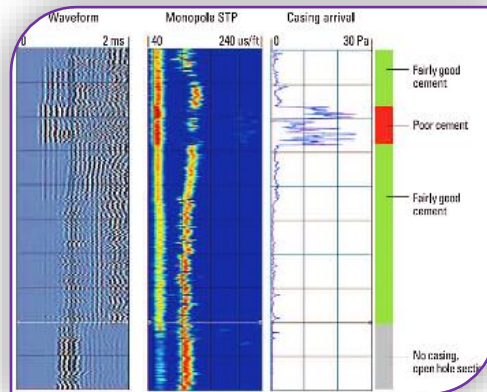
La manera directa en que afecta el fluido de perforación a la recolección de estos datos es:

- A. Dispersión de los recortes en el lodo. Entonces el Geólogo no tendrá nada que evaluar en la superficie.
- B. Mal transporte de los recortes, por lo tanto será difícil determinar la profundidad a la cual los recortes se originaron.
- C. **Lodos Base Aceite**, estos ocultaran los indicios de hidrocarburos en los recortes.
- D. **Los fluidos** que contienen altas concentraciones iónicas de **potasio** perjudican el registro de la radioactividad natural de la formación.
- E. **La salinidad** alta o variable del filtrado puede dificultar o impedir la interpretación de los registros eléctricos.

---

<sup>27</sup> DEGRANGE Jean-Marie y SCHEIBNER David, Schlumberger; PAMPURI Fernandina, PELOROSSO Mauro. Brasil, HartEnergy, Junio 2011.

**Figura 17.** Registro de pozos.



**Fuente:** Drilling Contractor 2011

Para un registro con cable óptimo, el lodo no debe ser demasiado denso y debe mantener la estabilidad del pozo y suspender cualesquier recortes o derrumbes. Además, el pozo debe mantener el mismo calibre desde la superficie hasta el fondo, visto que el ensanchamiento excesivo del diámetro interior y/o los revoques gruesos pueden producir diferentes respuestas al registro y aumentar la posibilidad de bloqueo de la herramienta de registro.

**NOTA\*:** La selección del lodo requerido para perforar un núcleo está basada en el tipo de evaluación a realizar. Si se extrae un núcleo solamente para determinar la litología (análisis mineral), el tipo de lodo no es importante. Si el núcleo será usado para estudios de inyección de agua y/o humectabilidad, será necesario usar un lodo “suave” a base de agua, de pH neutro, sin agentes tensioactivos o diluyentes. Si el núcleo será usado para medir la saturación de agua del yacimiento, se suele recomendar un lodo suave a base de aceite con una cantidad mínima de agentes tensioactivos y sin agua o sal. Muchas operaciones de extracción de núcleos especifican un lodo suave con una cantidad mínima de aditivos.

#### **2.1.1.10 Control de la Corrosión.**

La exposición constante de las herramientas al fluido de perforación facilita varias maneras de corrosión. Gases disueltos tales como el oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno pueden ser causantes de agentes corrosivos en pozo y superficie; es pues una función del lodo proveer un equilibrio para mantener la corrosión a un nivel aceptable, no solo de los componentes metálicos sino que además el fluido no debe dañar los componentes de caucho

---

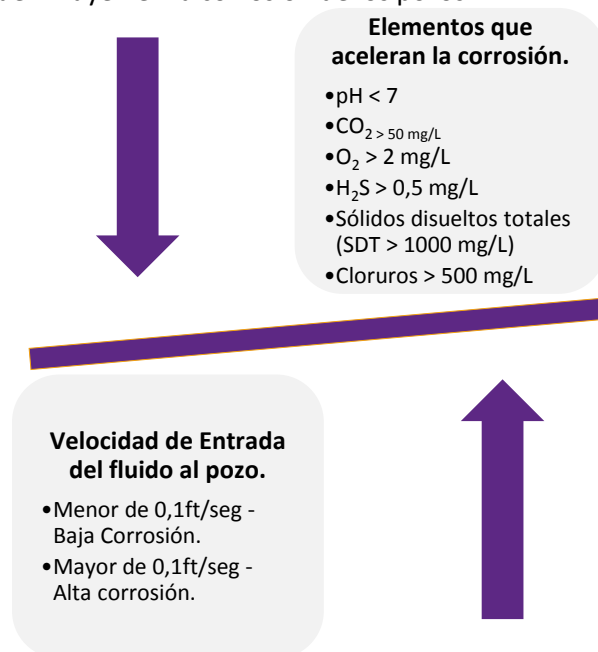
\* M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001, p. 69.

o elastómeros (en caso de usarlos). Muestras de corrosión se deben obtener durante todas las operaciones de perforación para controlar los tipos y las velocidades de corrosión.

Las mayores causas asociadas a la corrosión y soluciones:

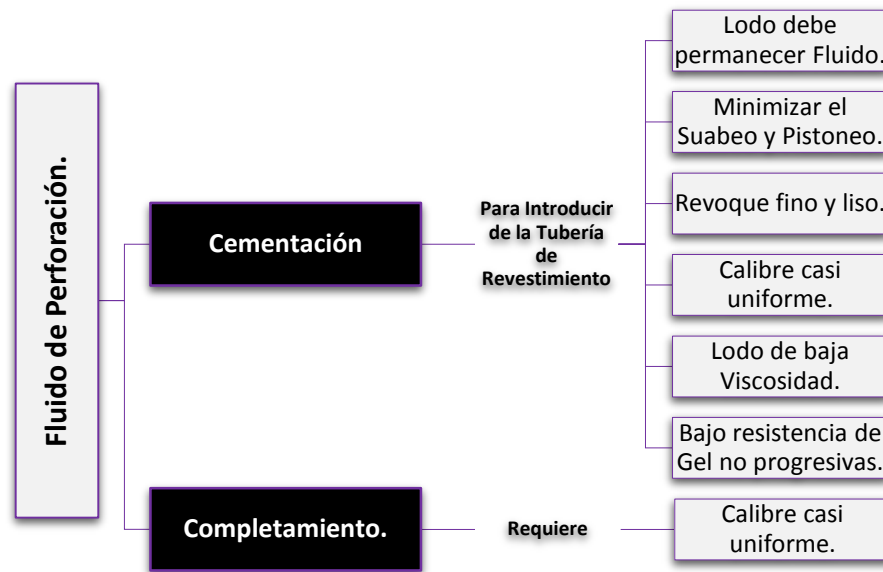
- A. Aireación del lodo, por el oxígeno ocluido pueden derivar en corrosión en poco tiempo. Este inconveniente puede ser tratado con inhibidores químicos y secuestradores. Cabe destacar que éstos se usan cuando el riesgo de corrosión es significativo.
- B. El sulfuro de hidrogeno puede causar una falla rápida y catastrófica de la columna de perforación. Si se perforan ambientes con alto contenido de H<sub>2</sub>S, se recomienda usar fluidos de alto pH, combinados con un producto químico secuestrador de sulfuro tal como el Cinc.
- C. En general, un pH bajo agrava la corrosión.

**Figura 18.** Factores que influyen en la corrosión de los pozos



- **Facilitar la Cementación y Completamiento.** El fluido de perforación debe proporcionar un buen ambiente para el revestimiento y completamiento del pozo.

**Figura 19.** Bondades del Fluido en la Cementación y Completamiento.



**2.1.1.11 Minimizar el impacto sobre el Medio Ambiente.** Después de un tiempo el fluido de perforación se convierte en un desecho y debe ser eliminado en conformidad con los reglamentos ambientales. Cada fluido base agua, base aceite, sintético, etc. está sujeto a diferentes consideraciones ambientales. Lo ideal es que éste fluido proporcione el menor daño posible sobre fauna, flora, fuentes hídricas superficiales y subterráneas.

La siguiente función del lodo no se data en el Manual M-I SWACO como función principal del lodo si no como una función derivada:

**2.1.1.12 Soportar parte del peso de la sarta de perforación o del revestimiento.**

Con el incremento de las profundidades perforadas, el peso que soporta el equipo de perforación se hace cada vez mayor. El fluido de perforación ayuda a soportar una porción del peso de la columna de perforación o tubería de revestimiento mediante la flotabilidad. Basado en el Principio de Arquímedes se afirma que la sarta (o la tubería de revestimiento según sea el caso), se mantiene a flote por una fuerza igual al peso del lodo desplazado, reduciendo la carga del gancho en la torre de perforación. La flotabilidad es directamente proporcional al peso del lodo, es decir un fluido de 16 lb/gal proporcionará el doble de la flotabilidad que uno de 8 lb/gal.

El peso de la sarta de perforación y el de la tubería de revestimiento en el lodo, es igual a su peso en el aire multiplicado por dicho factor de flotación. El aumento de la densidad del lodo conduce a una reducción del peso total que el equipo de superficie debe soportar.

$$\text{Peso de tubería} = \text{Peso tubería (aire)} * \text{Factor de Boyanza} \quad (3)$$

Las funciones del Lodo y sus propiedades relacionadas son resumidas en la siguiente tabla<sup>28</sup>:

**Tabla 3** Funciones del Lodo y sus propiedades

FUNCION	PROPIEDAD DEL FLUIDO.	RECOMENDACIÓN DE LAS PROPIEDADES	CONTROL DE LAS PROPIEDADES DEL LODO.
<b>Transporte de Recortes</b>	Viscosidad (Yield Point, Gel y Viscosidad Plástica)	<p><b>PV (Viscosidad Plástica):</b> El menor valor posible.</p> <p><b>YP (Yield Point):</b> Función del diámetro del hueco y la inclinación.</p> <p><b>YP Lb./100 ft<sup>2</sup></b></p> <p>&gt;17½" 20-30 17½" 18-25 12½" 15-18 8½" 10-15 &gt;8½" &gt;15</p> <p><b>Gel: Lb./100 ft<sup>2</sup></b></p> <p>0' : 10 10' : 35</p>	Aumentar el YP y el ge por medio de la adición de bentonita. Disminuir el YP y el gel por dilución o con adelgazantes. La PV aumenta cuando aumenta el contenido de sólidos y disminuye por dilución.

<sup>28</sup> MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación. Trabajo de Grado para optar título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Químicas, 1992. 6 p.

FUNCION	PROPIEDAD DEL FLUIDO	RECOMENDACIÓN DE LAS PROPIEDADES	CONTROL DE LAS PROPIEDADES DEL LODO
<b>Enfriamiento y lubricación de la Broca y Sarta</b>	La lubricación mejora cuando la torta de lodo es delgada, apretada y de bajo contenido de Sólidos.	Las partículas de tamaño coloidal mejoran las propiedades de la torta.	Agregar una total dispersión de la bentonita en los lodos base agua (adelgazantes), y aumentar el contenido de polímero para pérdida de fluido en lodos no dispersos. Un nivel de lubricantes entre (½ % - 1½ %).
<b>Estabilidad de las Paredes</b>	Densidad	La densidad puede exceder la presión de colapso del hueco y ser menor que el gradiente de fractura de la formación.	Aumentar la densidad por adición de barita y disminuirla por dilución.
<b>Impedir la entrada de Fluidos de la Formación</b>	Densidad	La densidad debe exceder la presión de formación.	Aumentar la densidad por adición de barita y disminuirla por dilución.
<b>Sello en Formaciones Permeables</b>	Pérdida de Fluido.	Pérdida de fluido API menor 5 ml/30 min. HPHT menor de 10-15 ml/30 min. Emulsiones de agua en aceite a HPHT, entre 5-8 ml/30 min.	<b>Lodos Dispersos:</b> Asegurar la dispersión de las arcillas, adicionar bentonita. <b>Lodos No Dispersos:</b> Adicionar almidón o celulosa polianiónica (PAC) <b>Emulsiones:</b> En agua-aceite asegurar estabilidad y adicionar reductores de pérdida de fluido.
<b>Transmitir Energía Hidráulica a la Broca</b>	Reología.	La reología debe minimizar las pérdidas del sistema.	Aumentar el YP y el ge por medio de la adición de bentonita. Disminuir el YP y el gel por dilución o con adelgazantes. La PV aumenta cuando aumenta el contenido de sólidos y disminuye por dilución.

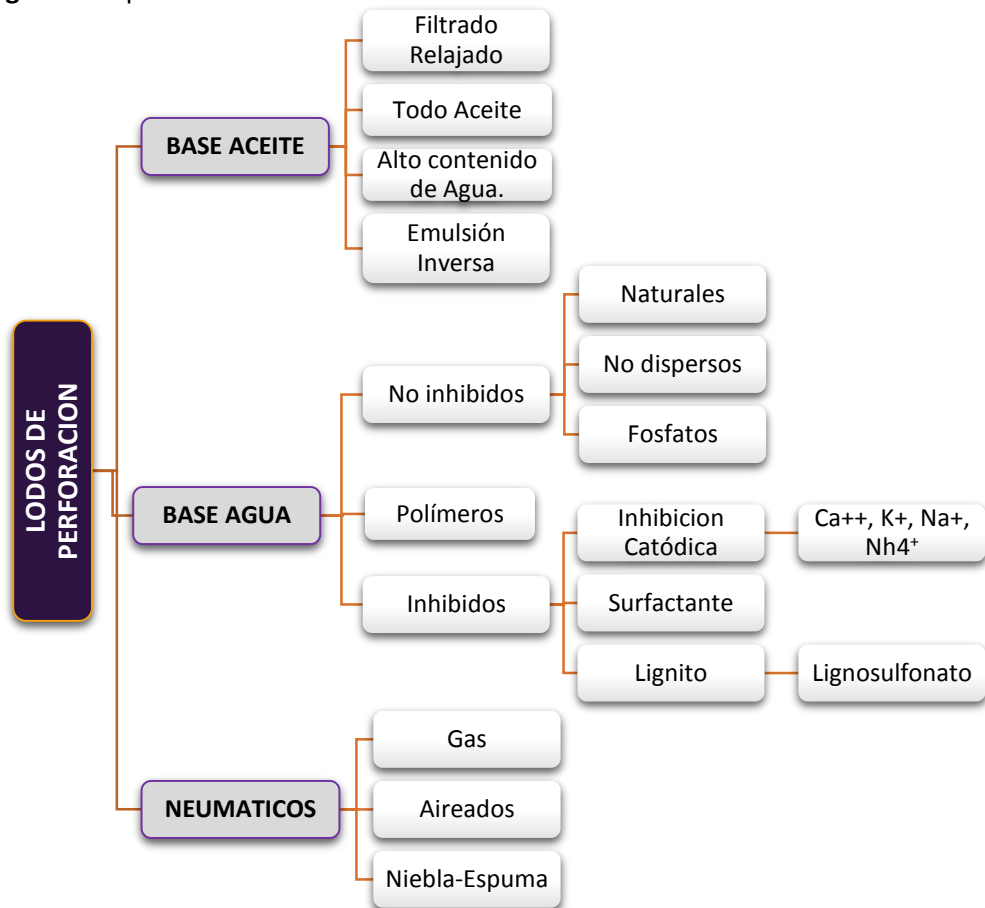
FUNCION	PROPIEDAD DEL FLUIDO	RECOMENDACIÓN DE LAS PROPIEDADES	CONTROL DE LAS PROPIEDADES DEL LODO
<b>Impacto Ambiental</b>	<p><b>Lodos Base Agua:</b> el pH</p> <p><b>Emulsionados:</b> El contenido de Aromáticos y la volatilidad.</p>	<p><b>Lodos Base Agua:</b> el pH debería mantenerse debajo de 11 para evitar irritación de la piel.</p> <p><b>Emulsionados:</b> El contenido de Aromáticos debe ser mínimo. El flash point debe ser tan alto como sea posible. (90 °C o más).</p>	<p>Limitar las adiciones de soda cáustica.</p> <p>Usar lodos base aceite en bajo contenido aromático.</p>
<b>No Corrosivo</b> <b>No Abrasivo</b>	<p>La corrosión está relacionada con los contenidos de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y con el pH. La abrasividad está influenciada por el contenido de arena y de materiales pesantes.</p>	<p>Mantener un pH de 9.</p> <p>Remover el H<sub>2</sub>O y el CO<sub>2</sub>.</p> <p>Mantener el nivel de arena por debajo de 1% volumen. Usar barita API. Los óxidos de hierro son recomendados solo para lodos emulsionados.</p>	<p>Adicionar soda cáustica; carbonato de Zinc (H<sub>2</sub>O) y cal (CO<sub>2</sub>). Usar equipo de remoción de sólidos o diluir.</p>
<b>No dañar ni reducir la permeabilidad de la formación</b>	<p>Pérdida de fluido.</p> <p>Tipo y concentración de sales disueltas.</p>	<p>Pérdida de fluido: &lt;5 ml/30 min. En areniscas con arcilla sensitivas se debe usar una concentración de 3% de KCl. Asegurar la compatibilidad con los fluidos de formación.</p>	

**Fuente:** MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación.

**2.1.1.13 Composición, Fases Y Tipos De Lodos.** En la perforación de un pozo debe hacerse atravesando diferentes tipos de formaciones que a su vez pueden requerir diferentes tipos de fluidos. La composición de los fluidos dependerá de cada operación en particular, esto quiere decir, que es necesario realizar mejoras a los fluidos requeridos, para enfrentar las condiciones que se encuentran a medida que avance la operación. Por ahora UN “fluido de perforación apropiado para un pozo es aquel que es más económico en la perspectiva total de seguridad, costos de perforación y, eventualmente, costos de producción”.<sup>29</sup> Es decir, “un lodo de bajo costo inicial, puede resultar muy costoso si causa problemas durante la perforación o producción”<sup>30</sup>.

**2.1.1.14 Tipos de Fluidos.** En las operaciones de perforación, se usan una gran variedad de fluidos, que se clasifican según la fase continua en tres grandes grupos como se observa figura:

**Figura 20.** Tipos de Fluidos de Perforación



<sup>29</sup> ECAPETROL. Química de Lodos. Escuela de Capacitación Petrolera.

<sup>30</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. 6 p.

- **Lodos Base Agua**

Son los más usados en la industria, por su bajo costo. Se clasifican en:

**a) Inhibidos**

Su principal característica es la dispersión de las arcillas, controlando la hidratación de la arcilla asegurando la estabilidad del hueco; presentan alta tolerancia a la contaminación.

**Figura 21.**Lodos Inhibidos



## b) No Inhibidos

Utilizados para perforar pozos someros o en etapas primarias de pozos más profundos. Algunos autores lo consideran como lodos que tiene poco tratamiento químico.

Figura 22. Lodos No Inhibidos



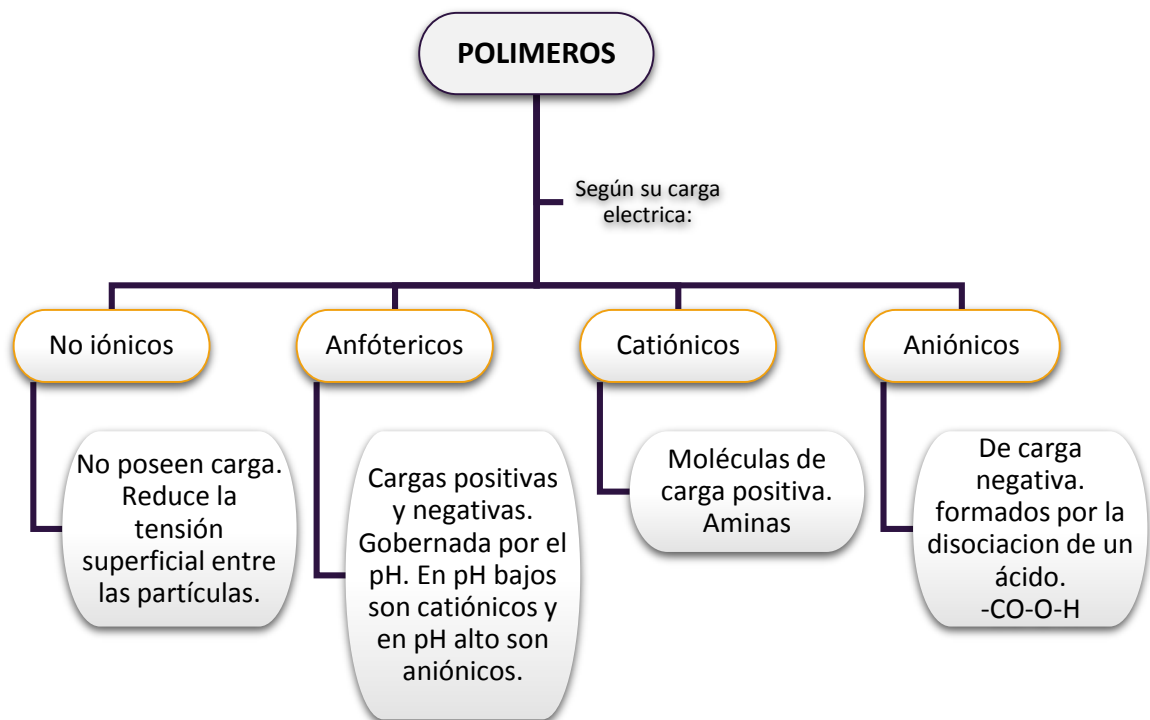
## c) Lodos Polímeros

Fluidos constituidos por una mínima cantidad de bentonita, polímeros de cadena larga y alto peso molecular. La mayoría de polímeros empleados en la industria petrolera tiene un rango de operación menor a 300 °F, soluble en agua, aceite y soluciones salinas. Especialmente en fluidos de completamiento y fracturamiento.

Los polímeros son susceptibles a degradación por factores como calor, degradación mecánica, oxígeno, ataques biológicos, ácidos, sales y bases.

Estos sistemas son utilizados para encapsular sólidos de perforación, para prevenir la dispersión cubriendo con una película la lutita que evita que esta se incorpore en el fluido; incrementan la viscosidad del lodo, reducen la pérdida de filtrado y son utilizados como floculantes y desfloculantes.

**Figura 23.** Clasificación de los polímeros según su carga eléctrica



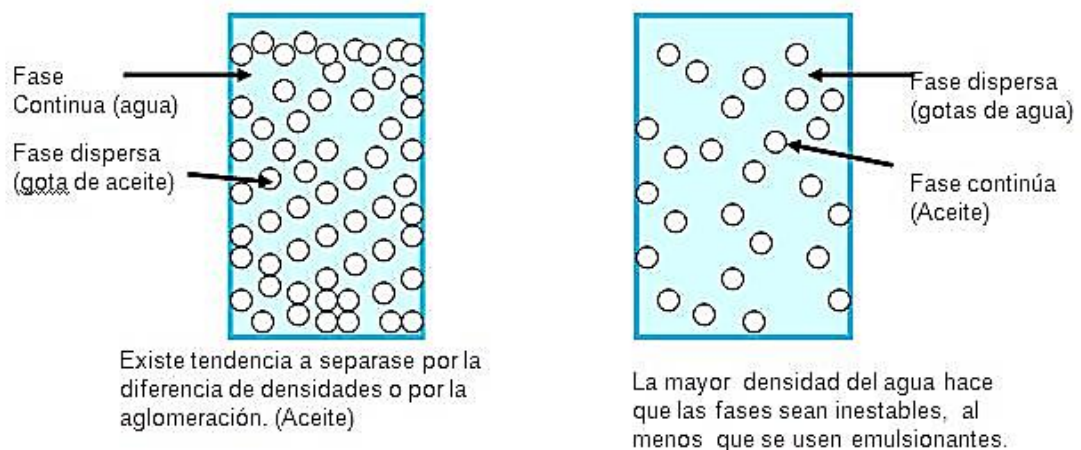
- **Lodos Base Aceite**

Un lodo base aceite es una emulsión o mezcla de dos fluidos inmiscibles, es decir, líquidos que no se mezclan bajo condiciones normales. Cuya fase continua corresponde a petróleo, crudo, derivados o un aceite mineral. Cuando se obtiene la emulsión, uno de los fluidos se encuentra disperso en el otro en forma de pequeñas gotitas. Alrededor de este tipo de fluidos se entretienen muchas ventajas entre estas tenemos:

- A. Las arcillas no se hidratan ni se hinchan.
- B. Mejor estabilidad de pozo.
- C. Producción mejorada a partir de las areniscas que contienen arcillas.

- D. Menores problemas al perforar a través de evaporitas (sales, anhidrita, etc.).
- E. Menor ensanchamiento de pozo
- F. Propiedades del lodo más estables.
- G. Son altamente tolerantes a los contaminantes debido a la baja interacción entre el aceite y la formación.

**Figura 24.** Dispersión de una emulsión.



**Fuente:** Universidad Nacional Abierta a Distancia. Lección 19: Emulsiones.

Pero los aceites tienen ciertas características que son indeseables:

- A. Son inflamables.
- B. Algunos contiene compuestos que causan fallos en los materiales de caucho como las mangueras, juntas tóricas (o-rings), empaquetaduras y BOP.
- C. No tienen estructura de gel
- D. Son difíciles de viscosificar de manera que puedan ser densificados.
- E. Algunos contiene compuestos tóxicos o peligrosos para la Salud, Seguridad y Medio Ambiente.
- F. Tienen alta solubilidad de los gases encontrados durante la perforación, lo que puede afectar la detección de las arremetidas de pozo.
- G. No se degradan fácilmente.

En las propiedades de los lodos base aceite influyen los siguientes parámetros:

1. Relación aceite/agua
2. Tipo y concentración del emulsificante.
3. Contenido de sólidos.
4. Temperatura y presión de pozo.

Estos fluidos se clasifican en:

#### **a) Emulsión Inversa**

Un lodo de emulsión inversa se caracteriza porque su fase continua es el aceite y su fase dispersa consta de agua emulsionada y compuestos asfálticos, el agua puede ser dulce o salada. En este tipo de lodo el agua aumenta la viscosidad y el aceite reduce la viscosidad.

Los sistemas de emulsión firme o emulsión inversa ofrecen estabilidad a alta temperatura y tolerancia a los contaminantes. Estos sistemas usan altas concentraciones de emulsificantes y agentes controladores de pérdida de fluido para dar mayor estabilidad a la emulsión y reducir pérdida de filtrado. El volumen de filtrado HPHT (alta presión, alta temperatura) es comúnmente menor de 15 ml y debe ser todo aceite.

#### **b) Sistema de Filtrado Relajado (FR)**

Estos sistemas no tienen nada o muy bajas concentraciones de emulsificantes y agente controlador de filtrado. El aumento de filtrado en estos sistemas provee velocidades más rápidas de perforación que las logradas con sistemas de emulsión firme. El volumen de la pérdida de filtrado HPHT es entre 15-20 cm. Estos sistemas son estables a temperaturas de hasta 325 °F (163 °C).

#### **c) Todo Aceite**

Formulados solo de aceite en la fase continua, usados con frecuencia como fluidos de corazonamiento. Su tolerancia a la contaminación por sal y anhídrita, estabilidad a altas temperaturas, alto poder inhibitorio y estabilizados de shale y valores altos de lubricidad lo perfilan para ser usados en pozos con estos problemas.

#### d) Sistemas con alto contenido de Agua

Los sistemas de alto porcentaje de agua fueron desarrollados para ser utilizados en áreas en que las descargas de aceite son restringidas, como en el Mar del Norte. Estos sistemas, que tienen una relación aceite-agua de 50/50, pueden reducir hasta en un 45% el aceite que queda en los recortes. Los sistemas de alto porcentaje de agua no son recomendados a temperaturas superiores a 250 °F (121 °C). A continuación en la Tabla 4<sup>31</sup> se detallan los usos principales de estos diferentes sistemas de lodos base aceite.

**Tabla 4** Sistemas de Fluido Base Aceite

SISTEMA	APLICACIÓN
Emulsión firme o inversa	Para uso general y en áreas de altas temperaturas de hasta 500°F (260°C).
Filtrado Relajado (FR)	Para proveer más altos índices de perforación.
Aceite 100%	Para uso como fluido no perjudicial de extracción de núcleos y perforación.
Alto contenido de Agua	Para reducir la retención de aceite en los recortes; usado principalmente en zonas costa afuera que son ambientalmente sensibles.

**Fuente:** BAROID. Manual de Fluidos: The Complete Fluids Company. Revisión Abril de 1999

**2.1.1.15 Fases de los Lodos.** “Típicamente, un lodo es un líquido con una suspensión de sólidos y posiblemente, también otros líquidos y/o gases. El líquido en el cual todos estos materiales están suspendidos es la fase continua del lodo. Las partículas sólidas o los glóbulos líquidos suspendidos constituyen la fase dispersa del lodo”<sup>32</sup>

<sup>31</sup> BAROID. Manual de Fluidos: The Complete Fluids Company. Revisión Abril de 1999. Houston, USA. 250 p.

<sup>32</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. 8 p.

**Tabla 5** Fases de los Lodos y sus Propiedades

FASE	TIPO DE FLUIDO	CARACTERISTICA	PROPIEDAD
CONTINUA	Base Agua	El agua es la fase continua de este tipo de lodo. Las sales disueltas tales como los cationes Na <sup>+</sup> (Sodio), Ca <sup>++</sup> (Calcio), y el anión OH <sup>-</sup> (Hidroxilo) se encuentran disueltas en esta fase.	Un aumento en la concentración de la fase continua tiende a adelgazar el lodo es decir afecta directamente Densidad y Viscosidad. El filtrado del lodo proviene en su mayor parte de la fase continua.
	Base Aceite	El aceite es la fase continua de los lodos base Aceite. Se caracteriza porque es la que soporta en suspensión todos los líquidos y/o sólidos.	
DISCONTINUA	Base Agua	<p>Se caracteriza porque la fase discontinua pertenece a los sólidos* que contiene el lodo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros</li> <li>• Sólidos Inertes</li> <li>• Sólidos Reactivos</li> </ul> <p>Estos sólidos se clasifican en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coloidales</li> <li>• Limos</li> <li>• Arenas</li> </ul>	Viscosidad, gel y torta. Los glóbulos de aceite, emulsionados en un lodo base agua, viscosifican el lodo y reducen su densidad; por lo tanto la proporción aceite-agua, debe ser cuidadosamente controlada, la entrada de agua de formación lo hace más viscoso y si el porcentaje de agua es algo, desestabiliza el lodo. El control de los sólidos es de especial cuidado, a medida que aumenta el porcentaje de sólidos la inestabilidad del lodo aumenta y la velocidad de penetración de la broca decrece.
	Base Aceite	Se caracteriza por que el agua es la fase discontinua de éste.	El aumento en el porcentaje de agua aumenta la viscosidad del lodo y desestabiliza la emulsión.
	Neumáticos	Se caracteriza porque un gas o aire es la fase dispersa de este.	Viscosidad, Densidad. El aire o el gas penetran y se distribuyen en el lodo provocan su espesamiento (aumento de viscosidad) y disminuyen su densidad.
QUIMICA	Base Agua	Son los aditivos que contiene el lodo: Densificantes, dispersantes, controladores de filtrado, lubricantes, emulsificantes, controladores de arcillas, floculantes, bactericidas, antiespumígenos, pérdida de filtrado y anticorrosivos.	Propiedades de Flujo y filtrado.
	Base Aceite	Aditivos: Emulsificante principal, viscosificante, gelificante, controladores de filtrado, humectantes.	Propiedades de Flujo y filtrado.

**Fuente:** BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos.

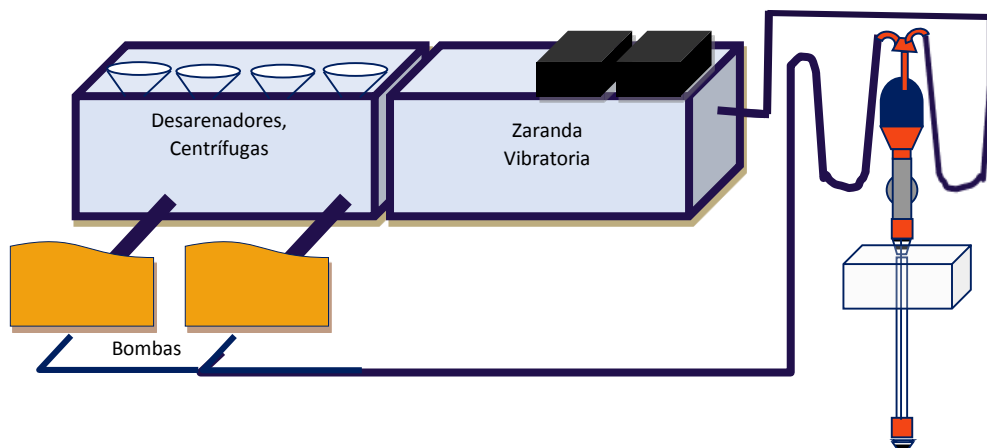
\* EL tamaño de las partículas sólidas en el lodo tiene también importancia. Las partículas de menos de 2 micrones se clasifican como coloides (un micrón es un millonésimo de metro; hay aproximadamente 25400 micrones en una pulgada). Su pequeño tamaño hace que sean muy sensibles a sus cargas eléctricas de superficie, y por lo tanto, las partículas coloidales tienen a parecer como los sólidos más activos. Las partículas cuyo tamaño es superior a 74 micrones son clasificadas como arena API. La abrasividad de esas partículas da por resultado el desgaste de las bombas, de las brocas y de las herramientas. El término limo se emplea habitualmente para describir las partículas que miden más de 2 micrones pero menos de 74.

**2.1.2 Descripción Del Equipo.** Un equipo de perforación está compuesto por cinco sistemas. Sistema de elevación, sistema de rotación, sistema de seguridad, sistema de potencia y el SISTEMA DE CIRCULACIÓN. Cada uno cumple una o varias funciones específicas dentro de la operación de perforación de un pozo petrolero. Nosotros nos centraremos en el que nos conviene:

**2.1.2.1 Sistema de circulación.** Es el eje principal en el proceso de perforación. Es el encargado de transportar el fluido de perforación, vital para el avance y éxito de la operación, hasta el momento no es posible perforar ni 5 metros sin éste pues la fricción aumentaría arbitrariamente y por consiguiente también la temperatura aumentaría y se fundiría la broca. Su función principal es la de extraer los recortes de roca del pozo, además que sirve de apoyo vital al sistema rotatorio durante operaciones de perforación y de reacondicionamiento.

El sistema de circulación y sus elementos abarcan la mayor parte física del equipo de perforación y de igual manera las cuadrillas dedican gran parte del tiempo a este sistema. El sistema de circulación (Ver Figura 26) tiene equipos, materiales y áreas de trabajo necesarias para la preparación, el mantenimiento y la verificación de las características de la perforación y el lodo a emplearse.

**Figura 25.** Circuito de lodo.



Se trabaja con altas presiones, ya que consiste en la circulación de lodo químico a alta presión, cuyo objetivo es Lubricar, Refrigerar y Transportar los escombros removidos por la broca a su paso dentro del terreno.

El sistema está compuesto por equipos y accesorios, todos de forma y características diferentes, los cuales movilizan el lodo de perforación a través del sistema de circulación, por lo que permiten preparar el lodo, almacenarlo y bombearlo, hacia el pozo, estableciendo un circuito cerrado de circulación con retorno a los tanques, desde donde fue succionado por las bombas de lodo.

Es el área de almacenamiento y preparación del fluido. Algunos de los componentes son:

- **Almacén de Materiales**

Es el lugar donde se almacenan los productos químicos y aditivos necesarios para el fluido, tales como: viscosificantes, densificantes, adelgazantes, controladores de filtrado, emulsificantes entre otros.

- **Tanques de Lodos**

En ellos se prepara el fluido o acondiciona el lodo que viene de pozo para ser reinyectado.

Existen una variedad dependiendo de la función que desempeñan:

- ♣ **Tanques Auxiliares:**

Tanques complementarios y pueden subdividirse en tanque de mezcla, depósitos de agua y tanques de reservas.

- ♣ **Tanque de Mezcla:**

Es en este tanque donde se preparan los fluidos con las características requeridas por la perforación y cuentan con equipos de mezclas independientes como agitadores.

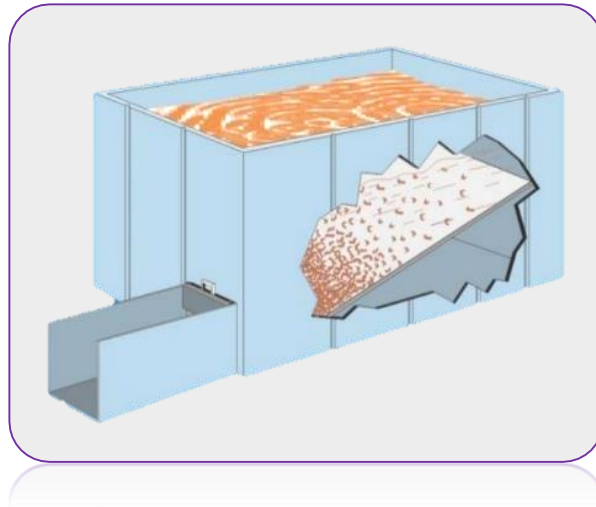
- ♣ **Tanque de Reserva:**

Se usa para mantener cualquier fluido ya preparado y listo para ser usado. En pozos exploratorios, se mantiene en reserva un lodo con densidad de 0,5 Lb/gal por encima que la densidad de trabajo.

- ♣ **Tanque de Asentamiento:**

También se le conoce como trampa de arena. Es el tanque donde se recibe el retorno de pozo. Aquí se instalan los equipos de separación de sólidos primarios (Zarandas), para descartar los cortes de tamaño mayor a 74  $\mu$  (micrones). La arena se asienta por efecto de la gravedad.

**Figura 26.**Tanques de asentamiento



**Fuente:** Universidad del Zulia. Núcleo costa oriental del lago. Programa ingeniería sub-programa: petróleo. Cátedra: fluidos de perforación área de preparación del fluido

- **Tanques Intermedios:**

Son los tanques donde se instala el resto de los equipos separadores de sólidos (desarenadores, deslimadores y centrífugas), elimina partículas y sólidos indeseables y siempre contendrá partículas finas de la formación que no se pueden eliminar por su tamaño entre 4-74  $\mu$ .

- **Tanque de Succión:**

Es el tanque desde donde el fluido, casi libre de sólidos, es succionado por las bombas de lodos.

- **Equipos de Circulación**

De este equipo depende el circuito del lodo, desde que lo succionada hasta que el fluido retorna al extremo opuesto del tanque, después de pasar por el interior de las tuberías y los espacios anulares. Su componente principal son las bombas, que toman el lodo y lo impulsan hasta la sarta de perforación. Cada equipo de perforación debe tener como mínimo tres bombas; dos conectadas en paralelo y la tercera como auxiliar.

- **Bombas Dúplex**

De doble acción, es decir, desplazan fluidos en las dos carreras del ciclo de cada pistón mediante válvulas y descargas en ambos lados de la camisa. Cuando el pistón se desplaza en su carrera de enfrente, al mismo tiempo succiona por la parte posterior y viceversa.

- **Bombas Triplex**

Son bombas de acción sencilla, es decir, el pistón desplaza fluido solamente en su carrera de enfrente y no succiona. Debido a esto, las bombas triples necesitan mantener las camisas llenas de fluido y esto se logra a través de bombas centrífugas.

La bomba más empleada es la dúplex ya que son de doble acción, maneja caudales variados y su alto rendimiento.

- **Área de Reacondicionamiento del Fluido**

Esta área se encarga de tratar el lodo (limpiar y revisar sus propiedades) que viene de pozo con recortes de perforación para ser inyectado nuevamente en el ciclo. En teoría la parte fundamental de esta área es el equipo de control de sólidos.

**2.1.2.2 Equipo de Control de Sólidos.** En forma global en equipo de control de sólidos cuenta con el siguiente circuito: zarandas, desarenadores, desarcilladores, limpia lodos y centrifugas. Ver sección 2.5.2. La utilización del total de los equipos depende de las condiciones pozo-lodo con el fin de eliminar la mayor cantidad de sólidos de formación generados por la broca para que el lodo entre de nuevo al pozo lo más limpio posible.

El volumen y tipo de sólidos que se encuentren en el fluido de perforación afecta directamente las propiedades del mismo, la hidráulica, la rata de penetración, la estabilidad del hueco y el costo total del pozo. Por eso la importancia que tiene el control de sólidos; además el buen funcionamiento del fluido depende del control diario de sus características, no es una tarea fácil pero necesaria para prolongar la vida útil de la broca y de las bombas de lodo.

**Zaranda Vibratoria:** Es el primer equipo que interviene en el proceso de eliminación de sólidos. Maneja lodos de cualquier peso. El lodo cargado de sólidos llega al vibrador; el cual retiene a los sólidos grandes con su malla y deja caer el líquido y sólidos más pequeños al fondo. Es el principal equipo de control de sólidos que remueve partículas de gran tamaño, de su eficiencia depende del funcionamiento del resto de los equipos.

**Trampas de Arenas o asentamiento:** Sirve de asentamiento a las partículas sólidas por efecto de la gravedad luego de pasar a través de las mallas instaladas.

**Desarenadores:** Está diseñado para manejar grandes volúmenes de fluidos y remover sólidos livianos que han pasado por la malla de la zaranda. Es usado para remover arena con algo de limo, es decir, partículas mayores de 74 micrones. Debe ser puesto en

operación al comienzo de la primera fase de la perforación de un pozo y preferiblemente en el hoyo superficial ya que un aumento, en el porcentaje de sólidos en esta fase es muy rápido, debido a las elevadas tasas de perforación y circulación.

**Deslimadores:** Remueve sólidos que no retiene el desarenador. Opera un rango menor a 20 micrones (tamaño del ripio) los conos son por lo general de 4 pulgadas de diámetro y debe ser puesto en operación al comenzar la operación, esta capacidad para mover hasta un 150% del caudal de circulación descarta un alto porcentaje de sólidos indeseables.

**Centrífuga de decantación:** Remueve sólidos más pequeños (3.5 micrones). Elimina además de sólidos, parte de la fase líquida del lodo que contiene material químico en solución, tales como lignosulfonato, soda caustica, entre otros. Es un equipo diseñado para separar los componentes de un líquido según la densidad, la centrifuga funciona incrementando la fuerza gravitacional sobre un sistema para acelerar el proceso de sedimentación de los sólidos suspendidos en el fluido permitiendo separar partículas mayores de 2 micrones de diámetros.

**Hidrociclones:** Mecanismo que separa sólidos de distintos tamaños, por asentamiento de partículas. El lodo pasa tangencialmente por la parte del cono o ciclón, simultáneamente se propicia una fuerza centrífuga que obliga las partículas a orientarse hacia la pared del cono. Las partículas grandes y pesadas precipitan y son eliminadas por el fondo del cono. El lodo restante se desborda por arriba y sale por la abertura del vértice.

**Desgasificador:** Mecanismo que se encarga de retirarle gas al lodo a fin de propiciarle la densidad debida al lodo, evitar arremetidas y para facilitar bombeos efectivos de lodo y no de lodo con gas.

**2.1.3 Análisis Químico De Fluidos De Perforación.** De acuerdo con el Instituto Americano del Petróleo (API), las propiedades del fluido a mantener durante la perforación del pozo son físicas<sup>33\*</sup> y químicas, entre las propiedades tenemos: Alcalinidad, Dureza, Iones Cloruros y pH. Las fases del fluido influyen drásticamente en química de los lodos, por ejemplo la concentración de sólidos en un lodo puede controlarse por el empleo apropiado de equipo para la remoción mecánica de sólidos y mediante la dilución con agua. Sin embargo, la fase acuosa es más compleja y se necesitan controles mucho más complicados para retener los balances iónicos deseables.

---

<sup>33\*</sup> De las propiedades Físicas hablaremos en el siguiente capítulo, aquí nos concentraremos en el análisis químico.

El control del balance iónico de la fase acuosa se complica ante todo por el hecho de que los ensayos químicos realizados en dicha fase son solamente de naturaleza semi-cuantitativa. Por consiguiente, siempre queda una duda sobre cuán exactos o precisos son los resultados. La mayoría de los ensayos químicos proveen una información suficiente para la interpretación del comportamiento del lodo desde un punto de vista químico. Sin embargo, hay ocasiones en que parece haber un desequilibrio sin que los ensayos químicos reflejen una indicación sobre la existencia de posibles causas del problema. Esto se observa comúnmente en los análisis para carbonatos y bicarbonatos, y la causa de la dificultad en los ensayos parece residir en el tipo de ambiente alcalino en que se encuentran las sustancias.

Si la alcalinidad de un lodo fuera atribuible sólo a los iones oxhidrilos, sería mucho más fácil relacionar las pruebas químicas con el control de la viscosidad deseable, la pérdida de filtrado, la inhibición, la corrosión y de la solubilidad de los dispersantes orgánicos. Sin embargo, esta situación rara vez ocurre en los lodos. Por lo tanto, la química de los lodos resulta más complicada. La base para una comprensión completa de los problemas relacionados con los lodos depende principalmente de nuestra comprensión de su química. Esta química se hace considerablemente compleja debido a la interacción y reacción de varios iones con los sólidos. Así la simple química de la fase acuosa no es capaz de darnos una predicción correcta del comportamiento iónico en los sistemas de lodo. Para comprender la química del agua, es necesario considerar la estructura atómica antes de intentar ninguna otra cosa. Partiendo de este hecho analizaremos las propiedades químicas de un fluido de perforación. Al filtrado del fluido de perforación se le realizan algunos análisis químicos para determinar la presencia de contaminantes, tales como calcio, magnesio, cloruros, carbonatos, bicarbonatos, etc. Los mismos análisis pueden efectuarse a las aguas que se utilizan en la preparación y mantenimiento del fluido, puesto que algunas formaciones contienen sales disueltas que afectan materialmente al tratamiento del mismo. A continuación se describen las principales propiedades químicas de los fluidos.

**2.1.3.1 Alcalinidad.** La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que puede neutralizar ácidos. Con los datos obtenidos de la prueba de alcalinidad se puede estimar la concentración de iones Hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), presentes en el fluido. Es importante conocerla para asegurar un control adecuado de la química de los fluidos de perforación. Aditivos del fluido, en particular algunos desfloculantes requieren de un ambiente alcalino para funcionar correctamente. La alcalinidad debido a los iones hidroxilos se acepta como beneficiosa mientras los resultantes de bicarbonatos y/o carbonatos pueden causar efectos negativos sobre el rendimiento del fluido.

### Alcalinidad del filtrado Pf

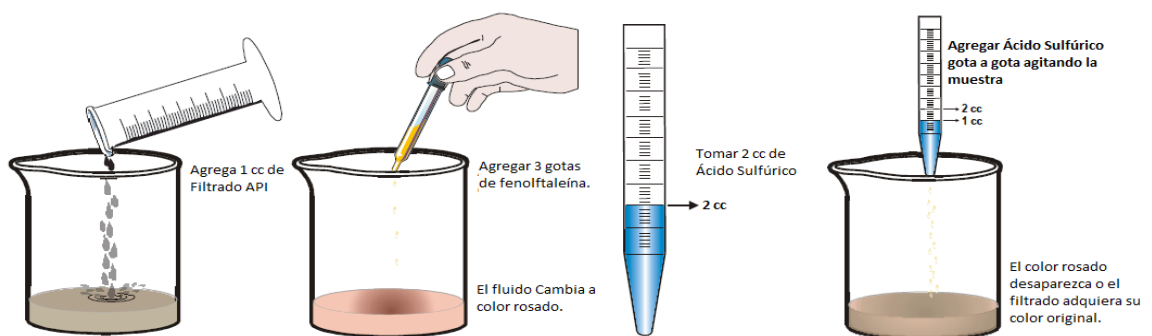
Determinar la alcalinidad del filtrado con fenolftaleína, con la finalidad de identificar los iones contaminantes, como  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , que afectan la estabilidad del hoyo. La comparación entre los valores de alcalinidad, Pf y Mf, permite visualizar problemas de contaminación en el fluido.

Materiales:

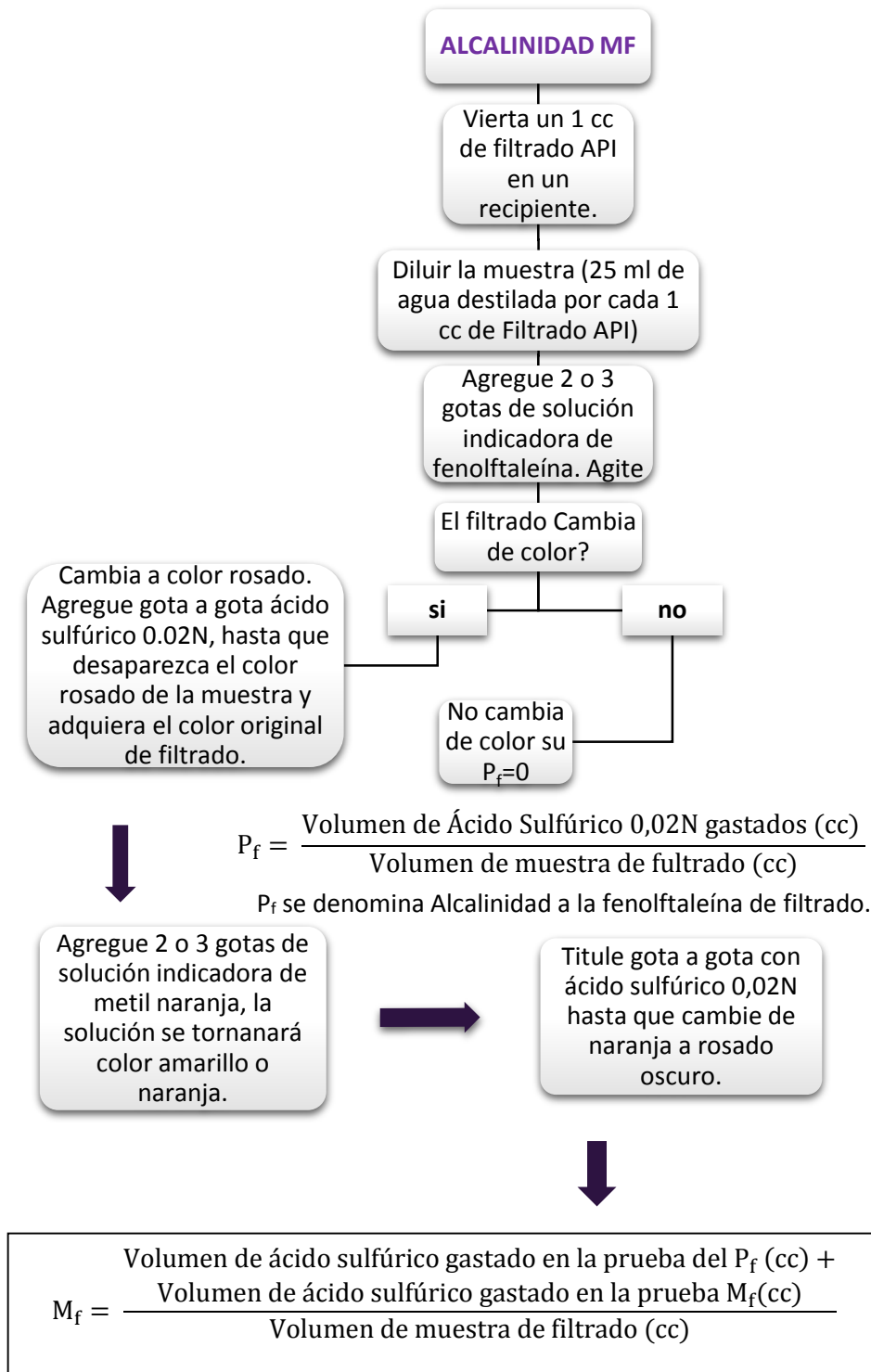
- Fenolftaleína
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) o Nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) de una solución normalizada (0.02N)
- Pipeta de 1 y 10 cc
- pH-metro (opcional)
- Solución indicadora de naranjado de metilo.

**Procedimiento:**

**Figura 27.**Alcalinidad



**Figura 28.**Proceso para Hallar la Alcalinidad Mf de un Fluido.



La prueba de alcalinidad del filtrado ( $P_f/M_f$ ) se realiza principalmente en lodos con tratamiento químico bajo. La relación entre el  $P_f$  y  $M_f$  es un factor importante en la determinación de la fuente de alcalinidad:

**Tabla 6** Fuente de Alcalinidad

$P_f$ Y $M_f$	FUENTE DE ALCALINIDAD	CONDICIONES DEL FLUIDO
$P_f = 0$	Debida a los iones Bicarbonato	Fluido muy inestables y muy difícil de recuperar. Es decir tiene un alto $M_f$ que da lugar a un lodo de altos valores de geles muy difíciles de controlar.
$P_f = M_f$	Debida a los iones Hidroxilo ( $OH^-$ )	Buenas condiciones.
$2P_f > M_f$	Es una mezcla de iones carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ) e hidroxilos ( $OH^-$ )	Buenas condiciones pero puede desestabilizarse.
$2P_f = M_f$	Debida a los iones Carbonatos.	Fluido inestable, pero puede recuperarse.
$2P_f < M_f$	Es una mezcla de iones Carbonato y Bicarbonato.	Fluido Inestable de difícil recuperación.

La concentración de cada ion se expresa en partes por millón (ppm). Según su alcalinidad tenemos:

**Tabla 7** Ppm de cada Ion, según su Alcalinidad

$P_f$ Y $M_f$	Bicarbonato ( $HCO_3^-$ )	Carbonato ( $CO_3^{2-}$ )	Hidroxilo ( $OH^-$ )
$P_f = 0$	$1,22 * M_f$	-	-
$P_f = M_f$	-	-	$340 * M_f$
$2P_f > M_f$	-	$1,2 * (M_f - P_f)$	$340 * (2P_f - M_f)$
$2P_f = M_f$	-	$1,2 * P_f$	-
$2P_f < M_f$	$1,22 * (M_f - 2P_f)$	$1,2 * P_f$	-

Una variación en el  $P_f$  indica la presencia de iones hidroxilos, provenientes de sustancias tales como Cal ( $Ca(OH)_2$ ), cemento y soda caustica ( $NaOH$ ). Los iones hidroxilos aumentan el pH; además actuando en presencia de iones como el  $Ca^{++}$  desestabilizan la reología del lodo. La cantidad de iones ( $OH^-$ ) se puede disminuir por dilución.

Altas variaciones en el  $M_f$  indica la presencia de iones carbonato ( $\text{CO}_3^{=}$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) provenientes de tratamientos excesivos con carbonato o bicarbonato de sodio y dióxido de carbono disuelto en las formaciones perforadas o provenientes del aire. Lodos con problemas de este tipo presentan viscosidades y altas resistencias del gel.

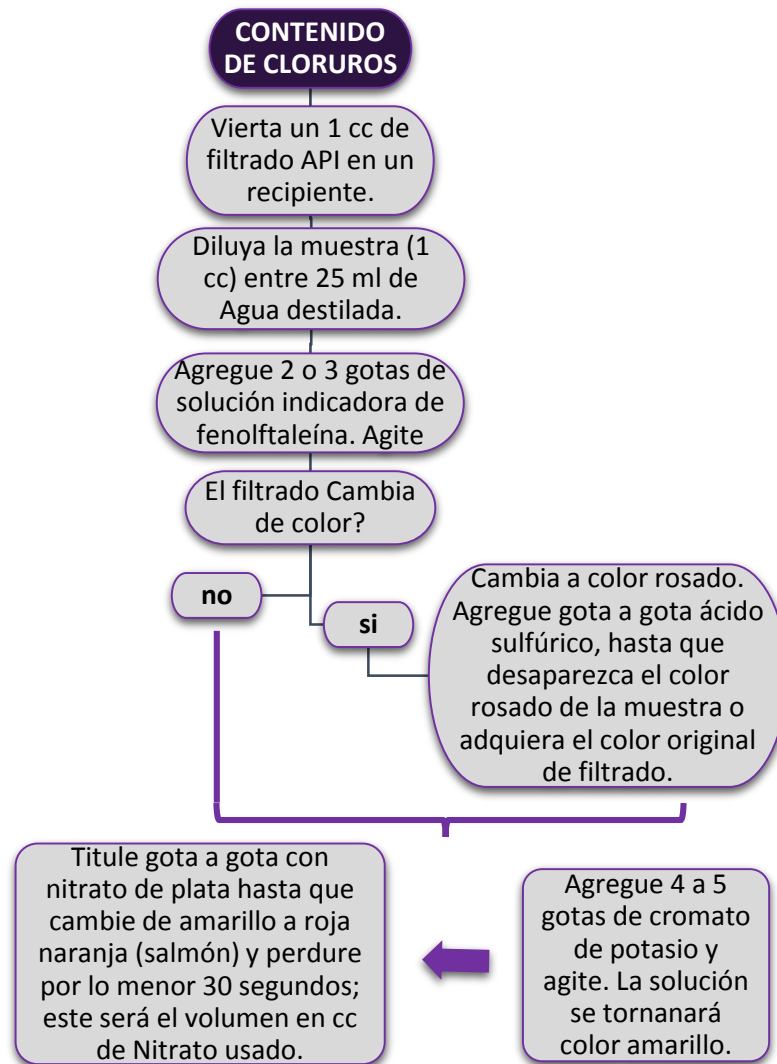
**2.1.3.2 Contenido de Cloruros.** Este análisis es muy importante en áreas donde la sal puede contaminar el fluido. Esto incluye la mayoría de los campos del mundo. La concentración de sales puede provenir de flujos de agua salada, domos salinos e incrustaciones de sal encontradas a lo largo de la operación de perforación. La influencia de los cloruros evidencia uno de los problemas más comunes, la floculación; Jorge E. Bustos y Enoc presentan un resumen de los efectos de cloruros así:

“...Un aumento en la concentración de cloruros indica la presencia de sustancias como el cloruro de sodio o cloruro de calcio, las cuales tienden a aumentar la viscosidad aparente, la pérdida de filtrado, el punto de cedencia y la corrosión; por lo tanto se debe reducir el contenido de cloruros por medio de la dilución. Una variación excesiva en el contenido de cloruros disminuye el pH, originando la disminución del rendimiento de ciertas sustancias; se debe adicionar soda caustica para elevar el pH del lodo a un rango adecuado...”<sup>34</sup>

---

<sup>34</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. 96 p.

**Figura 29.**Proceso para Hallar el contenido de Cloruros.



**Procedimiento:**

Las ppm de cloruro son calculadas a partir de la siguiente educación:

$$\text{ppm Cl}^- = \frac{\text{Volumen de Nitrato de Plata (cc)}}{\text{Volumen de la muestra de filtrado (cc)}} * A \quad (5)$$

Donde:

A → Constante que puede ser 1.000 o 10.000 dependiendo de la concentración de nitrato de plata utilizada.

Nitrato de plata de 0,001g de ion cloruro/cc si el lodo tiene menos de 5000 ppm de cloruro y se multiplica por 1.000. Nitrato de plata de 0,01g de ion cloruro/cc si el lodo tiene más de 5000 ppm de cloruro y se multiplica por 10.000.

$$\text{ppm NaCl} = 1,65 * \text{ppm Cl}^- \quad (6)$$

Es importante limitar los rangos aceptables para los contenidos de cloruros dependiendo del tipo de lodo, en la siguiente tabla los presentamos:

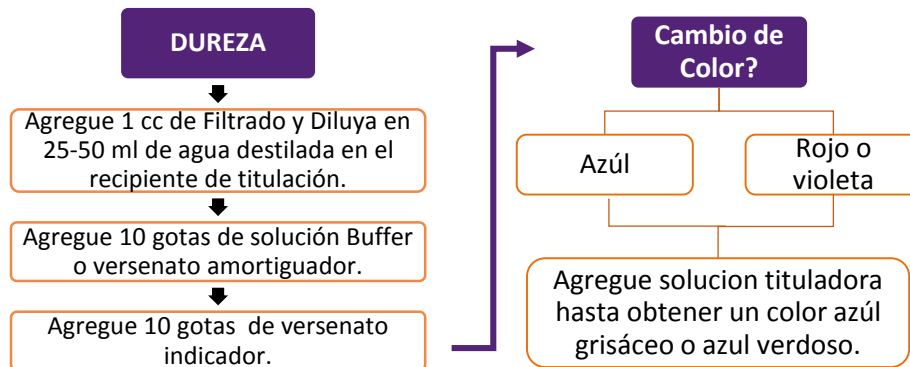
**Tabla 8** Clasificación de Lodos Salados

TIPO DE LODO	RANGO ACEPTABLE
Agua de Mar	12000 – 35000 ppm NaCl
Saturado con Sal	275000 – 312000 ppm NaCl
Agua Dulce	500 – 1000 ppm Cl <sup>-</sup>
Sal – Polímero	150000 – 275000 ppm NaCl

**2.1.3.3 Dureza.** La cantidad de sales disueltas de calcio y magnesio en el agua determinan su dureza. Por ejemplo se dice que el indicador en el hogar de la dureza del agua es determinada por la dificultad para hacer espuma. En muchos campos de petróleo, el agua disponible es bastante dura. Las arcillas de perforación tienen bajos puntos cedentes cuando son mezcladas en agua dura. Cuanto más dura sea el agua, más bentonita será necesaria para obtener un lodo con un esfuerzo de gel satisfactorio. En casos extremos, se ha determinado que es económico tratar el agua químicamente antes de usarla para mezclar el lodo, pero en general esto no resulta económico. Sin embargo, cuando se puede elegir entre dos o más fuentes de agua para el equipo de perforación, se recomienda realizar una simple prueba para seleccionar la más suave de estas fuentes.

**Procedimiento:**

**Figura 30.**Proceso para el cálculo de Dureza.



El volumen de versenato titulador requerido para dosificar el filtrado hasta el punto final se registra para el siguiente cálculo:

$$\text{Ca}^{2+} \text{ [ppm]} = \frac{\text{ml de Versenato titulador} \cdot 400}{\text{ml de muestra}} \quad (7)$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ [ppm]} = \frac{\text{ml de Versenato titulador} \cdot 1000}{\text{ml de muestra}} \quad (8)$$

La concentración de Calcio aceptable en un fluido depende de su tipo, es decir:

**Tabla 9** Clasificación de Lodos con Calcio

TIPO DE LODO	RANGO ACEPTABLE (ppm)
Bentonita y agua	< 40
Lignosulfonato	< 200
Yeso	600-1100
Sal	< 1000
Cal	< 200

Un aumento en el contenido de calcio ocasiona pérdidas de filtrado, aumento de viscosidad Marsh, viscosidad plástica y resistencia al gel, siendo necesario la precipitación de los iones calcio y su remoción. Un aumento en el contenido de calcio de:

- Yeso → Disminuye el pH
- Anhidrita → Disminuye el pH
- Cemento → Aumento del pH
- CaCl<sub>2</sub> → Disminuye el pH

Es importante informar que tal como se establece en las normas API\*, se informa solo el Ion Calcio considerado como el ion fuerte de indicador de dureza, pues los iones de Magnesio en perforaciones continentales inciden poco. En perforaciones costa afuera tanto el ion Calcio como el ion Magnesio son fuertes indicadores de dureza; en este caso es necesario hallar las ppm de calcio por pruebas diferentes a la mencionada.

**2.1.3.4 Determinación del Ion Hidrógeno Ph.** El grado de acidez o alcalinidad del fluido se expresa en términos de pH. Una solución neutra tiene un pH de 7, las alcalinas varían entre 7-14, mientras que las soluciones ácidas fluctúan entre 1-7.

**Método Colorímetro (tiras de papel pH):**

El papel de prueba para pH está saturado con un colorante cuyo color depende del pH de la solución que está siendo probada. La tira de papel está disponible en rangos de 0,5 de unidades de pH. Cada tipo de papel indicador trae una tabla de colores estándar, la cual sirve de referencia al color tomado por la tira de papel pH.

Procedimiento:

- ◆ Tome una muestra de lodo en un recipiente
- ◆ Coloque sobre la superficie del fluido una tira de papel pH de ± 1 pulgada de largo y deje actuar cerca de 1 minuto.
- ◆ Cuando el color se estabilice, compare el color del lado superior del papel con el color en la tabla suministrada de colores estándar y determine el pH.
- ◆ Si la tira de papel está mojada pero no cambió de color, vuelva a verificar usando un rango de papel pH más bajo.
- ◆ Si el color resultante es más oscuro es más oscuro que el color indicado en la tabla de papel pH use un rango más alto.

$$\text{pH} = \text{Log} \left[ \frac{1}{\text{H}^+} \right] = -\text{Log}[\text{H}^+] \quad (9)$$

Donde:

$[\text{H}^+]$  → Representan la concentración de iones de hidrógeno en moles por litro.

Para el agua pura,  $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1,0 \cdot 10^{-7}$ , y el pH es igual a 7. En muchas soluciones acuosas el producto  $[\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-]$  permanece constante, un incremento en  $[\text{H}^+]$  requiere de un correspondiente decrecimiento de  $[\text{OH}^-]$ .

El pH de los fluidos afecta la interacción de las arcillas, la solubilidad de varios productos y sustancias químicas, la eficacia de los aditivos, la corrosión y las propiedades reológicas de los lodos. Un aumento por ejemplo del pH puede ser ocasionado por contaminación con cemento, cal o adiciones no controladas de soda caustica. Por otro lado pH elevados originan una dispersión rápida de las arcillas ocasionando derrumbes y daños a la formación. La otra cara es

la disminución del pH que es causada generalmente por una contaminación con sal, para ellos es necesario el uso de dispersantes. En la siguiente tabla (10)<sup>35</sup> presentamos los rangos recomendados de pH para varios tipos de lodos:

**Tabla 10** Clasificación de los lodos respecto al pH

TIPO DE LODO	RANGO ACEPTABLE (PH)
Bentonita y Agua	8-9
Lignosulfonato	9,5-10,5
Cal	12-14
KCl	7-10
Sal	10,5-11,5
Polímeros	Generalmente 9

**Observaciones:** Este método no se debe emplear si hay cloruros presentes en concentraciones superiores a 10000 ppm, pues arroja valores de pH erróneos.

---

<sup>35</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. P. 80.

### **2.1.4 Laboratorio 1.**

#### **ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA**

El agua que se va a usar en la preparación de los fluidos de perforación proviene de fuentes cercanas subterráneas o superficiales. No conocemos sus propiedades y la compatibilidad que pueda tener con los aditivos del lodo. Por otro lado la contaminación que se puede generar por el contenido de agua de las formaciones que se están perforando en las cuales es común encontrar sales ionizadas. De ahí la necesidad de realizar un análisis químico para caracterizar el fluido para prevenir la presencia de contaminantes tales como el calcio, magnesio, cloruros, carbonatos, bicarbonatos, etc. Esta prueba también tiene otro fin agregado especialmente del Laboratorio de Lodos y Cementos que consiste en familiarizar al estudiante con el equipo del mismo.

#### **1) Objetivos**

- Analizar las características químicas del agua tales como: Dureza, Cloruros, Alcalinidad y pH.
- Estudiar cómo se afectan las propiedades químicas del agua al agregarle diferentes sustancias.

#### **2) Temas de Investigación**

- Efectos del Calcio en el agua y los fluidos de perforación.
- Floculación.
- Amagos de Reventón causados afectos de propiedades químicas.
- Influencia de las propiedades químicas en la estabilidad de las paredes del hueco de perforación.
- Gases Ácidos

#### **3) Material y Equipo Utilizado**

- Termómetro
- Soluciones amortiguadoras de pH (pH 7 y pH 10)
- Agua destilada
- Recipiente de Titulación

- Solución indicadora de Fenolftaleína
- Solución de Ácido Sulfúrico 0,02N (N/50).
- Solución indicadora de Naranja de Metilo.
- Solución indicadora de Cromato de Potasio.
- Solución de Nitrato de Plata 0,0282N o solución de Nitrato de Plata 0,282N.
- Solución tituladora de dureza total (THTS) en concentraciones de 2, 20, 200 epm.
- Solución Versenato compensadora de dureza.
- Solución Versenato indicadora de dureza

#### 4) Procedimiento experimental

Preparar las siguientes muestras y tomar las siguientes propiedades: pH,  $P_f$ ,  $M_f$ , ppm NaCl (sal), ppm  $Ca^{++}$ , ppm  $CaCO_3$ .

- Agua de Tubo Común
- 1 Bb eq de agua + 10 Lpb de Sal
- 1 Bb eq de agua + 20 Lpb de Sal
- 1 Bb eq de agua + 3 Lpb de Cal
- 1 Bb eq de agua + 1 Lpb de Cloruro de Calcio  $CaCl_2$
- 1 Bb eq de agua + 5 Lpb de Cloruro de Calcio  $CaCl_2$
- 1 Bb eq de agua + 0,5 Lpb de Hidróxido de Sodio NaOH
- 1 Bb eq de agua + 0,8 Lpb de Hidróxido de Sodio NaOH

#### 5) Tabulación de Datos

**Tabla 11** Laboratorio 1: Análisis Químico del Agua

Muestra	pH	$P_f$	$M_f$	Ppm $Cl^-$	Ppm NaCl	Ppm $Ca^{++}$	Ppm $CaCO_3$
A							
B							
C							
D							
E							
F							
G							
H							

## 6) Cuestionario

- A. De las siguientes arcillas; caolinitas, vermiculitas, illitas y montmorillonitas, ¿Cuál posee mayor capacidad de intercambio catiónico? y ¿cuál es la de menor capacidad de intercambio?
- B. ¿Qué significan los términos alcalinidad y acidez?
- C. Señala qué indicadores ácido-base se utilizan en la medida de la alcalinidad e indique el nombre de cada uno de ellos.
- D. ¿Por qué agregamos fenolftaleína en el proceso de hallar Alcalinidad y Cloruros?
- E. El influjo de fase agua del fluido en la arcilla no es beneficiosa. ¿Cómo se puede controlar el flujo de agua en la arcilla?
- F. Demuestre que un barril equivalente de petróleo es 350 ml.

## 2.2 REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

El flujo de fluidos a través de conductos circulares y espacios anulares, es uno de los aspectos comúnmente encontrados en la industria. En la perforación por ejemplo, es de vital importancia el control de las propiedades de flujo del lodo. Estas propiedades reológicas deberán ser bien definidas, a fin de diseñar adecuadamente los requerimientos de potencia necesaria para circularlos con un rendimiento óptimo y tener control de varios aspectos importantes para operar exitosamente un pozo, incluyendo:

- A. Proporcionar el control de las presiones para impedir el influjo del fluido de la formación.
- B. Transmitir energía a la barrena para maximizar la Velocidad de Penetración (ROP).
- C. Proporcionar la estabilidad del pozo a través de las zonas presurizadas o sometidas a esfuerzos mecánicos.
- D. Suspender los recortes y el material densificante durante los periodos estáticos.
- E. Permitir la separación de los sólidos perforados y el gas en la superficie.
- F. Extraer los recortes del pozo.

En la siguiente tabla<sup>36</sup> se presenta un resumen del efecto cualitativo de la reología sobre ciertos parámetros de perforación:

**Tabla 12** Efecto de la Reología sobre los Parámetros de Perforación.

PARÁMETROS	LO FAVORECE
Pérdida por fricción en el anular	Bajas Viscosidades
Pérdidas por fricción en la sarta y la broca	Poco efecto debido al régimen turbulento
Suabeo y Surgencia	Baja viscosidad y Gel
ROP (Tasa de Penetración)	Baja Viscosidad
Eficiencia y Limpieza	Incrementar la Viscosidad
Suspensión de sólidos y finos bajo condiciones estáticas.	Incrementar Gel

**Fuente:** MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación

<sup>36</sup> MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación. Trabajo de Grado para optar título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Químicas, 1992. 14 p.

**Reología:** “Es el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento y la deformación de la materia cuando es sometida a esfuerzos externos, esto es, estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en materiales que son capaces de fluir; definiendo como flujo la deformación continua generada por la aplicación de una fuerza tangencial”<sup>37</sup>.

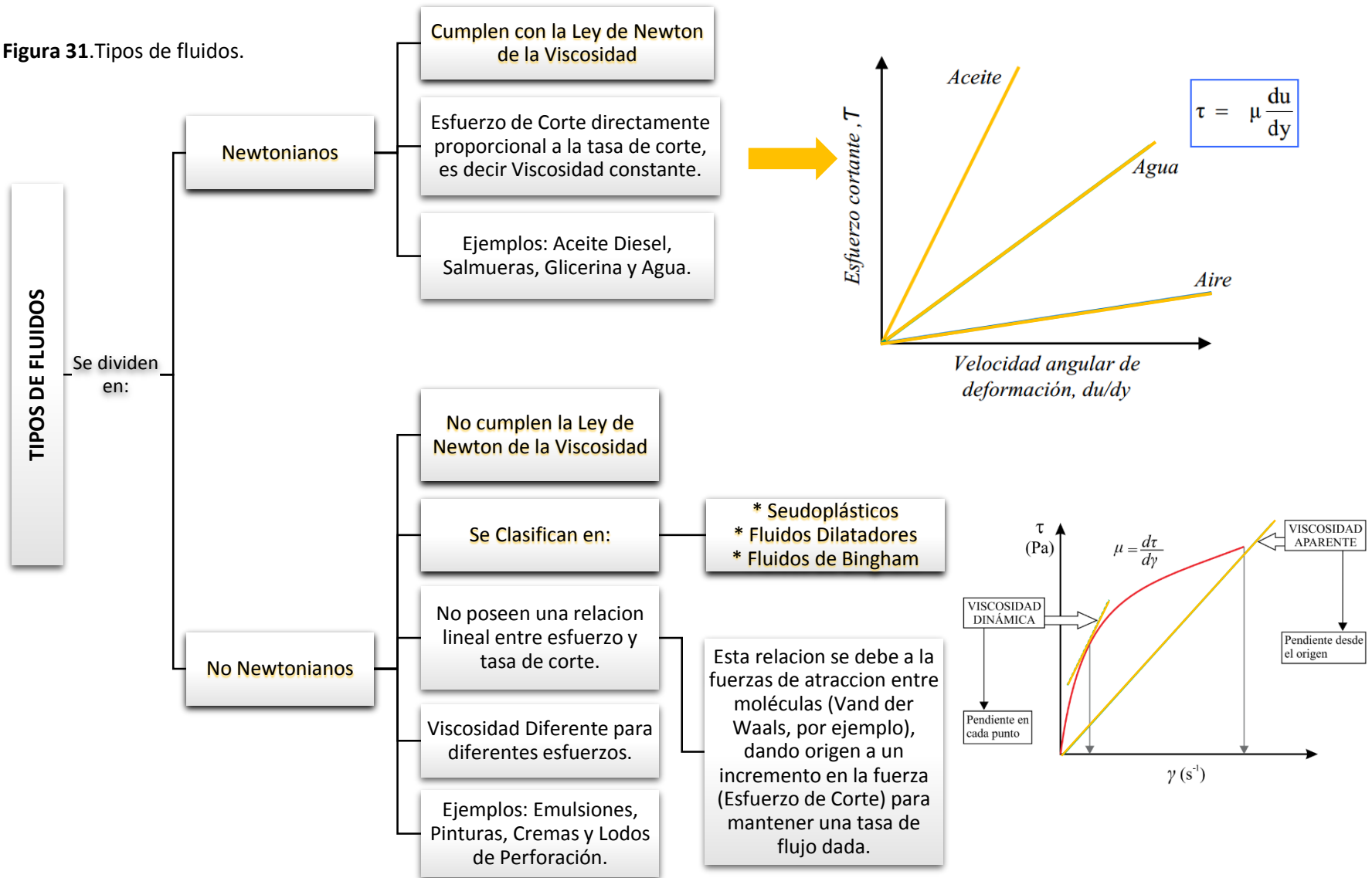
La reología de un fluido usualmente se describe por su viscosidad y fuerza de gel. La viscosidad es una medida de la resistencia de los fluidos a fluir y por lo tanto la cuantificación de este parámetro es de gran importancia para predecir o estimar las pérdidas de presión en las diferentes partes de un sistema de circulación del lodo, los cuales a su vez son importantes parámetros en el diseño de una óptima hidráulica de la broca y en el cálculo de las densidades equivalentes de circulación.

**2.2.1 Tipos de Fluidos.** Con base en la relación existente entre esfuerzo de corte y tasa de corte los fluidos se pueden clasificar como Newtonianos y No Newtonianos. El siguiente gráfico presenta a modo de resumen las características de dichos fluidos.

---

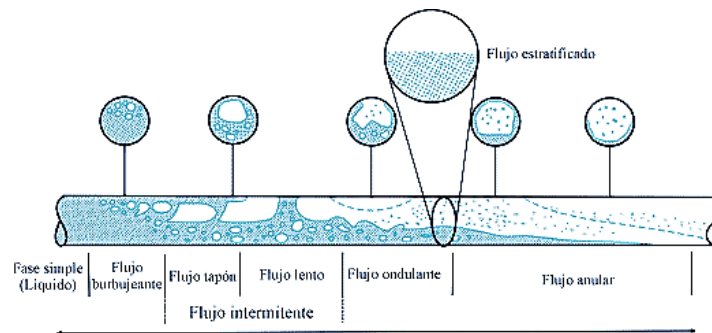
<sup>37</sup> BEDOYA M. María Isabel y CARDONA L. Natalia. Estudio comparativo de modelos reológicos para lodos de perforación. Medellín, 2009. Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de procesos y Energía.

Figura 31. Tipos de fluidos.



**2.2.2 Regímenes de flujo.** A medida que se incrementan los niveles de esfuerzo aplicados sobre un fluido para hacer que fluya, el perfil de velocidad del fluido puede cambiar, por lo cual el régimen de flujo del fluido cambia. Se puede distinguir entonces el flujo tapón, el flujo laminar, el flujo turbulento y el flujo transicional. Por lo tanto para realizar un análisis del comportamiento de los fluidos, se han establecido unos patrones o regímenes de flujo que dependen de la velocidad del fluido y de las propiedades del mismo.

**Figura 32.** Patrones de flujo en tubos Horizontales

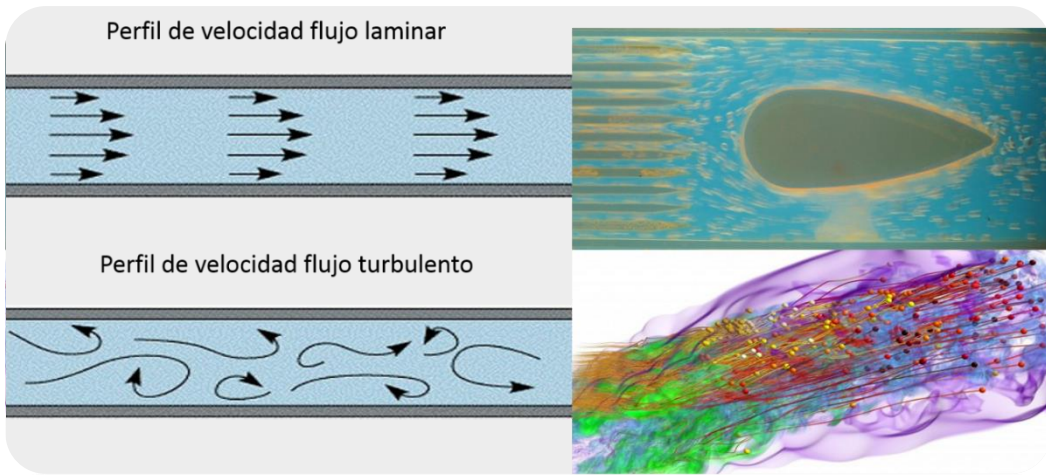


**Fuente:** Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, México<sup>38</sup>

El perfil de velocidad se basa en que las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas. Esto se explica por los efectos que la resistencia cortante del fluido en movimiento tiene en distintos puntos. La siguiente imagen muestra las velocidades en diferentes patrones de flujo.

<sup>38</sup> TORRES Alejandro, LUGO Raúl, ZAMORA Juan M. y GUTIÉRREZ Javier. Análisis térmico de un tubo absorbedor compuesto. México. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.

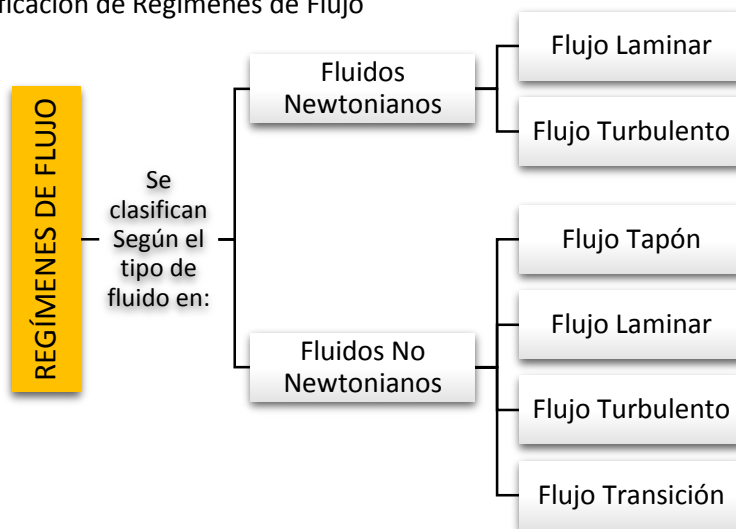
**Figura 33.** Perfil de velocidad en cada patrón de flujo



**Fuente:** Manual de hidráulica PDVSA-CIED

De forma muy importante se debe notar que existe un régimen de transición entre el flujo laminar y el turbulento, para el cual no se han desarrollado ecuaciones para aproximar el comportamiento real del fluido. Normalmente a este régimen se le considera dentro del régimen turbulento.

**Figura 34** Clasificación de Regímenes de Flujo



**2.2.2.1 Flujo laminar.** Tiene lugar entre bajas y moderadas velocidades de corte cuando las capas de fluido pasan unas junto a las otras en forma ordenada. Este movimiento es paralelo a las paredes del cauce a través del cual se mueve el fluido. La fricción entre el fluido y las paredes del canal es menor en este tipo de flujo. Los parámetros reológicos del lodo son importantes para el cálculo de las pérdidas de presión por fricción en lodos de flujo laminar.

**2.2.2.2 Flujo turbulento.** El flujo turbulento ocurre a altas velocidades del fluido y se caracteriza por un movimiento en remolino y al azar de las partículas de fluido. La fricción entre el fluido y las paredes del canal es mayor para este tipo de flujo. La resistencia a fluir de un flujo turbulento es más grande debido al incremento de la fricción relacionada con el movimiento desordenado y al azar, por lo cual el gradiente de presión de un fluido en flujo turbulento es mayor que un fluido a condiciones de flujo laminar.

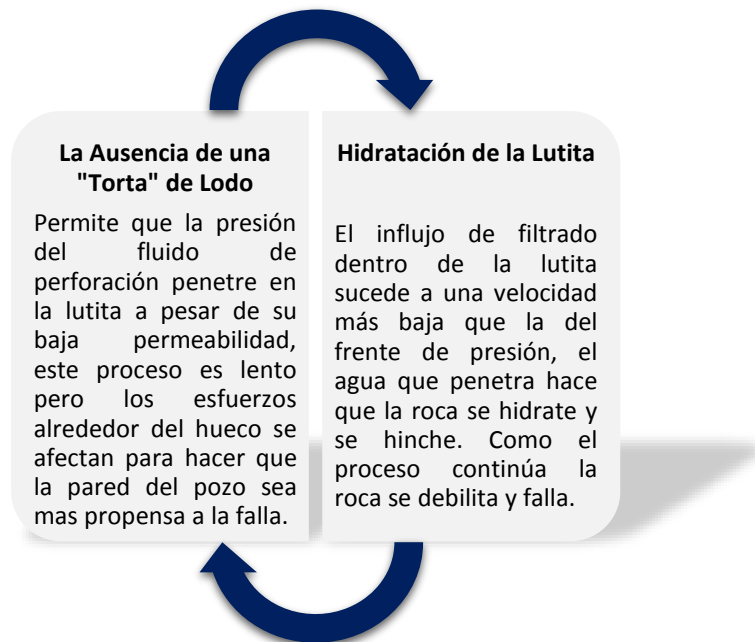
Los parámetros reológicos no son de gran significado en el cálculo de las pérdidas de presión por fricción para lodos en estado turbulento.

**2.2.2.3 Flujo de transición.** El flujo transicional tiene lugar inmediatamente después que las condiciones de flujo se han modificado y antes que las nuevas y permanentes condiciones de flujo se hayan establecido. Esta condición puede ocurrir por ejemplo, en el momento en que el fluido se pone en circulación, cuando cambia la tasa de flujo, cuando el área transversal al flujo se incrementa o disminuye, etc.

**2.2.2.4 Flujo Tapón.** Las fuerzas físico-químicas interactivas entre coloides, gotas de emulsión y otras partículas en el lodo crean resistencia a fluir; por lo cual, al aplicar una fuerza sobre el fluido este no empezará a fluir inmediatamente. El valor de esta fuerza para establecer el movimiento se denomina Yield Point ("True Yield Value"). Cuando se excede este valor el fluido empezará a moverse como un sÍdo (flujo tapón). Este tapón es lubricado por una delgada capa de fluido adyacente a la pared de la tubería.

**2.2.3 Estabilidad de pozo.** Es sumamente importante que el ingeniero de fluidos de perforación entienda la inestabilidad de las lutitas y del pozo para poder evaluar hábilmente una situación y de esta forma poner en marcha un plan estratégico de remediación. Se requiere de un enfoque sistemático que integre varias disciplinas para evaluar y rectificar la estabilidad de pozo. Es decir que la pericia de un ingeniero de lodos no se limita a los fluidos de perforación; se requiere un buen conocimiento práctico de todos los aspectos de la operación, así como antecedentes básicos de geofísica y mecánica, además de conocer la química de las arcillas y el agua de formación. Varias causas posibles deben ser evaluadas para resolver la inestabilidad del pozo.

**Figura 35** Causas de Inestabilidad del Hueco en las Lutitas



La lutita es inestable cuando es alterada de cualquier manera, ya sea por hidratación o deshidratación. Es importante impedir la transferencia del agua entre el fluido de perforación y la lutita para impedir su desestabilización. Hay dos causas principales que originan la inestabilidad de la pared del hueco en las zonas de lutitas:

El proceso de hidratación e hinchamiento de la lutita puede ser controlado mediante la composición del lodo. El grado de hidratación e hinchamiento, está fuertemente influenciado por la concentración y tipo de iones que interaccionan con las arcillas que constituyen las lutitas. Las condiciones de falla y el tipo de falla del hueco están determinadas por:

- A. La litología y composición de las lutitas.
- B. La composición del lodo.
- C. Condiciones operacionales (propiedades del lodo, profundidad, velocidad de circulación, desviación del hueco y la distribución de esfuerzos).

Los lodos base aceite y sintéticos son muy eficaces para estabilizar los pozos perforados en lutitas sensibles al agua. Primero estos lodos humectan la formación con aceite o sintético alejándola así de cualquier contacto indeseado con agua. En segundo lugar, estos lodos suelen incorporar salmuera de cloruro de calcio emulsionada de baja actividad para lograr una actividad balanceada. Estos sistemas no acuosos no penetran tan fácilmente en la red de garganta de poro de la lutita como los fluidos base agua, debido a la tensión superficial de la lutita humectada por agua.

Únicamente las sales disueltas en el lodo, tales como las sales de Potasio, Sodio y Magnesio, pueden inhibir el hinchamiento de las arcillas presentes en las lutitas. La eficiencia para inhibir, se guía por la serie liotrópica de los cationes que forman dichas sales, ( $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{H}^+$ ).

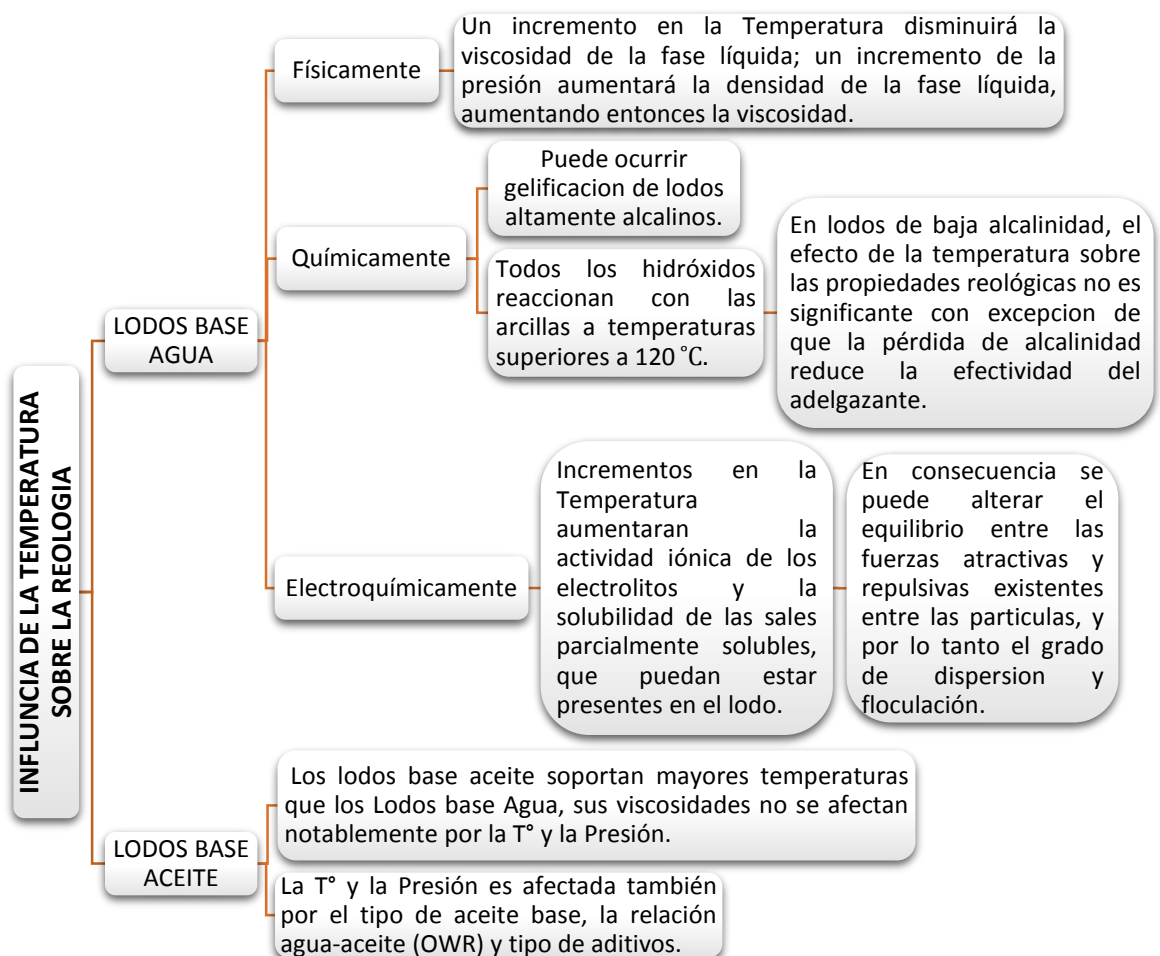
La capacidad de las arcillas para intercambiar iones, permite que la presencia de sales disminuya la tendencia al hinchamiento de las mismas. Sin embargo, ningún inhibidor puede evitar en un 100% la hidratación de las partículas, y por tanto no son siempre solución a los problemas. De las sales comunes, el cloruro de potasio es el inhibidor más efectivo, los cloruros de sodio y magnesio son menos efectivos aún a altas concentraciones.

Las sales y compuestos como la cal, el yeso y el lignosulfato, que permiten que el lodo se sature con concentraciones bajas son virtualmente no inhibidores del hinchamiento de las arcillas, es decir que los lodos base yeso, cal o lignosulfatos no son inhibidores, lo cual contrasta con los dichos comunes. La interacción entre las partículas suspendidas de arcilla, puede ser alterada significativamente por concentraciones bajas de cationes, lo cual imparte cambios significativos en las propiedades del lodo. Aparentemente esta alta tolerancia de los fluidos saturados de iones (lodos base yeso, cal, lignosulfatos) hacia los sólidos arcillosos se asocia con inhibición. El motivo del desacuerdo radica en los diferentes usos que se le dan a la palabra inhibidor. Las interacciones físicas también pueden causar inestabilidad del pozo. Estas incluyen la erosión, la cual causa el ensanchamiento del pozo, la humectación a lo largo de las fracturas preexistentes y la invasión del fluido que causa transmisión de la presión.

Un pozo es más estable cuando hay suficiente presión hidrostática para que el sobre balance siga actuando exactamente sobre el frente del pozo y cuando el esfuerzo máximo sobre el pozo es inferior a la resistencia de la formación.

**2.2.4 Influencia de la temperatura.** Cuando el lodo es circulado ocurren cambios en la temperatura de la pared del pozo (enfriamiento), debido a que la formación es contactada con un lodo a una temperatura menor al de la formación. Las fluctuaciones de la temperatura también ocurrirán cuando la circulación es parada o disminuida. Este problema no es común, pero debería ser considerado al evaluar la rotura del pozo en pozos de alta temperatura pues las condiciones del pozo pueden ser muy diferentes de las medidas a temperatura y presión ambiente. Con el fin de optimizar los cálculos hidráulicos y de densidad equivalente de circulación, es necesario conocer el efecto de la temperatura y la presión sobre la reología del lodo en particular bajo estudio.

**Figura 36** Influencia de la Temperatura sobre la Reología



**2.2.5 Ecuaciones de flujo.** Los fluidos en flujo laminar se comportan de manera distinta que los fluidos en flujo turbulento. Estas diferencias requieren el uso de diferentes ecuaciones para determinar las pérdidas de presión en los fluidos laminares y turbulentos, estas son necesarias para calcular las pérdidas de presión en el espacio anular y la columna de perforación, debido a las diferentes geometrías.

La primera etapa en los cálculos consiste en determinar la etapa de flujo que está ocurriendo en cada intervalo geométrico del pozo. La velocidad del fluido en cada uno de estos intervalos puede ser determinada como se indica a continuación.

**2.2.5.1 Velocidad media de propagación en el medio.** API se refiere a la velocidad en el espacio anular o en la tubería, como la velocidad de propagación en el medio. Esto supone que la totalidad del fluido está fluyendo a la misma velocidad con un perfil plano y sin diferencias instantáneas de velocidad que se producen en el flujo turbulento, se trata básicamente de velocidad media.

La velocidad media de propagación en la tubería ( $V_p$ ):

$$V_p = \frac{24,48 \times Q}{D^2} \quad (10)$$

La velocidad media en el espacio anular ( $V_a$ ) es:

$$V_a = \frac{24,48 \times Q}{(D_2^2 - D_1^2)} \quad (11)$$

V → velocidad (pies/min)

Q → razón de flujo (gpm)

D → diámetro (pulgadas)

**2.2.5.2 Número de Reynolds.** El número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) es un número adimensional utilizado para determinar si un fluido está en estado laminar o turbulento. Según API un numero de Reynolds igual o inferior a 2100 indica un flujo laminar mientras que uno mayor indica flujo turbulento.

Se puede describir la formula general para el número de Reynolds como:

$$N_{Re} = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (12)$$

V → velocidad

D → diámetro

$\rho$  → Densidad

$\mu$  → Viscosidad

El número de Reynolds para dentro de la tubería es:

$$N_{Rep} = \frac{15,467 \times V_p D \rho}{\mu_{ep}} \quad (13)$$

El número de Reynolds para el espacio anular es:

$$N_{Rea} = \frac{15,467 V_a (D_2 - D_1) \rho}{\mu_{ea}} \quad (14)$$

D → Diámetro interior de la tubería de perforación o los portamechas

$D_2$  → Diámetro interior del pozo o de la tubería de revestimiento

$D_1$  → Diámetro exterior de la tubería de perforación o los portamechas

$\mu_{ep}$  → Viscosidad efectiva (cP) de la tubería.

$\mu_{ea}$  → Viscosidad efectiva (cP) del espacio anular.

**2.2.5.3 Peso equivalente del fluido de lodo.** Es el total de todas las presiones (presión hidrostática, presión circulante y presión impuesta) ejercidas sobre la formación a una profundidad dada, expresada en términos de fluido,  $lb_m/gal$ ,  $P_s$  es la presión total en la fuente e incluye las presiones circulante e impuesta.

$$EMW = \frac{P_s}{0.052 \times TVD} + MW_1 \quad (15)$$

EMW (Equivalent Mud Weight)

$MW_1$  → Densidad del fluido,  $lbm/gal$

**2.2.6 Propiedades Físicas del Lodo -Reológicas.** 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 son la viscosidad y la resistencia del gel. Medir las propiedades reológicas de un lodo es importante en el cálculo de:

- A. Las pérdidas de presión por fricción.
- B. Para determinar la capacidad del lodo para elevar los recortes y desprendimientos a la superficie.
- C. Para analizar la contaminación del fluido por sólidos, sustancias químicas y temperatura.
- D. Para determinar los cambios de presión en el interior del pozo durante un viaje.

**2.2.6.1 Densidad.** La densidad o peso del lodo es la propiedad más crítica de cualquier fluido de perforación o completación ya con ella se provee el control primario del pozo. La densidad del lodo define la capacidad de este para ejercer una contrapresión en las paredes de la perforación (hueco), controlando las presiones litostática e hidrostática existentes en las formaciones perforadas.

La densidad del fluido de perforación debe ser ajustada de modo que la presión hidrostática de su columna dentro del pozo sea suficiente para equilibrar la presión de las formaciones expuestas y permita un margen de seguridad de 200 psi a 300 psi. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que si el sobre balance es excesivo podría ocurrir atrapamiento diferencial, daño de formación (invasión excesiva de fluido) o fractura hidráulica (provocando pérdidas de fluido). También durante la perforación puede haber cambios de la densidad:

- **Incremento de Densidad**



La densidad del lodo se incrementa normalmente con la adición de más agente densificante. Las salmueras de varios tipos y densidades tienden a estar mezcladas en salmuera unificada para evitar inventarios excesivos de sal en sacos en la locación y para reducir labores de mezclado en el equipo. Sin embargo, se debe tener cuidado que la mezcla se mantenga en solución a las temperaturas esperadas del ambiente, en el conductor submarino o en el fondo del agujero.

- **Reducción de Densidad:**



Una reducción de la densidad del lodo se puede lograr por dilución o por remoción mecánica del agente densificante o de los sólidos contaminantes.

La remoción mecánica se logra con el uso de un equipo de control de sólidos eficiente como la centrifuga de decantación que es por lo general, el método preferido.

La dilución es también una manera eficiente de reducir la densidad del fluido de perforación. Aunque con ello se pueden afectar fácilmente otras propiedades del fluido. Con salmueras cualquier dilución deberá hacerse con agua fresca y no con agua de mar con el fin de evitar problemas potenciales.

Los agentes densificantes típicos incluyen los minerales Barita (SG 4.2), Dolomita (SG 2.8) y sales individuales para la formulación de una salmuera particular.

**Tabla 13** Densidades de los agentes densificantes.

AGENTE DENSIFICANTE	PESO MÁXIMO (PPG)	PESO MÁXIMO (SG)
Barita	19.5	2.34
Dolomita	11.5	1.38
Cloruro de Potasio	9.7	1.16
Cloruro de Sodio	10.0	1.20
Formiato de Sodio	11.1	1.33
Cloruro de Calcio	11.8	1.42
Formiato de Potasio	13.3	1.60
Bromuro de Calcio	15.4	1.85
Formiato de Cesio	19.7	2.30
Bromuro de Zinc	20.5	2.46

**Fuente:** BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico).

- **Calculo de la Densidad del Lodo**

La densidad del lodo se determina utilizando una balanza de lodo. Este instrumento permite mediciones de lodo de suficiente precisión con mediciones con un margen de error de 0,1 lb/gal. La balanza del lodo se compone principalmente de una base sobre la cual descansa un

brazo graduado con un vaso, tapa, punto de apoyo en forma de cuchillo, nivel de burbuja de aire, caballero y contrapeso. La balanza de lodos presenta cuatro escalas de trabajo:

**Figura 37** Balanza de Lodo



Lb/pulg<sup>2</sup>  
Lb/gal  
Lb/ft<sup>3</sup>  
Gravedad Específica

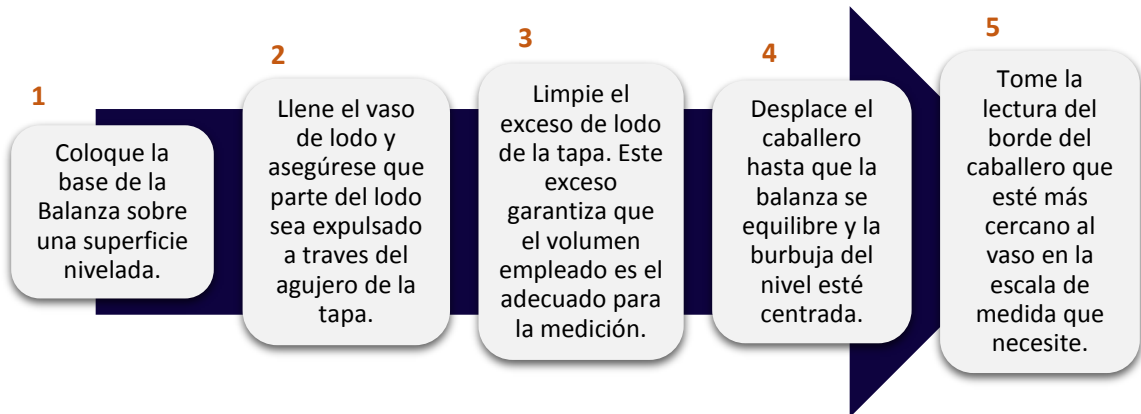
**Fuente:** SMARTdrill Fann

Lo primero que se debe hacer es calibrar la balanza con agua dulce para asegurar su precisión, esto se lleva a cabo así:

- A. Llene el recipiente con agua dulce.
- B. Coloque la tapa del recipiente y verifique que se asiente, el exceso de agua saldrá por el orificio de ventilación de la tapa; limpie el exceso de agua del recipiente.
- C. Ubique la contrabalanza en 8.33 Lb/gal, fije la ranura de la base sobre el punto de apoyo en forma de cuchilla.
- D. La balanza está calibrada si se halla en posición de equilibrio (nivel de burbuja centrado).

Habiendo verificado que el equipo está calibrado correctamente procedo a hacer la medición de la densidad del lodo.

**Figura 38** Procedimiento para Hallar la Densidad



- **Balance de Masa**

El peso de la mezcla es la suma de las gravedades específicas y de los porcentajes en volumen de los materiales que la componen (Barita, Bentonita, Agua, Aceite); esta es la ecuación de equilibrio de masas que es la base de muchas fórmulas de lodos:

$$V_1\rho_1 + V_2\rho_2 = V_f\rho_f \quad (16)$$

Dónde:

$V_1\rho_1$  → Volumen y Densidad del agua o lodo inicial.

$V_2\rho_2$  → Volumen y Densidad del material

$V_3\rho_3$  → Volumen y Densidad del lodo final

**Aumento de Densidad** → De la ecuación de balance de masa (Ec. 16) se obtiene la siguiente ecuación donde el volumen de la Barita está dado en barriles de material seco:

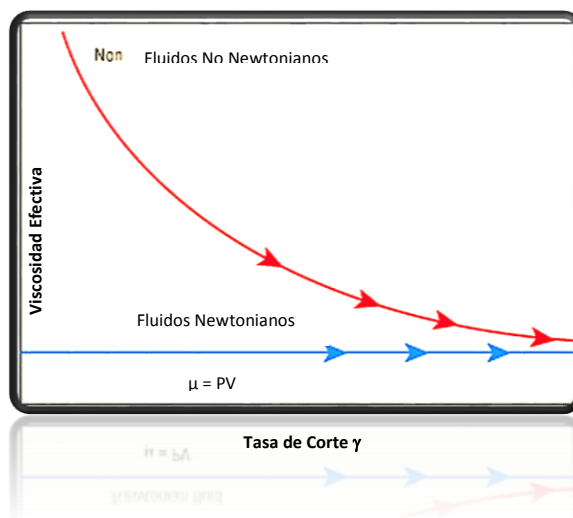
$$V_2 = \frac{V_1 * (\rho_f - \rho_1)}{(\rho_2 - \rho_f)} \quad (17)$$

**Dilución** → Las reducciones de densidad se obtienen normalmente mediante diluciones con agua; de la ecuación de balance de masa (Ec. 16):

$$V_{agua} = \frac{V_1 * (\rho_1 - \rho_f)}{(\rho_f - \rho_{agua})} \quad (18)$$

**2.2.6.2 Viscosidad.** La viscosidad se puede describir como la resistencia interna de un fluido a circular. Es una propiedad importante de los fluidos de perforación. Define la capacidad del lodo de lograr una limpieza útil de perforación, de mantener en suspensión y desalojar los detritos y de facilitar su decantación en las balsas o tamices vibrantes. Como se mencionó antes los fluidos de perforación son fluidos no newtonianos, es decir la viscosidad es función de la Temperatura. En la gráfica se observa como el comportamiento de viscosidad de un fluido newtoniano y uno no newtoniano.

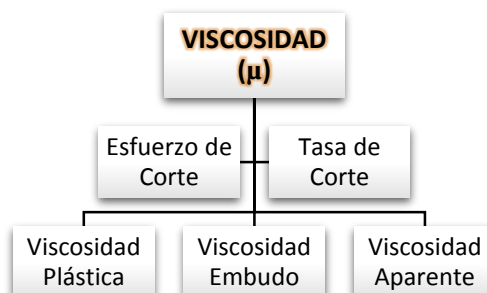
**Figura 39** Comparación de Fluidos no Newtonianos y Newtonianos respecto a la viscosidad Efectiva



Fuente: Oilfield

Cuando un fluido es más viscoso tiene mejor capacidad para suspender los detritos de la roca y transportarlos hacia la superficie. Sin embargo, se necesita más presión para bombearlos por su viscosidad, provocando un desgaste natural adicional del equipo de perforación. Además, los fluidos viscosos tienden a ser más difíciles para separar de los detritos. Por lo tanto, es preciso adoptar, un principio básico: “viscosidad no muy grande para que el lodo sea fácilmente bombeable, pero no tan pequeña que impida al lodo extraer el detritus producido”. En la Figura 69, se observa los factores que afectan la viscosidad. Medimos la viscosidad en varias componentes:

**Figura 40** Componentes y Clasificación de la Viscosidad.



Para una descripción cualitativa de viscosidad dos parámetros físicos deben ser definidos, la Tasa de Corte y el Esfuerzo de Corte.

### **Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ):**

Es la fuerza requerida para superar la resistencia a fluir de un fluido, dividida por el área paralela a la acción de la fuerza.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (19)$$

Donde:

F → Fuerza Aplicada

A → Área sujeta a la fuerza

$\tau$  → Esfuerzo de Corte, (Dimensiones de Presión).

### **Tasa de Corte ( $\gamma$ ):**

Es la velocidad relativa de elementos o capas de fluido, dividida por la distancia que las separa.

Se denomina también Gradiente de Velocidad:

$$\gamma = \frac{dV}{dr} \quad (20)$$

Donde:

dV → Diferencial de Velocidad

dr → Distancia

Una descripción más cuantitativa de la viscosidad, como la resistencia de los fluidos a fluir se da por la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (21)$$

Donde:

$\mu$  → Viscosidad Dinámica

- **Viscosidad de embudo**

Es determinada con el Embudo Marsh, y sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua. Esta viscosidad de embudo (viscosidad Marsh) está dada en segundos por cuarto de galón (s/qt). El agua tiene una viscosidad de embudo o Marsh de 26 s/qt. Se mide como el tiempo requerido para que una muestra de lodo fluya a través de un embudo Marsh.

La rata de flujo del embudo Marsh cambia significativamente durante la medida de la viscosidad de embudo debido a que el nivel de fluido cambia en el embudo. Esto causa que el resultado de la prueba sea menos significativo para los fluidos no Newtonianos, los cuales muestran diferentes viscosidades a diferentes caudales para un tamaño de tubo dado. Desafortunadamente la mayoría de los fluidos de perforación tienen un comportamiento no newtoniano. Así pues, mientras que el viscosímetro de embudo puede detectar una consistencia del fluido de perforación indeseable, pruebas adicionales deben ser hechas antes de que un tratamiento apropiado del lodo pueda ser prescrito.

**Figura 41** Viscosidad de Embudo Marsh



**Fuente:** Schlumberger Oilfield

Además, se le concede cierta importancia práctica aunque carece de base científica, y el único beneficio que aparentemente tiene, es el de suspender el ripio de formación en el espacio anular, cuando el flujo es laminar. Por esta razón, generalmente no se toma en consideración para el análisis riguroso de la tixotropía del fluido. Es recomendable evitar las altas viscosidades y perforar con la viscosidad embudo más baja posible, siempre y cuando, se tengan valores aceptables de fuerzas de gelatinización y un control sobre el filtrado. Tampoco proporciona suficiente información para determinar las propiedades reológicas o las características de flujo de un fluido pues ningún valor en particular de la viscosidad de embudo puede ser adoptado como valor representativo de todos los fluidos. Lo que produce buenos resultados en un área puede fallar en otra; sin embargo, se puede aplicar una regla general a los fluidos de perforación a base de arcilla. Los sistemas de polímeros e inversión inversa (base aceite o base sintético) no siguen necesariamente estas reglas y otra particularidad es que la contaminación al fluido se refleja en un aumento en viscosidad embudo.

### **Medición de Viscosidad de Embudo Marsh**

El embudo posee una capacidad de 1500 cc, tiene un diámetro de 6 pulgadas en la parte superior y una longitud de 12 pulgadas, su diámetro decrece hasta llegar a un tubo de 2 pulgadas de largo y  $\frac{3}{16}$  de pulgada de diámetro interno.

Un tamiz de 10 mesh, se encuentra  $\frac{3}{4}$  de pulgada del borde superior del embudo, colocada de tal modo que solo cubre la mitad de la parte superior, ésta remueve sustancias extrañas y sólidos de gran tamaño.

#### **Procedimiento:**

Manteniendo el embudo en posición vertical, tapar el orificio con un dedo y verter la muestra de lodo recién obtenida a través de la malla dentro de un embudo limpio, hasta que el nivel del fluido llegue a la parte superior de la malla (1500 ml). Retire el dedo del orificio y mida el tiempo requerido para que el lodo llene el vaso receptor hasta el nivel de 1 qt (Indicado en el vaso). Ajuste el resultado al segundo entero más próximo como indicación de viscosidad Marsh.

**Figura 42** Embudo Marsh



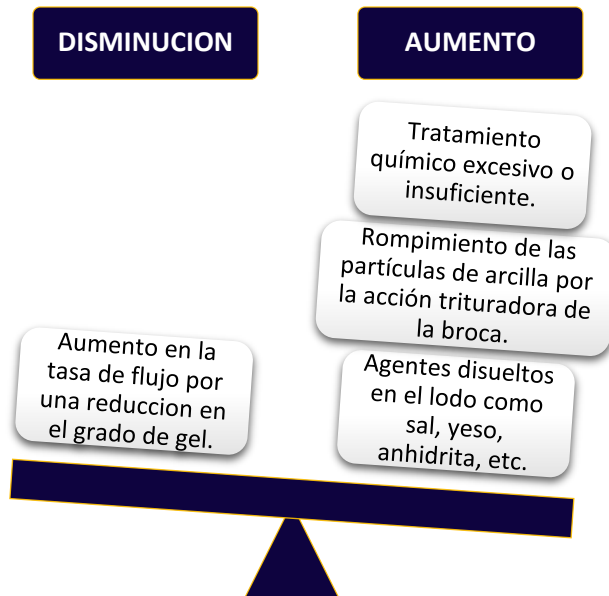
**Fuente:** SMARTdrill Fann

- **Viscosidad Aparente**

Es una medida del esfuerzo de corte y una función de la cantidad de sólidos que componen el fluido de perforación. La viscosidad aparente se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{\theta_{600 \text{ RPM}}}{2} \quad (22)$$

**Figura 43** Viscosidad Aparente: Aumento y Disminución



La viscosidad aparente tiene dos componentes una componente es la viscosidad plástica (resultante del roce mecánico de las diferentes partículas que componen el lodo), la segunda es el Yield Point (resultante de la fuerza de atracción electroquímica).

- **Viscosidad Plástica**

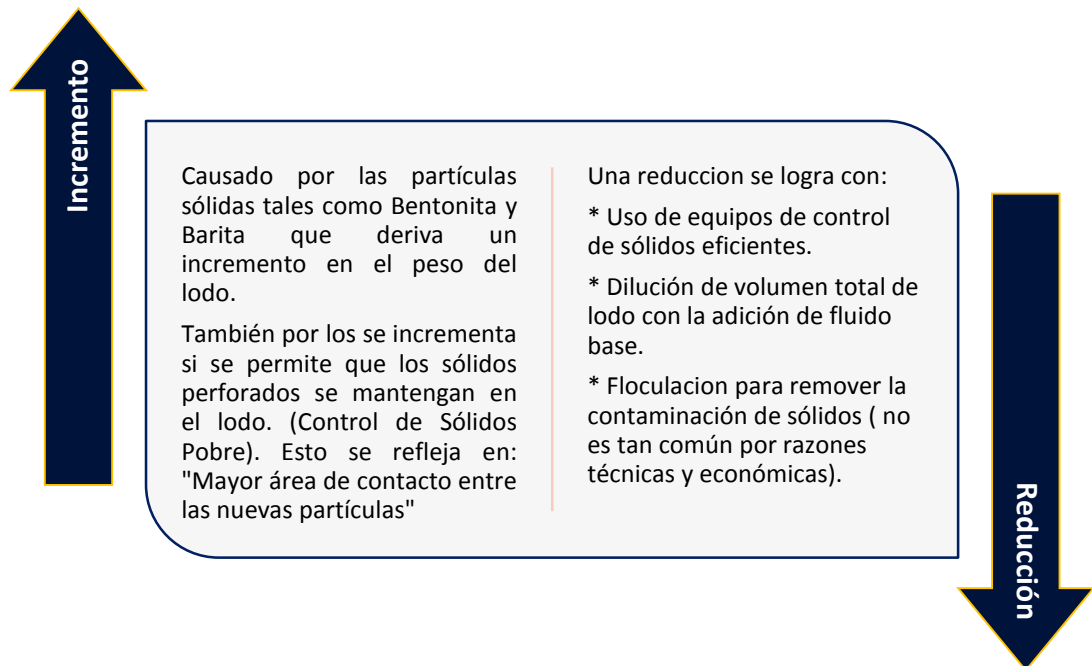
La viscosidad plástica ( $\mu_p$ ) se define como “la resistencia al flujo” debido a fricciones mecánicas entre las partículas sólidas suspendidas en el fluido. La  $\mu_p$  depende principalmente del contenido de sólidos y de la forma y el tamaño de estos sólidos, es decir, como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica.

La viscosidad plástica también es afectada por:

- A. La viscosidad de la fase fluida.
- B. La presencia de algunos polímeros de cadena larga (POLY-PLUS, hidroxietilcelulosa (HEC), POLYPAC, Carboximetilcelulosa (CMC)).
- C. Las relaciones aceite-agua (WOR) o Sintético-Agua (S/A) en los fluidos de emulsión inversa.

La fase sólida es lo que más interesa al ingeniero de fluidos. Un aumento de la viscosidad plástica puede significar un aumento en el porcentaje en volumen de sólidos, una reducción del tamaño de las partículas de los sólidos, un cambio de la forma de las partículas o una combinación de estos efectos. Cualquier aumento del área superficial total de los sólidos expuestos se reflejará en un aumento de la viscosidad plástica. A continuación se presenta los efectos principales de incrementos y reducción de la viscosidad plástica.

**Figura 44** Viscosidad Plástica: Incrementos y Reducción



Para hallarla se hace la lectura en el viscosímetro de Fann a 600 y 300 RPM y se usa la siguiente ecuación dada den Centipoises:

$$\text{Viscosidad Plástica (V}_p\text{)} = \theta_{600 \text{ RPM}} - \theta_{300 \text{ RPM}} \quad (23)$$

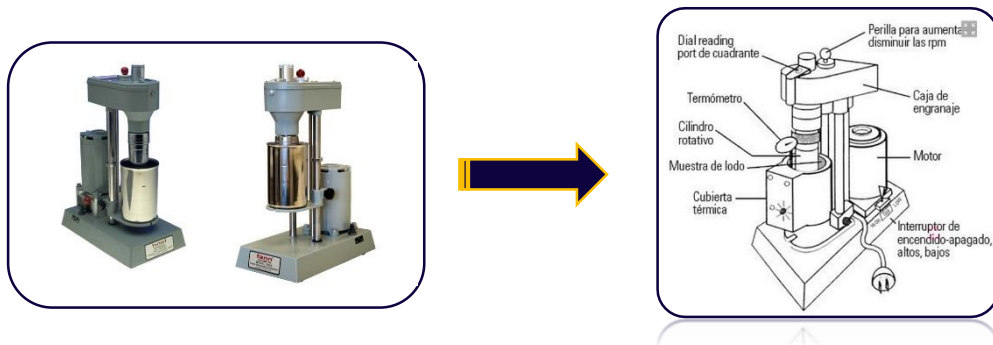
Como regla general, la viscosidad plástica debería ser mantenida al nivel más bajo posible en todos los casos, porque una baja  $V_p$  puede aumentar la energía proporcionada a la broca, mejorar el flujo en el espacio anular para la limpieza del pozo, y reducir el uso y desgaste de los equipos, así como el consumo de combustible. Un límite superior práctico para la viscosidad plástica es el doble del peso del fluido (lb/gal). Aunque este valor parezca restrictivo en lo que se refiere a los altos pesos de fluido, los sólidos se ven tan apretados por el material densificante, que estos fluidos tienen una tolerancia muy baja respecto a los sólidos de

perforación. La viscosidad plástica constituye una buena aproximación de la viscosidad a través de las toberas de la broca.

- **Viscosímetro de Fann para Hallar Viscosidad y Punto de Cedencia**

También llamado Viscosímetro de indicación directa. El viscosímetro de indicación directa es un instrumento compuesto por un cilindro giratorio y una plomada. El nombre 'de indicación directa' refleja el hecho de que la lectura del dial a una velocidad dada es una viscosidad en centipoises verdadera.

**Figura 45** Viscosímetro de Fann



**Fuente:** SMARTdrill Fann

Este es un instrumento de tipo rotativo compuesto por un motor eléctrico accionado por un interruptor con una caja que posee un set de dos cambios de velocidad, alto (High) y bajo (low). Además de una perilla que impone el torque sobre el balancín o cilindro interior para proveer las 600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM estas dos palancas, la de los cambios y la de velocidad no se deben accionar si el equipo no está en movimiento.

El montaje se realiza así: tengo el balancín y la camisa. Tomo firmemente el eje rotor y presiono hacia arriba el balancín sin hacer ningún tipo de torque, hasta sentir que encajó, toco suavemente para verificar que efectivamente quedó bien suspendido. Luego tomo la camisa que tiene un agujero horadado, y el equipo también trae una muesca para que encaje el pin. Procedo a ubicar la camisa de manera que coincidan los círculos, presiono hacia arriba y hago torque a la derecha (esto para que encaje el pin). El vaso del viscosímetro de Fann tiene tres muescas que encajan perfectamente en la base y el subo la base hasta la arandela que me

indica, la distancia que debo subirla. Hecho esto tengo finalizado el montaje y procedo a hacer las mediciones. La lectura de cada medición se realiza en este lente, se debe esperar hasta que se estabilice la aguja para hacer la medición. En este equipo se puede medir: Viscosidad Plástica, Viscosidad Aparente y Punto Cedente. Las ecuaciones correspondientes las encuentran en el manual correspondiente de la herramienta.

#### **Procedimiento:**

Vierta una muestra de lodo en el vaso del viscosímetro hasta el nivel de la línea trazada. Suba la base del vaso del equipo hasta la distancia indicada y ajuste, inicie el equipo, dependiendo de las medidas que se desee tomar, escogemos alto o bajo, las medidas para alto son (600, 200 y 6 RPM) y bajo son (300, 100 y 3 RPM). Para desplazarse a cada una de las RPM mencionadas antes se usa el manguito del rotor que indica arriba (200 y 100 RPM) medio (6 y 3 RPM) y abajo (600 y 300 RPM). Todas las lecturas espero a que se estabilice la aguja y hago la lectura, excepto para el gel inicial o  $\Theta 3$  que debo hacer lo siguiente: gradúo en 600 RPM y lo dejo cerca de 15 segundos, apago el equipo, por otros 15 segundos, enciendo mi equipo nuevamente, acciono el manguito rotor y lo llevo para realizar la lectura de  $\Theta 3$ , espero 10 segundos y llegado los 10 segundos realizo la lectura.

**2.2.6.3 Punto de Cedencia (YP)** El punto de cedencia (YP) es la medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido dinámico. Estas fuerzas son el resultado de la atracción entre las cargas negativas y positivas localizadas en la superficie de las partículas. De esta forma, el punto de cedencia es una medida de estas fuerzas de atracción bajo condiciones de flujo. La magnitud de estas fuerzas depende de:

- Tipo de sólidos, sus cargas superficiales y polaridad eléctrica de sus superficies.
- Cantidad de sólidos presentes.
- Concentración de iones de la fase líquida

En fluidos densificados se requiere un YP moderadamente alto para mantener en suspensión las partículas del agente densificante y en no densificados el YP se mantiene al nivel requerido para una limpieza adecuada de pozo.

- **Incremento del Punto de Cedencia, YP**



Ocurre cuando se presenta la floculación, después de la introducción de contaminantes solubles específicos como por ejemplo la sal, la anhidrita y el yeso encontrados durante la perforación, también ocurre de forma natural a través de la contaminación de sólidos. Un incremento en la concentración de sólidos perforados inmediatamente creará un incremento de atracciones entre las partículas.

Si se conocen los factores responsables de la alteración de estos parámetros, se puede entonces aplicar un tratamiento apropiado. De esta forma el Yield Point, se puede reducir por adición de sustancias que incrementen las cargas eléctricas tales como agentes adelgazantes, o por adición de químicos que precipiten los contaminantes. Si la eliminación de contaminantes es imposible, el Yield Point se puede reducir por dilución o convirtiendo el lodo a otro tipo más adecuado.

- **Reducción de Punto de Cedencia**



El punto de cedencia puede ser reducido ya sea por medio de un tratamiento químico o mecánico:

**Tratamiento químico:**

La dispersión, la floculación o el adelgazamiento, neutralizarán las fuerzas de atracción.

**Tratamiento mecánico:**

El uso de suficiente equipo de control de sólidos es el método preferido.

También podría lograrse por dilución pero ésta puede afectar al resto de las propiedades del fluido a menos que la concentración de sólidos sea alta.

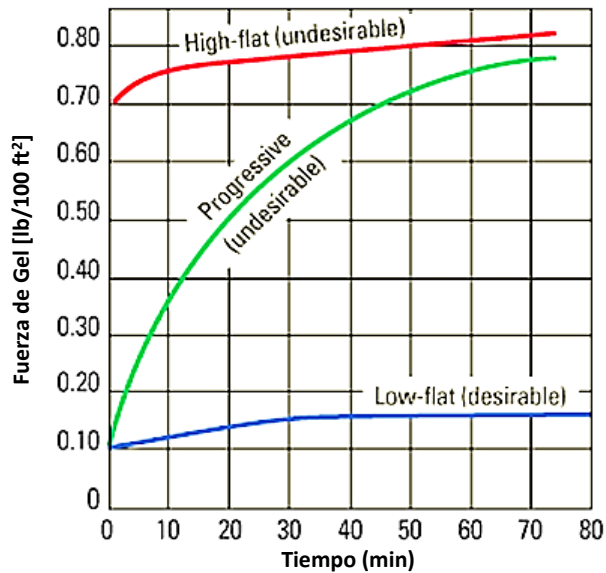
El punto de cedencia o Yield Point se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$YP = \theta_{300} - V_P$$

(24)

**2.2.6.4 Tixotropía o Fuerza Gel (Gel Strength).** Hablamos de Tixotropía o Fuerza de Gel cuando un lodo ha sido sometido a velocidades de corte de cero o vecinas a cero durante cierto tiempo y éste tiende a desarrollar una estructura de gel rígido o semirrígido, regresando luego al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte. La mayoría de los fluidos de perforación base agua demuestran esta propiedad, debido a la presencia de partículas cargadas eléctricamente o polímeros especiales que se enlazan entre sí para formar dicha matriz rígida, en otras palabras es una medida de la fuerza de atracción electroquímicas de las partículas que componen el lodo en condiciones estáticas.

**Figura 46** Tipos de Geles en Lodos



**Fuente:** Oilfield Schlumberger

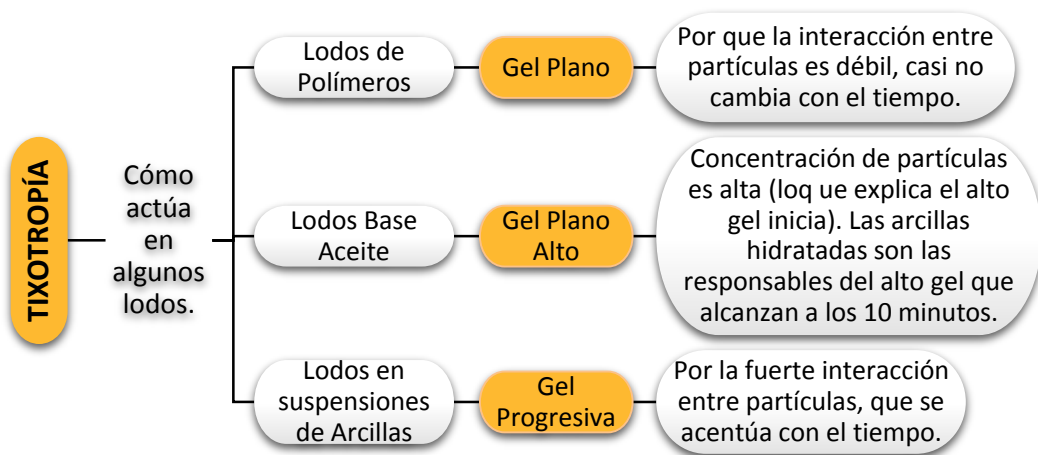
Para tener una medida del grado de tixotropía presente en un lodo se toman dos lecturas de resistencia de gel en el viscosímetro Fann, la primera con 10 segundos de reposo del lodo y la segunda con 10 minutos de reposo. La probable aparición de dificultades en un sistema de lodo se refleja habitualmente en la ocurrencia de geles progresivos o de geles instantáneos. En la gráfica se muestran los tipos de comportamientos de geles en lodos de perforación: Gel Plano (Low Flat – Línea Azul), Geles Progresivos (Progressive – Línea Verde) y Plana Alta (High Flat – Línea Roja).

Un amplio margen entre la lectura inicial de gel y la lectura a los 10 minutos se denomina gel progresivo, que aumenta la resistencia de gel y son menos bombeables mientras están estáticos, e indica acumulación de sólidos. Si la lectura de gel inicial, 10 segundos y la de 10

minutos son ambas elevadas, con pequeñas diferencias entre las dos, estamos en presencia de un gel instantáneo, lo que indica floculación. La resistencia de gel específica de un fluido de perforación se describe como plana baja, que es la más deseable entre los tipos de gels.

La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico. Es decir que cualquier cosa que fomenta o impide el enlace de las partículas, aumentará o reducirá la tendencia a gelificación de un fluido. A continuación se presenta la tixotropía de algunos fluidos de perforación:

**Figura 47** Tipos de Tixotropía en Fluidos de Perforación



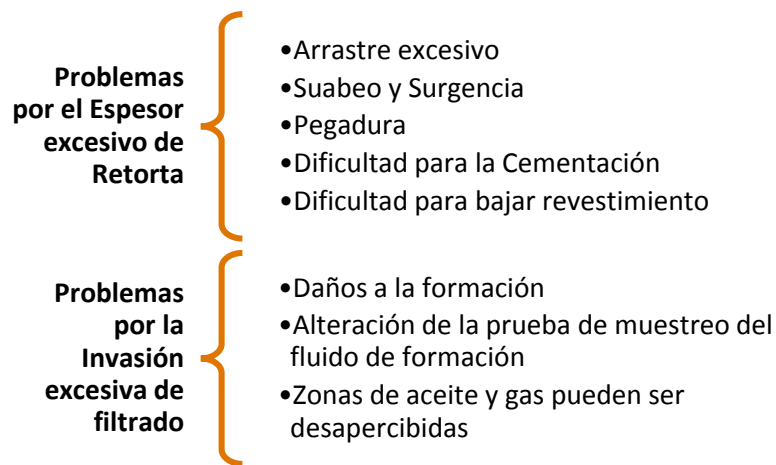
La magnitud de la gelificación, así como el tipo de esfuerzo de gel, es importante en la suspensión de los recortes y del material densificante. No se debe permitir que la gelificación alcance un nivel más alto del necesario para cumplir estas funciones. Los esfuerzos de gel excesivos pueden causar complicaciones, tales como las siguientes:

- Complicaciones de Geles Excesivos**
- \* Entrampamiento del aire o gas en el fluido.
  - \* Presiones excesivas "Cuando se interrumpe la circulación después de un viaje"
  - \* Reducción de la eficacia del equipo de remoción de sólidos.
  - \* Excesiva succión al sacar la sarta del pozo
  - \* Aumento excesivo de la Presión al introducir tubería.
  - \* Incapacidad para bajar herramientas de registro hasta el fondo de pozo.

### 2.2.6.5 Filtración

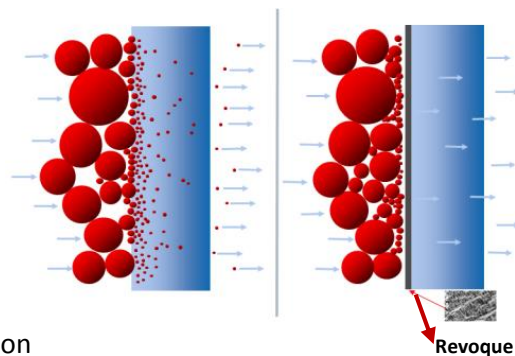
$$\text{Fluido} + \text{Presión del fluido más alta que la presión del medio permeable.} + \text{Medio Permeable} = \text{Control de Filtrado}$$

Una de las funciones básicas del fluido de perforación es sellar las formaciones permeables y controlar la filtración (pérdida de filtrado). Con frecuencia se requiere un control adecuado de la filtración y la deposición de un revoque delgado de baja permeabilidad para evitar los problemas de perforación y producción.



El filtrado es consecuencia de la fase líquida del fluido y se refiere a la acción mediante la cual la presión diferencial hace entrar a la fase líquida del lodo de perforación dentro de una formación permeable. Durante este proceso, las partículas sólidas son filtradas, formando un revoque. Si la fase líquida también contiene un líquido inmiscible tal como una salmuera en un lodo base aceite entonces las gotas del líquido inmiscible también se depositarán en el revoque y contribuirán al control de filtración. El filtrado indica la cantidad relativa de líquido

**Figura 48** Control de Filtrado “Formación de Revoque”



Fuente: Filtration + Separation

que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables como se observa en la Fig. 49<sup>39</sup>. Esta característica es afectada por la presión, dispersión, temperatura y tiempo. Ha tomado un largo periodo comprobar que la estimación correcta de las propiedades del filtrado de los fluidos de perforación contribuye en una perforación exitosa, especialmente filtración dinámica, para que tenga lugar este fenómeno de filtración necesitamos:

Control de filtrado adecuado de la pérdida de filtrado del lodo; reducir la cantidad de filtrado, es decir, formar una torta delgada; impermeable y resistente sobre la superficie o pared del hueco, enfrente de las formaciones permeables e impedir así una pérdida excesiva de filtrado. Existen básicamente dos tipos de filtración, la estática y la dinámica. Ambos casos se presentan en medio de la perforación:

- **Filtración Estática**

La filtración estática ocurre bajo condiciones estáticas, es decir en cualquier momento en que el lodo no está circulando. Específicamente cuando en medio de la perforación se hace una parada.

Varios factores controlan la tasa de filtración bajo estas condiciones. La ley de Darcy, un modelo clásico de flujo de fluido a través de un medio poroso, ayuda a identificar los factores que afectan la filtración y el espesor de la retorta:

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{A \cdot K \cdot \Delta P}{H \cdot \mu} \quad (25)$$

Donde:

K → Permeabilidad de la Retorta (darcys)

A → Superficie de la Sección Transversal (cm<sup>2</sup>)

ΔP → Presión diferencial de filtración (atmósferas)

H → Espesor de la Retorta (cm)

μ → Viscosidad del filtrado (cP)

V<sub>f</sub> → Volumen del filtrado (cm<sup>3</sup>)

t → Tiempo de filtración (seg)

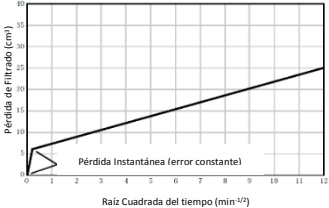
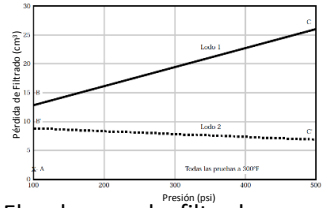
“...Como lo ilustra esta ecuación, la pérdida de filtrado es inferior cuando la permeabilidad del revoque es más baja, la superficie es más pequeña y la presión diferencial es más baja. La filtración también disminuye cuando la viscosidad del filtrado y el espesor del revoque aumentan, siempre que el revoque más grueso tenga la misma permeabilidad.

<sup>39</sup> Membranes: Expanded PTFE finds new markets. 13 Febrero de 2013. Disponible en: <<http://www.filtsep.com/view/30721/membranes-expanded-ptfe-finds-new-markets/>>.

Durante los periodos estáticos, el espesor del revoque aumenta con el tiempo, pero la velocidad de deposición disminuye. Ésta ecuación debe ser modificada para determinar el volumen de filtrado  $V_f...$ <sup>40</sup>

La filtración estática es controlada por el tiempo, la presión, la temperatura (que gobierna la viscosidad del filtrado) y las propiedades de la torta, como grosor y permeabilidad.

**Tabla 14** Parámetros que afectan la Filtración Estática: Tiempo, Presión y Temperatura

Relación entre Volumen del Filtrado Vs Tiempo	Relación entre la Presión Vs Volumen del Filtrado	Relación entre Temperatura y el Volumen del Filtrado
 <p>Esta relación entre el tiempo y el Volumen del Filtrado ocurre a presión y temperatura constante. La extrapolación de la línea recta intercepta el eje vertical en un punto donde se conoce como pérdida instantánea. Esta es debida a la pérdida de fluido hacia la formación antes de que se forme una torta con propiedades filtrantes sobre ella.</p> <p>Las propiedades filtrantes se determinan al medir el volumen acumulado del filtrado en un tiempo determinado (30 min) a condiciones estándar (100 psi, temperatura ambiente y área de la torta de 7 pulg<sup>2</sup>). Este volumen se puede calcular a partir del volumen obtenido en un determina tiempo t, a partir de la siguiente ecuación:</p> $Q_{w30} = Q_{wt} * \sqrt{\frac{30}{t}} \quad (26)$	 <p>El volumen de filtrado no es proporcional a la raíz cuadrada de la presión, como se podría deducir de la ecuación de la Ley de Darcy, debido a que el incremento en la presión aumenta la compresión sobre la torta de lodo, disminuyendo su permeabilidad y la porosidad. La existencia de una torta de filtrado compresible es importante para un buen control de las pérdidas de fluido.</p> <p>En el caso de <b>Lodos Base Aceite</b>, el aumento de la presión absoluta tiende a disminuir el volumen de filtrado, debido a que la viscosidad del aceite se aumenta con la presión, como se muestra en la ecuación:</p> $Q_{w1} = Q_{w2} * \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \quad (28)$	<p>Un incremento en la Temperatura puede aumentar las pérdidas de fluido de varias formas. A continuación se enumeran unas causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduce la Viscosidad del filtrado y por ende aumenta su volumen de filtrado.</li> <li>Degrada los materiales del lodo, lo cual genera un aumento en las pérdidas de filtrado.</li> <li>La velocidad de degradación se incrementa con la T°, hasta que las pérdidas se hacen incontrolables.</li> <li>Cambios en el equilibrio electrostático.</li> </ul> <p>Los cambios en el equilibrio electrostático que gobierna el grado de floculación y agregación, pueden afectar el volumen de filtrado. Esto ocasiona que la permeabilidad de la torta del filtrado se altere, lo que se ve reflejado en un aumento o disminución del cálculo del volumen de filtrado realizado.</p>

<sup>40</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 270 p.

**Tabla 14** Parámetros que afectan la Filtración Estática: Tiempo, Presión y Temperatura (Continuación)

Relación entre Volumen del Filtrado Vs Tiempo	Relación entre la Presión Vs Volumen del Filtrado	Relación entre Temperatura y el Volumen del Filtrado
<p>En pruebas de campo se utiliza generalmente la prueba a 7.5 min y se dobla el valor del volumen estimado para un tiempo de 30 min:</p> $Q_{30} = Q_{7.5} * \sqrt{\frac{30}{7.5}}$ $Q_{30} = 2 * Q_{7.5} \quad (27)$ <p>NOTA:            “Esta práctica puede causar errores graves en el volumen de filtrado API registrado. Si el lodo tiene una pérdida instantánea alta, el doble del volumen de filtrado a 7.5 minutos será mayor que el volumen verdadero de filtrado API a 30 minutos. Si el lodo tiene una baja tasa de filtración, el volumen de filtrado que llena la trayectoria de flujo vacía en la celda del filtro antes de que se recoja el fluido (volumen retenido) hará que el doble del volumen de filtrado a 7.5 minutos sea inferior al volumen verdadero de filtrado API a 30 minutos.”</p>	<p><math>Q_{w1}</math> → Pérdidas de fluido medidas a una viscosidad final <math>\mu_1</math>  <math>Q_{w2}</math> → Pérdidas de fluido medidas a una viscosidad inicial <math>\mu_2</math>            Para el uso de la anterior expresión, se asume que todos los parámetros en la ecuación para el cálculo de las pérdidas de fluido a condiciones estáticas permanecen constantes, incluyendo el diferencial de presión sobre la “torta”. La única diferencia es la presión absoluta a la cual se realiza la filtración.</p> <p>La figura presentada compara el volumen de filtrado captado a 500 y 100 psi. Las muestras comparadas tenían el mismo filtrado API, marcado en el punto A. Las pruebas de alta temperatura y 100 psi están marcadas Puntos B y B’, mientras que el filtrado ATAP está marcado Punto C y C’.</p> <p>El Lodo 1 (B’-C’) tiene un revoque muy comprimible, tal como lo demuestra la pendiente negativa. El Lodo 2 (B-C) tiene un revoque relativamente incompresible con una pendiente positiva.</p>	<p>El calor en algunas arcillas produce floculación e incrementa la velocidad de filtración, debido a cambios en la atmósfera alrededor de las partículas de arcilla y cambio en la solubilidad y absorción de los contaminantes.</p> <p>La floculación resultante de un incremento en la temperatura, hace imposible predecir las pérdidas de fluido a altas temperaturas a partir de medidas efectuadas a temperaturas más bajas. Es necesario entonces, probar cada lodo separadamente a la temperatura de interés.</p>

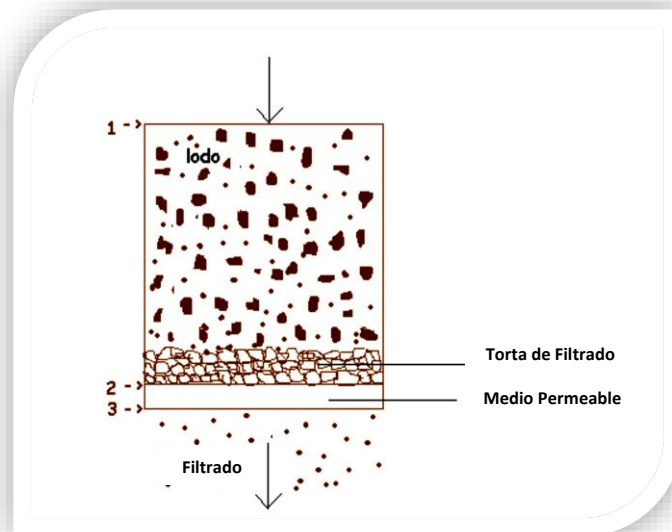
- **Filtración dinámica**

Hablamos de filtración dinámica, cuando el fluido de perforación está en movimiento. La tasa de filtración sobre condiciones dinámicas es considerablemente mayor que la estática, a las mismas condiciones de presión y temperatura. No existe ninguna correlación directa entre las

medidas de filtración estática de API y ATAP y la filtración dinámica. La experiencia ha demostrado que un lodo que demuestra buenas características de filtración estática y estabilidad, tendrá un rendimiento satisfactorio bajo las condiciones reales de perforación, indicando que la pérdida de filtrado dinámico está comprendida dentro de un rango satisfactorio.

La filtración comienza tan pronto como la broca expone la roca permeable. Un sobrebalance de la presión hidrostática causará el flujo inmediato del filtrado dentro de la formación a una velocidad elevada. A medida que la filtración continúa, los sólidos más grandes de lodo sellan las formaciones porosas y un revoque empieza a formarse bajo condiciones dinámicas, como con la filtración estática, la permeabilidad del revoque limita la filtración, no la permeabilidad de la formación se forma un buen sello. La turbulencia del flujo de fluido en la broca y en las partes adyacentes a los portamechas tiende a mantener estas tasas de filtración a altos niveles, mediante la erosión del revoque.

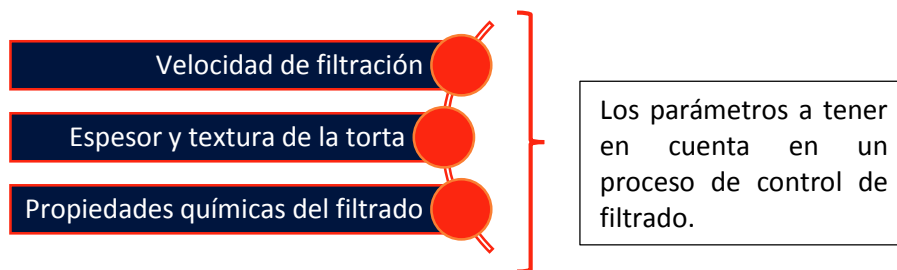
**Figura 49** Filtración Dinámica



Bajo condiciones dinámicas, las tasas de filtración no disminuyen con el tiempo, como con la filtración estática. Además, el espesor del revoque no sigue aumentando. En cambio, se establece un equilibrio entre la deposición del revoque y la erosión hidráulica, de manera que la tasa de filtración dinámica se vuelve más o menos constante. Puede que se trate menos de la erosión verdadera que de la tendencia del movimiento del fluido a impedir la deposición de las partículas sólidas de una manera organizada. El equilibrio del revoque es determinado

principalmente por las características de los sólidos del lodo (tamaño, composición y concentración de las partículas), y en menor parte por las condiciones hidráulicas (flujo turbulento o laminar) y la viscosidad del filtrado. Los estudios han identificado varias diferencias importantes entre la filtración dinámica y la filtración estática. Una diferencia es el efecto del aceite emulsionado u otros líquidos inmiscibles. Aunque estos líquidos insolubles reduzcan la pérdida de filtrado estática y el espesor del revoque, en realidad aumentan la filtración dinámica al causar que el revoque sea menos cohesivo y más erosionable. Otra diferencia es que el aumento de la concentración de polímeros de control de filtración para reducir la pérdida de filtrado API a niveles ultra-bajos puede aumentar la filtración dinámica. Estas diferencias se deben principalmente a la modificación de la resistencia ante la erosión de los revoques.

### Los parámetros en un proceso de control de filtrado

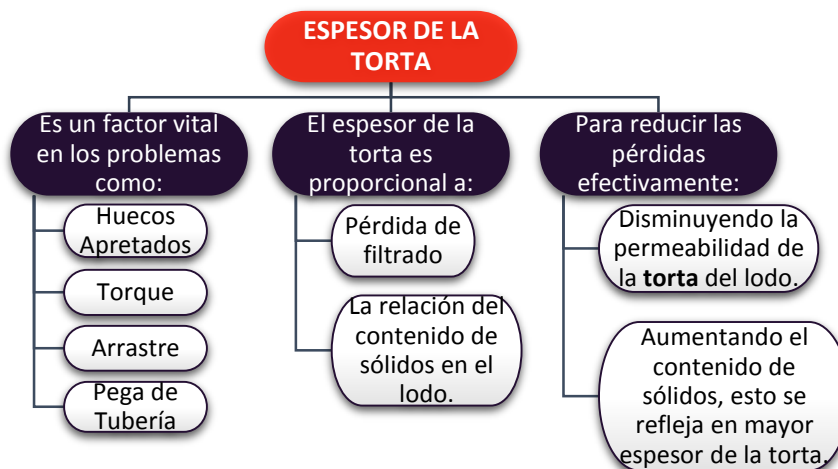


- **Influencia de las Características de la Torta sobre la Filtración**

Los factores de la torta que más influyen sobre la filtración del lodo son el espesor, la permeabilidad y la compresibilidad.

#### A. Espesor de la Torta

**Figura 50** Influencia de las Características de la Torta sobre la Filtración



## B. Permeabilidad de la torta del lodo

La permeabilidad de la torta del lodo es el parámetro fundamental que controla la filtración estática y dinámica. El comportamiento de filtración es más claramente reflejado por la permeabilidad que por cualquier otro parámetro; además tiene la ventaja de no ser afectada por el contenido de sólidos. **La forma más eficiente para controlar la pérdida de fluido es entonces, por medio del control de la permeabilidad de la torta.**

La permeabilidad varía considerablemente con el tamaño de las partículas. Las partículas de tamaño coloidal son excelentes controladores de las pérdidas de filtrado. La permeabilidad de la torta también es controlada por el tipo de partículas coloidales. Por ejemplo, las tortas obtenidas a partir de suspensiones de bentonita en agua dulce tienen permeabilidades supremamente bajas, debido a las características planas que les permiten compactarse lo suficiente para impedir flujo. Las macromoléculas tales como el almidón, deben su efectividad a la facilidad de las moléculas para deformarse, así como a su tamaño pequeño. Los lodos base aceite forman una capa delgada de agua emulsionada en aceite; las pequeñas gotas de agua actúan como sólidos deformables para producir una torta de baja permeabilidad.

A partir de lo anterior, se puede recomendar lo siguiente para mejorar las características de los lodos:

“...Incrementar la concentración de sólidos en la región del tamaño coloidal, mediante la adición de bentonita prehidratada y reductores poliméricos de pérdida de filtrado. En los lodos de arcilla la concentración de coloides es generalmente buena.

En lodos con arcilla se deben adicionar químicos, para asegurar que las partículas estén desfloculadas...”<sup>41</sup>

Las permeabilidades de los revoques se miden en microdarcys. La permeabilidad del yacimiento se mide en milidarcys. Un buen revoque es aproximadamente 1.000 veces menos permeable que la formación permeable sobre la cual el revoque se está depositando. La calidad del revoque depende de la optimización de la composición de los sólidos del fluido, de manera que la concentración de sólidos perforados no perjudique el rendimiento de la bentonita y de los aditivos de control de filtración.

---

<sup>41</sup> MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación. Trabajo de Grado para optar título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Químicas, 1992. 32 p.

- **Proceso de Puenteo**

En una formación muy permeable con grandes aberturas de poro, puede que sea necesario usar un agente puenteante para impedir que el lodo entero fluya dentro de la formación, en otras palabras lo que se hace en un proceso de puenteo es bloquear las aberturas. Durante la perforación ocurre este dilema, y puede llegar a ser infinito a menos que el lodo contenga partículas del tamaño requerido para llenar los poros de la roca y establecer una base sobre la cual se puede formar la torta del lodo.

Una forma para determinar el tamaño de las partículas de llenado, es realizar una serie de pruebas sobre corazones de la formación de interés. Cuando esto no es posible se hace una guía a partir de correlaciones empíricas que relacionan el tamaño de estas partículas con la porosidad<sup>42\*</sup>.

**Tabla 15** Tamaño de las Partículas de Puenteo

Permeabilidad de la Formación [Darcys]	Tamaño de la Partícula [Micrones]	Concentración del Agente Puenteante[Lb/Bb]
< 100 mD	< 2	5-10
100-1000 mD	10	11
10 D	74	

11 Lb/Bb será suficiente para prevenir que el lodo invada más que una pulgada de la formación.

**Fuente:** Reestructuración Teórico Practica del Laboratorio de Lodos y Cementos



- Solo partículas de un cierto tamaño relativo al tamaño de los poros de la formación pueden efectuar este llenado.
- Las partículas mas grandes al tamaño de poro, no pueden entrar y son arrastradas por la corriente de lodo.
- Las partículas considerablemente más pequeñas invaden la formación no alterada por el filtrado.
- Realizado el llenado primario, las partículas sucesivamente más pequeñas son atrapadas y despues de eso, solo el filtrado invade la formación.

<sup>42\*</sup> Al puenteo las zonas adquiere importancia el dimensionado de las partículas. Para puenteo eficazmente es preciso saber el diámetro de poro de la formación. Una regla empírica usada en la industria para calcular un diámetro de poro (micrones) desconocido, es tomar la raíz cuadrada de la permeabilidad en milidarcys. Para puenteo eficazmente la zona de producción, el 20-30% por peso del material de puenteo debe ser un tercio del tamaño de poro en micrones.

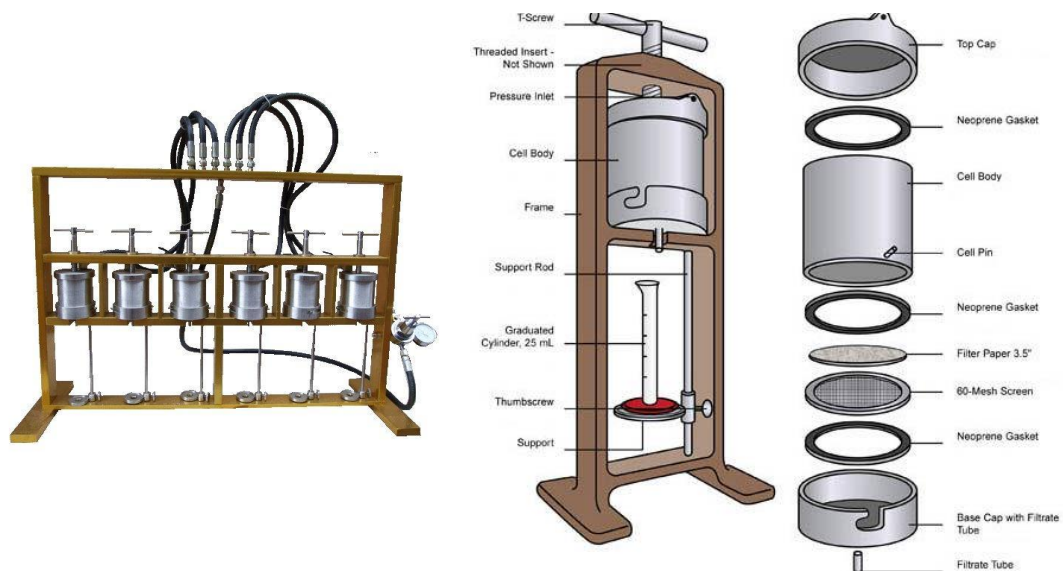
Una alta fuga de lodo, involucra la invasión de significantes cantidades de sólidos dentro de las formaciones expuestas a la acción de la broca causando su bloqueo interno. Como resultado, la presión de los poros se incrementará rápidamente hasta aproximadamente la presión entre el pozo y la formación, (Sobrepresión hidrostática de la columna de lodo sobre la formación), favoreciendo la tasa de penetración. En general, los lodos con un bajo contenido de sólidos exhibirán altas fugas de lodo. Es conveniente entonces, mantener un bajo contenido de sólidos en el lodo desde el punto de vista de desempeño de la perforación. Para obtener un control de filtración apropiado, se debe entonces realizar una óptima selección del tamaño y tipo de sólidos.

- **Filtrado API Estándar**

**PROCEDIMIENTO:**

1. La prueba de filtrado API se realiza a temperatura ambiente y una presión de 100 psi durante 7,5 minutos.
2. Se coloca un empaque en la tapa inferior de la celda de lodo verificando que esté al mismo nivel que la superficie de la tapa.
3. Colocar la malla 200 sobre el empaque
4. Luego de esto colocar el papel filtro (Watman n° 50 o equivalente).

**Figura 51** Filtro Prensa API Estándar



**Fuente:** Tjskl Products

5. Aquí se coloca el segundo empaque y se monta el cuerpo de la celda haciendo un acople girando hacia la derecha hasta que quede apretado a mano.
6. Se llena de lodo hasta  $\frac{1}{4}$  de pulgada antes del borde del cuerpo de la celda.

7. Se monta el cuerpo de la celda de lodo sobre el armazón del filtro-prensa.
8. Se coloca la tapa superior y se procede a asegurarla girando la manecilla en T atornillando (girando) a una presión firme pero no excesiva.
9. Se deja una probeta alta debajo de la celda de lodo para asegurarse que no se pierda filtrado.
10. Se debe asegurar que todas las válvulas estén cerradas.
11. Solamente se abre la válvula de la celda en la que se va a trabajar.
12. La válvula se debe abrir  $\frac{1}{4}$  de vuelta.
13. La prueba empieza en este momento y tarda 7,5 minutos.
14. Al finalizar este tiempo se procede hacer el desmontaje.
15. Se abren todas las válvulas (incluid con la que se está trabajando), esto con el fin de tener un alivio de presión en la cámara de lodo con la que se trabajó.
16. Cuando se perciba que deja de escapar aire por las válvulas que no se utilizaron se suelta la celda y se desecha el lodo en el tanque dispuesto para esto.
17. Se retira el cuerpo de la celda
18. Con ayuda de una espátula se retira el empaque y luego el papel filtro con mucho cuidado para evitar perturbaciones.
19. Lavar la torta minuciosamente para eliminar el exceso de lodo.
20. Medir el espesor de la torta en  $\frac{1}{32}$  de pulgada y hacer análisis de la misma.
21. Registrar el filtrado en ml de 30 min (corresponden a la prueba de campo). Para el laboratorio se registra a los 7.5 min.

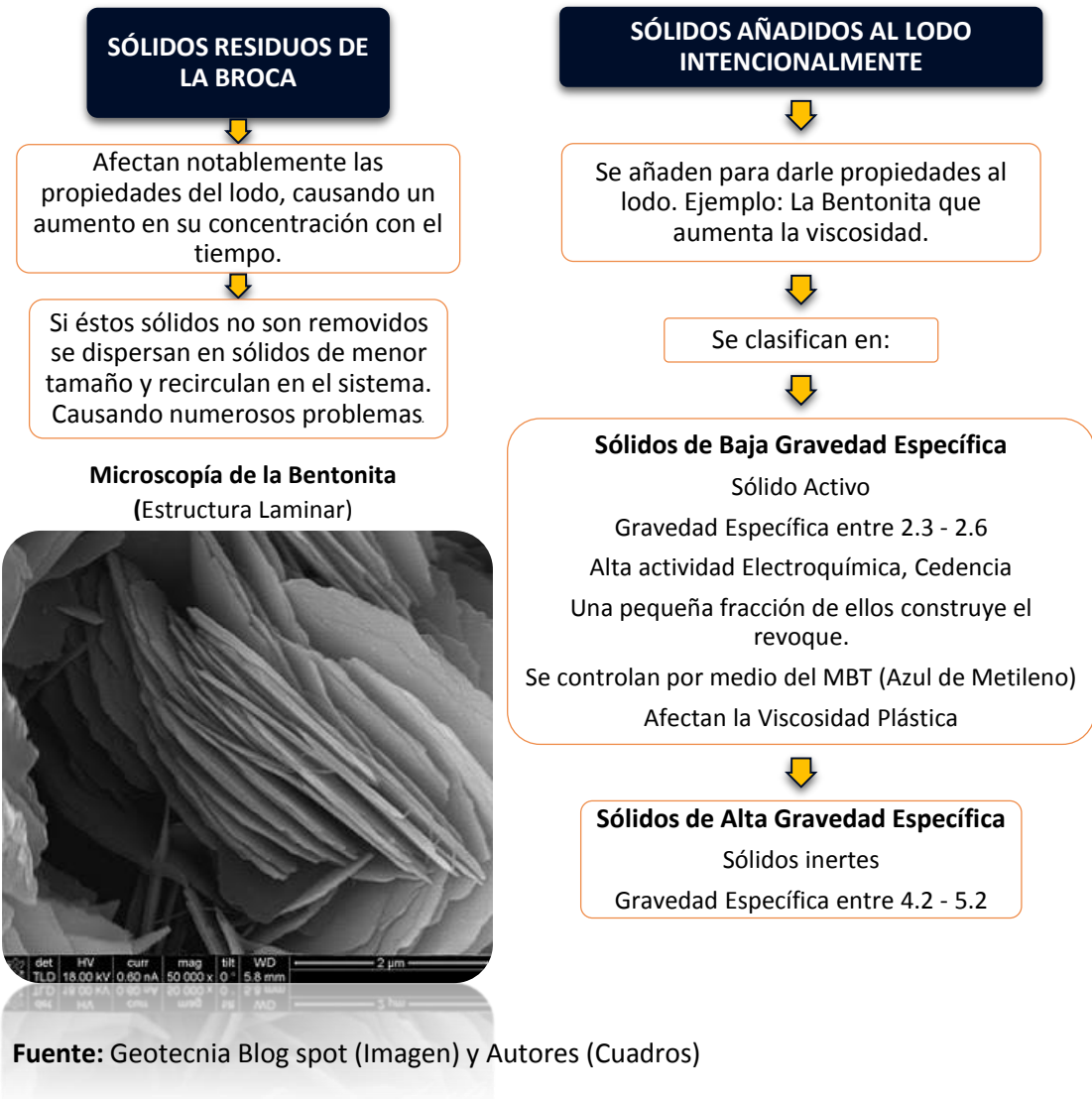
**2.2.7 Eficiencia de la Limpieza del Pozo.** Aun cuando en el programa de perforación se le da especial importancia a la limpieza de pozo, la mayor parte de los problemas durante la perforación están relacionados con problemas de limpieza del hueco, especialmente en pozos desviados o en pozos horizontales en donde a menudo es difícil lograr un adecuado transporte de las partículas. Se asocia el análisis de sólidos como parámetro determinantes de este aspecto.

### **ANÁLISIS DE SÓLIDOS**

Un papel muy importante en el comportamiento de los lodos y la eficiencia total de la operación de perforación juega el contenido de sólidos. Los sólidos presentes en el fluido de perforación tienen la capacidad influir directamente sobre la densidad, la viscosidad, los

esfuerzos de gel, la calidad de la retorta y el control de filtración, así como otras propiedades químicas y mecánicas.

**Figura 52** Clasificación de los Sólidos según la Procedencia



Los sólidos y sus volúmenes también afectan los costos del lodo y del pozo, incluyendo factores como la Velocidad de Penetración (ROP), la hidráulica, las tasas de dilución, el torque y el arrastre, las presiones de surgencia y suabeo, la pega por presión diferencial, la pérdida de circulación, la estabilidad del pozo, y el embolamiento de la barrena y del conjunto de fondo. A su vez, estos factores afectan la vida útil de las barrenas, bombas y otros equipos mecánicos.

Los lodos son, básicamente dispersión de arcilla en agua o aceite con varios aditivos para proveer las propiedades deseadas, esta presencia de sólidos se clasifican en dos tipos dependiendo de la procedencia como se ilustra en la Fig. 53.

Las principales pruebas que se realizan al fluido de perforación para efectos de limpieza de sólidos son: **Contenido de Arena, Contenido de Sólidos, Aceite, Agua y Capacidad de Intercambio Catiónico**, a continuación se describen algunas.

**2.2.7.1 Análisis del Contenido de Arena.** Determinar el contenido de arena es fundamental debido al efecto abrasivo que puede causar en el equipo además de los problemas asociados que se mencionaron anteriormente. Un buen indicador del mal funcionamiento de los aparatos (control de arena) son las variaciones excesivas en el porcentaje de volumen de arena. Para calcularlo se hace uso de una malla de arena. Esta prueba de filtrado es de uso extendido en el campo, debido a lo sencillo de la operación.

#### **EQUIPO Y PROCEDIMIENTO:**

Malla de 2 ½ pulgadas de diámetro.

Malla 200 (74 micrones)

Embudo de tamaño que se ajuste a la malla

Tubo zanahoria marcado para señalar el volumen de lodo a ser añadido (Mud to here) y el volumen de agua a ser añadido (Water to here).

**Figura 53** Kit de Campo “Contenido de Arena”



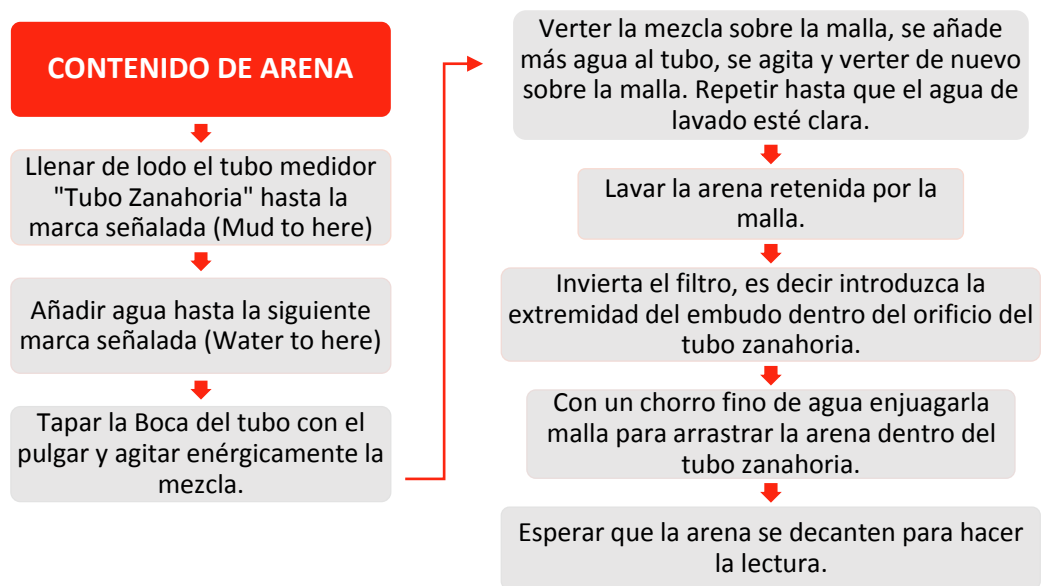
**Fuente:** SMARTdrill Fann

“... Las partículas sólidas entre 74-250 micrones se clasifican como arenas (1 micrón =  $10^{-6}$  metros). De acuerdo al rango especificado en el porcentaje de arena, el lodo no deberá contener

más del 0,5% en volumen de partículas de arena (cuarzo, sílice). La presencia de arena por encima del rango estipulado puede ocasionar desgastes excesivos en las partes de la bomba, la broca y el sistema circulatorio.

Un aumento en el contenido de arena, ocasiona variaciones en la viscosidad, por lo tanto es necesario la presencia de un dispersante para su reducción. Una vez la viscosidad está en un rango aceptable se procede a una dilución o al uso de un buen equipo de control de arena (desarenador)...<sup>43</sup>.

**Figura 54** Procedimiento para Hallar El Contenido de Arena



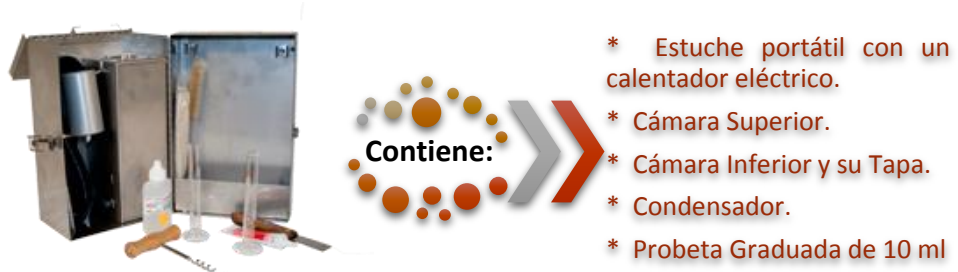
**2.2.7.2 Contenido de Sólidos, Aceite y Agua.** Esta prueba se realiza por la necesidad del control de sólidos. En el programa de lodos se estipula los porcentajes de agua, aceite y sólidos que debe contener un fluido de perforación determinado. Variaciones en estas cantidades serán un indicativo para el acondicionamiento del lodo; adicionando agua, tratándolo con adelgazantes químicos o removiendo las partículas de contaminantes.

<sup>43</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. 44 p.

## EQUIPO:

Retorta →

Figura 55 Kit Retorta



Fuente: Fann Products

## PROCEDIMIENTO:

1. Antes de iniciar la prueba se procede a precalentar el equipo, esto se logra conectando el aparato con su cable alimentador de corriente a la toma eléctrica y verificando que el bombillo de encendido este activo.
2. Teniendo el equipo en precalentamiento y sin apagarlo, vierta una muestra de lodo en el vaso (Cámara inferior) y tápelo para expulsar el líquido de más. Siempre debe existir un rebose por el orificio de la tapa ya que esto garantiza que el volumen dentro del vaso sea el correcto.
3. Llenar la cámara de expansión superior del condensador con virutas finas de acero (bom-bril) y luego enroscar el vaso de la muestra a la cámara superior. Las virutas de acero deberían atrapar los sólidos extraídos por ebullición.
4. Ubique la probeta graduada de 10 ml bajo la espiga de la unidad de condensación.
5. El equipo solo se debe apagar al terminar la prueba (destilación), lo cual tardará 10 minutos o más, teniendo en cuenta que al cabo de estos 10 minutos se contara un minuto total sin que caiga una gota más; si cae una gota se reinicia el minuto final de tal forma que cuando pase 1 minuto completo sin caer liquido en la probeta esto indicará el final de la prueba.
6. Al terminar la prueba enfriar completamente, limpiar y secar el montaje de la retorta (preguntar al técnico del laboratorio como hacerlo de forma correcta).

De los 10 ml de la probeta lo que tenga de líquido de 1 a 10 será mi porcentaje de líquidos y el resto será mi porcentaje de sólidos que serían los que quedaron atrapados en la virutas finas de acero.

$$\% \text{ Aceite en Volumen} = \text{ml de Aceite} * 10 \quad (29)$$

$$\% \text{ Agua en Volumen} = \text{ml de Agua} * 10 \quad (30)$$

$$\% \text{ Sólidos} = 100 - (\text{ml de Agua} + \text{ml de Aceite}) * 10 \quad (31)$$

En los fluidos de perforación hay rangos estipulados para porcentajes en volumen de sólidos que dependen de la densidad, tipo y sustancias agregadas al lodo (presencia de sal, o porcentaje en volumen de aceite). Una vez determinadas las propiedades del lodo se debe verificar si estos valores caen dentro de los rangos estipulados, para evitar aumento en los costos de mantenimiento del lodo, daños a las formaciones productivas, entre otros.

## 2.2.8 LABORATORIO 2

### CONOCIMIENTO DEL EQUIPO

#### 1. Introducción

Es difícil especificar rangos exactos para las propiedades del lodo debido a la amplia variedad de aplicaciones. Lo que si se necesita es determinar si estas propiedades están comprendidas dentro del rango apropiado para un lodo determinado. Esta prueba está diseñada para que el estudiante tenga un encuentro cercano con el equipo de laboratorio y en adelante realice las pruebas determinadas y desarrolle la capacidad objetiva de caracterizar si el fluido se encuentra en los intervalos óptimos.

#### 2. Objetivos

- Conocer el funcionamiento y el uso de los equipos utilizados para determinar las propiedades de los fluidos de perforación.
- Adquirir los fundamentos de las propiedades físicas del lodo y como obtenerlas de manera práctica.

#### 3. Temas de Investigación

- Propiedades Reológicas
- Tipos de Fluidos
- Contenido de Sólidos y Arena
- Limpieza del Hueco

#### 4. Material Utilizado

- Embudo Marsh
- Papel Filtro
- Balanza de Lodos
- Probeta de 10 ml
- Cronómetro
- Embudo correspondiente al tamiz.
- Viscosímetro Rotatorio de Cilindro Concentrico Fann Calibrado.
- Tamiz de malla 200
- Filtroprensa
- Kit de Retorta completo.
- Acero fino (Brillo)

#### 5. Procedimiento experimental

Preparar las siguientes muestras:

- 1 Bb eq de agua + 25 Lpb de Bentonita Nacional
- 1 Bb eq de agua + 25 Lpb de Bentonita Nacional + 0.4 Lpb de NaOH + 2 Lpb PAC-L
- 1 Bb eq de agua + 25 Lpb de Bentonita Nacional + 30 Lpb de  $\text{CaCO}_3$  + 0.4 Lpb NaOH
- 1 Bb eq de agua + 25 Lpb de Bentonita Nacional + 5 Lpb de NaCl

## 6. Tabulación de Datos

**Tabla 16** Laboratorio 2: Propiedades del Lodo

Procesos	pH	Visc. Marsh [Seg/ct]	$\rho$ [Lpg]	Contenido de Arena [%]	Sólidos [%]	Filtrado API [cc]	Espesor Torta [ @/32]
a							
b							
c							
d							

**Tabla 17** Laboratorio 2: Reología

Procesos	600 RPM	300 RPM	Gel Inicial 10 Seg	Gel Inicial 10 Min	Visc. Aparente [cP]	Visc. Plástica [cP]	Yield Point [Lb/100 ft <sup>2</sup> ]
a							
b							
c							
d							

**Tabla 18** Laboratorio 2: Análisis de Filtrado

Procesos	pH	P <sub>f</sub>	M <sub>f</sub>	Ppm Cl <sup>-</sup>	Ppm NaCl	Ppm C <sub>a</sub> <sup>++</sup>	Ppm CaCO <sub>3</sub>
a							
b							
c							
d							

## 7. Cuestionario

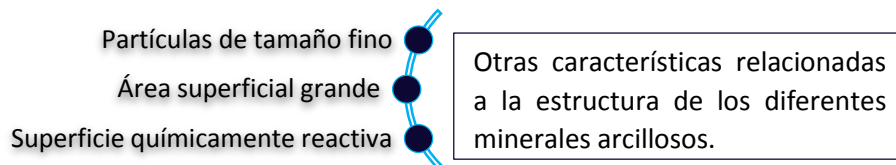
- ¿Qué sucede con la Densidad, Viscosidad Plástica, Gel, Filtrado API, % de Sólidos y el pH; al agregar diésel al lodo base agua? Explique
- Explique porqué la Bentonita aumenta la viscosidad al agregarla al agua.
- Mencione los problemas operativos que puede causar la pérdida de circulación del lodo.
- Mencione 3 razones por las que el agua no es considerado un fluido de perforación.
- Explique lo que ocurre si un lodo no tiene fuerza de gel.

## 2.3 QUÍMICA DE LAS ARCILLAS

Una de las dificultades más comunes en la perforación de pozos es atravesar por formaciones arcillosas. Estas reaccionan al contacto con el agua provocando una expansión en su estructura y en consecuencia un hinchamiento de las mismas y al hincharse el diámetro del hueco perforado disminuye y las paredes del hueco se desmoronan, he ahí la importancia de conocer su química para implementar un lodo que pueda minimizar las reacciones cuando entran en contacto con agua, inhibiéndolas.

“...Las arcillas son materiales plásticos, de grano fino, que ocurren naturalmente en el suelo. Las partículas de arcilla son de naturaleza coloidal...”<sup>44</sup>.

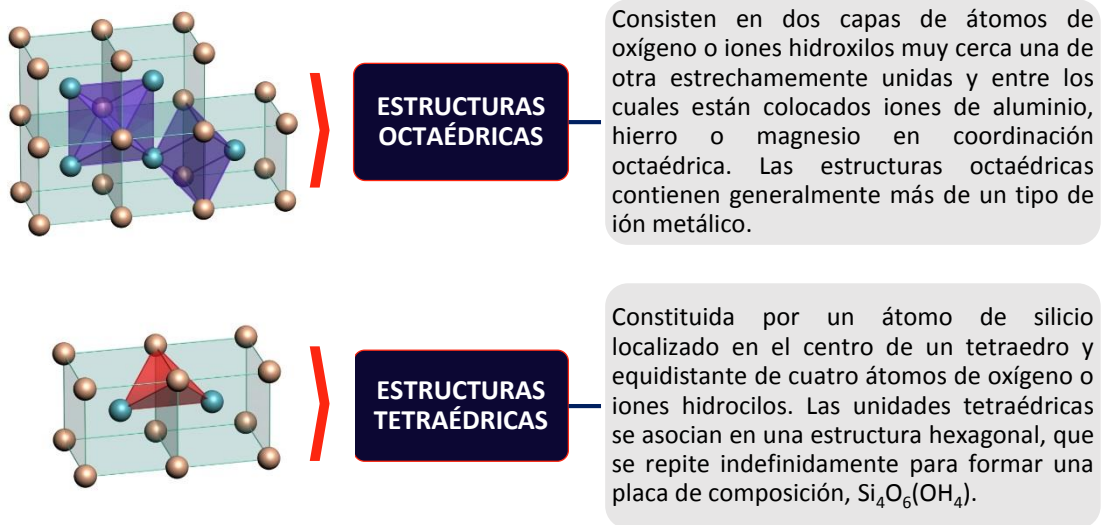
**2.3.1 Características Básicas de las Arcillas.** Una de las características más importantes de las arcillas es su composición. Las arcillas son minerales constituidos principalmente de silicio, aluminio y agua; frecuentemente presentan cantidades apreciables de hierro y magnesio, y en menor proporción sodio y potasio.



**2.3.1.1 Estructuras Básicas de las Arcillas.** Los minerales arcillosos se forman a partir de dos estructuras básicas, estructuras octaédricas y estructuras tetraédricas.

<sup>44</sup> ECAPETROL Escuela de Capacitación Petrolera. Química de Lodos. 8 p.

**Figura 56** Estructuras básicas de las arcillas



**Fuente:** Modificado de Grim (1963) por William Grham (Imagen) y Autores (cuadros)

**2.3.1.2 Estructura de los Minerales Arcillosos.** La diferente combinación de las estructuras básicas (placas de estructura octaédrica y placas de estructura tetraédrica) y la modificación de las estructuras básicas (debido a la presencia de diferentes iones metálicos), dan como resultado una gran variedad de minerales arcillosos con diferentes propiedades.

Las unidades fundamentales pueden combinarse por medio de un grupo hidroxilo común. Las diferentes combinaciones y modificaciones químicas dan origen a más de 26 tipos diferentes de minerales arcillosos, los cuales están constituidos de placas octaédricas y tetraédricas en diferentes proporciones.

**2.3.1.3 Rendimiento de las Arcillas.** El tamaño coloidal de las partículas de arcillas, hace que ellas sean activas en los lodos de base agua, el grado de actividad varía de una a otra; por consiguiente, su efecto viscosificante será diferente para cada una de estas arcillas.

El rendimiento API de las arcillas se define como “el número de barriles de lodo de 15 cP (centipoise) que se puede obtener a partir de una tonelada de material seco”. La viscosidad mencionada es la “aparente”, tal como se muestra en la Figura 58, donde 15 cP es un valor

crítico. Las adiciones de arcilla ejercen poco efecto sobre la viscosidad hasta que esta se acerca al punto crítico; de ahí en adelante, pequeñas adiciones producen marcados efectos sobre la viscosidad. Esto es cierto no solamente para las arcillas comerciales, sino también para los sólidos de perforación hidratables. También resulta válido que una suspensión de arcilla de 15 cP soportará la barita en los sistemas de lodo densificado.

“...Este gráfico puede ser muy útil para el ingeniero de lodos. Para una viscosidad determinada de las diferentes arcillas, se puede obtener datos relacionados con la densidad de la lechada, el porcentaje de sólidos en peso, el rendimiento en barriles por tonelada, el porcentaje de sólidos en volumen y las libras de sólidos por barril de lodo.

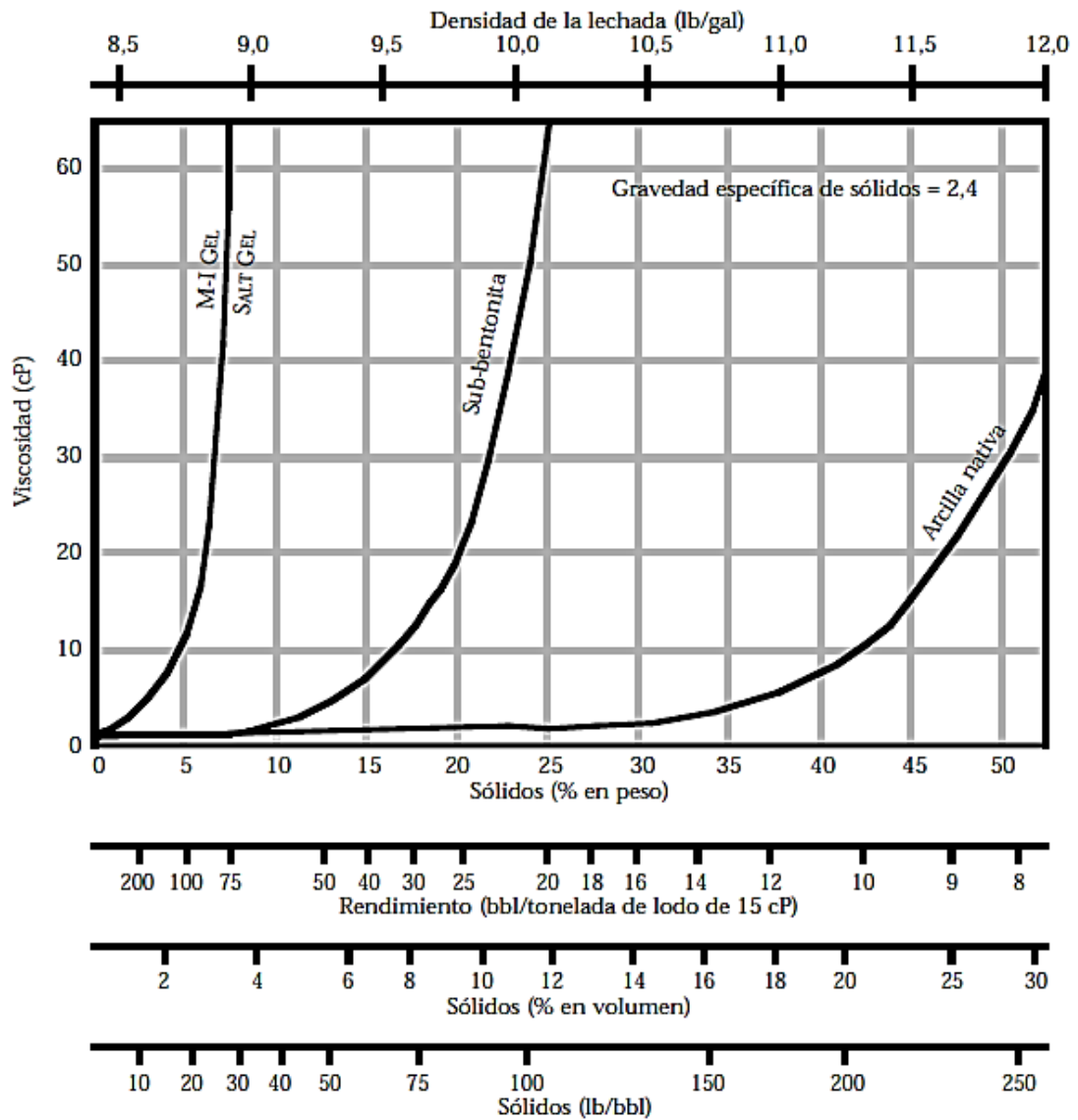
Por ejemplo, se requiere aproximadamente 20 lb/bbl de bentonita (M-I GEL) para producir un lodo con una viscosidad de 15 cP. Por lo tanto, en base al gráfico, este lodo contendría 5,5% sólidos en peso, tendría un rendimiento de 100 bbl/tonelada, tendría 2,5% sólidos en volumen, y pesaría unas 8,6 lb/gal.

El rendimiento sería inferior si una arcilla tomara menos agua. En comparación, si se hubiera usado subbentonita para producir un lodo con una viscosidad de 15 cP, este lodo contendría 18% sólidos en peso, tendría un rendimiento de solamente 28 bbl/tonelada, contendría 8,5% sólidos en volumen y pesaría casi 9,4 lb/gal. Las arcillas tienen muchas aplicaciones en los lodos de perforación. La mejor manera de aumentar la viscosidad de un lodo de perforación usando la menor cantidad posible de sólidos sería añadiendo una arcilla que tenga el mayor rendimiento. Los valores más bajos de filtrado pueden ser obtenidos con la bentonita, porque las partículas gruesas y de tamaño mediano son producidas normalmente a partir de la formación...”<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 181 p.

**Figura 57** Rendimiento de las Arcillas



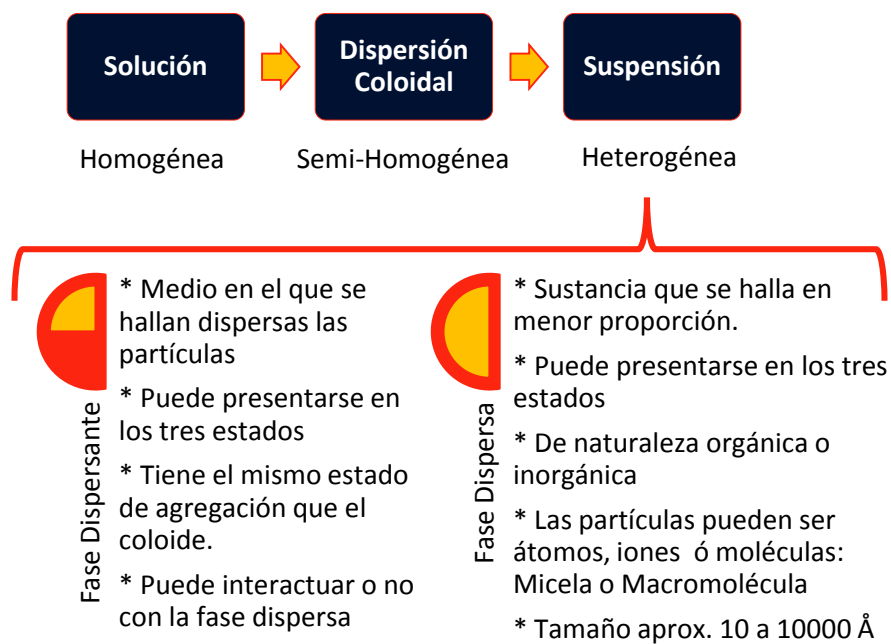
**Fuente:** Manual M-I Swaco

**2.3.2 Características de los Sistemas Coloidales.** Los coloides pueden ser definidos como el puente que comunica a las suspensiones con las soluciones, es decir, son un paso intermedio entre ambas. La línea divisoria entre las soluciones y los coloides o entre éstos y las mezclas, no es definida puesto que muchas de las características de tales sistemas se comparten mutuamente sin discontinuidad. Consecuentemente, la clasificación es frecuentemente difícil y la nomenclatura empleada queda sujeta a una selección arbitraria. Una de las diferencias entre los coloides con las suspensiones, es que no se sedimentan al dejarlas en reposo. Una partícula coloidal tiene, al menos, una dimensión que se encuentra entre los  $10^{-5}$  y  $10^{-7}$  cm. Aunque

estos límites son, algo arbitrarios, nos sirven de guía para clasificar los coloides. En las soluciones, se habla de soluto y solvente, pero en las suspensiones de tipo coloidal, hablamos de partículas dispersas o bien partículas coloidales y medio de dispersión. Los coloides son muy distintos a las soluciones en sus propiedades, de ahí que estén clasificados no como soluciones, sino como soles.

Un coloide es una dispersión de pequeñas partículas en un medio continuo, dispersas de tal manera que las fuerzas superficiales constituyen un factor importante para la determinación de sus propiedades. El tamaño y la carga eléctrica de las partículas determinan los diferentes fenómenos observados con coloides, por ejemplo el movimiento browniano.

**Figura 58** Características de los Sistemas Coloidales



★ **Movimiento Browniano.**

Las partículas coloidales tiene un movimiento rápido y desordenado denominado movimiento Browniano, que produce choques aleatorios de las partículas con igual carga (repulsión), esta interacción eléctrica es más grande que la atracción gravitatoria: suspensiones estables.

Existen diferentes combinaciones entre sólidos, líquidos y gases que pueden formar coloides. El que una mezcla dada forma una solución, una dispersión coloidal o una suspensión, depende del tamaño de las partículas dispersas, de su miscibilidad y solubilidad.

El gel es un estado de una suspensión coloidal y suelen ocurrir cuando las partículas coloidales dispersas tienen una gran afinidad con el medio dispersante, son liofílicos. Por lo tanto, ocurren generalmente con bentonita en agua. Los sistemas coloidales se estabilizan por fuerzas, principalmente de Van Der Waals (atractivas) de repulsión electrostáticas y esféricas. Diferentes factores de estabilidad según se trate de coloides:

**Coloide liofílico:**


Un coloide que no se precipita fácilmente a partir de una solución y que se dispersa fácilmente después de la precipitación mediante la adición del solvente. Estables térmicamente.

**Coloide liofóbico:**

Un coloide que se precipita fácilmente a partir de una solución y que no se puede dispersar de nuevo mediante una adición de solución. Estables cinéticamente.

Pero térmicamente inestables, si se separan las fases no es posible la redispersión espontánea. El estudio de los sistemas coloidales es sencillamente debido a que las arcillas son partículas de tamaño coloidal, que pueden conseguir la floculación de las arcillas por adición de electrolitos, cambios de pH, adición de otros coloides, adición de desolvatantes y por centrifugación.

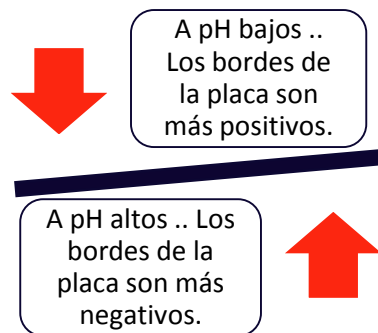
**2.3.3 Cargas sobre la superficie de las Arcillas.** Las cargas sobre la superficie de los minerales arcillosos se originan a partir de dos mecanismos:

- 
- ➔ Cargas relacionadas con la composición de la estructura de la arcilla.
  - ➔ Las cargas que se originan en los bordes de las placas de arcilla.

**2.3.3.1 Sustitución Isomorfa.** La combinación ideal de placas tetraédricas y octaédricas, originan una estructura en la cual las cargas están balanceadas. Sin embargo, si un ion metálico es reemplazado por un ion de valencia más baja, se genera una carga negativa. La carga negativa sobre la arcilla es neutralizada mediante la adsorción de un catión sobre la superficie, dando origen a una importante propiedad de las arcillas conocida como Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC), (ver en la sección 2.3.6) debido a que estos cationes pueden ser reemplazados por otros iones diferentes o por iones de la misma clase. Esta propiedad es frecuentemente usada para caracterizar arcillas y lutitas, así como en el tratamiento de lodos para cuantificar el contenido de arcilla.

**2.3.3.2 Cargas en los bordes de las Placas de Arcilla.** Cuando se rompe una placa de arcilla, la superficie expuesta crea grupos de cargas no balanceadas en su superficie. Algunos de los grupos ahora expuestos tienen estructura de silicio, un ácido débil, y otros tienen estructura de aluminio o magnesio, una base débil. Las cargas en los bordes de la placa varían de acuerdo con el pH de la solución.

**Figura 59** Cargas en los Bordes de la Placa de acuerdo al pH



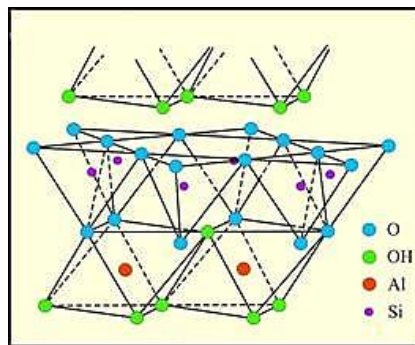
➔ Esto explica por qué los fluidos de perforación son alcalinos, dado que bajo esta condición las partículas de arcilla están cargadas solo negativamente, y por lo tanto las interacciones electrostáticas entre las partículas son mínimas.

**2.3.4 Clases de Arcillas.** Entre sus usos industriales las arcillas son valiosas herramientas para el ingeniero de lodos, puede ser añadida al lodo o puede entrar como contaminante, en cualquier caso es parte activa en el sistema. -Desde el punto de vista de la sedimentación, la arcilla se definía como un término para describir el tamaño de las partículas, pero desde el punto de vista químico y mineralógico, el término “arcilla” se refiere a minerales arcillosos

específicos. Estos minerales arcillosos son minerales cristalinos que tienen una estructura estratificada de sílice y alúmina. Los minerales arcillosos comunes encontrados en la lutita son la esmectita, la illíta, la clorita y la caolinita.<sup>46</sup> Existen un gran número de minerales arcillosos, pero los que nos interesan en la industria de Lodos se pueden clasificar en:

**2.3.4.1 Caolinita.** Está compuesta por una placa tetraédrica y una placa octaédrica de iones de aluminio. Las cargas dentro de la estructura están balanceadas y hay pocas sustituciones de iones. Un fuerte enlace de hidrógeno une dos capas sucesivas de unidades básicas, por lo que no puede ocurrir ningún hinchamiento. Los cristales naturales consisten de aproximadamente 100 capas agrupadas una sobre la otra.

**Figura 60** Estructura de la Caolinita

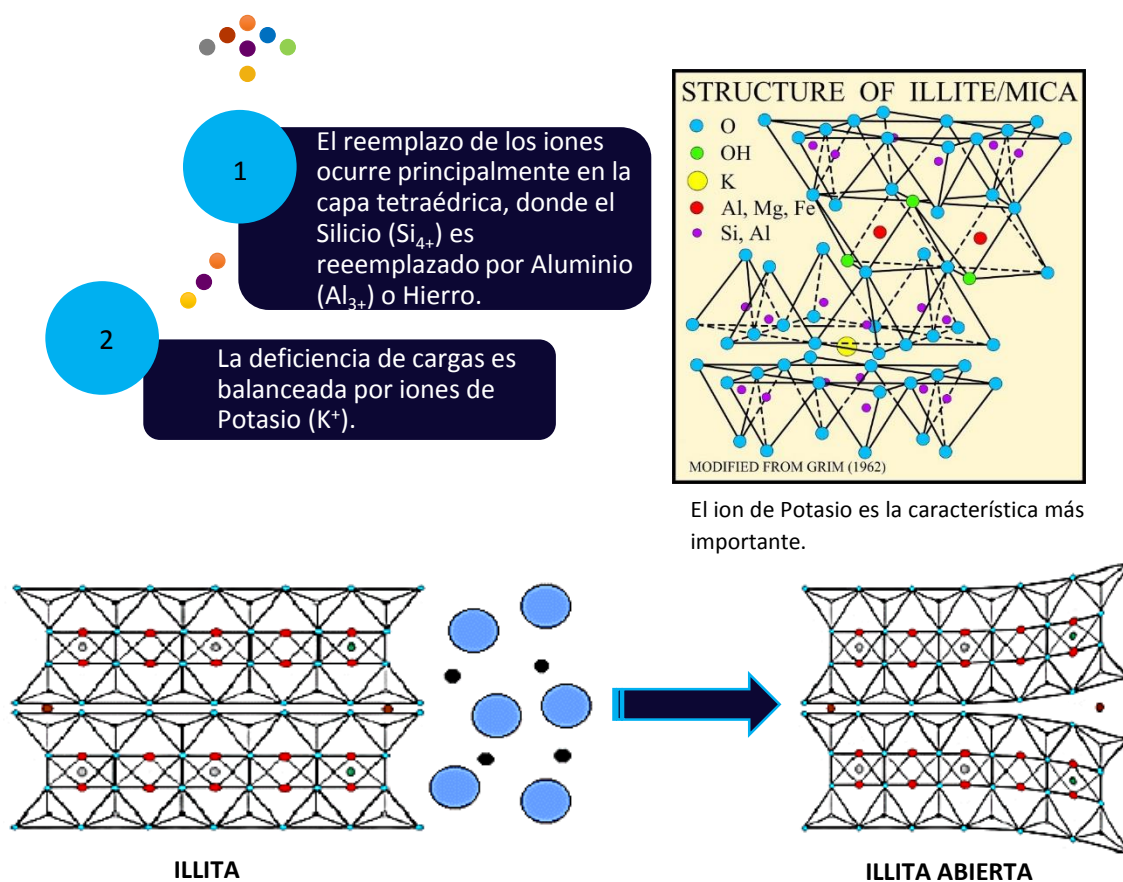


**Fuente:** Modificado de Grim (1963) por William Grham

**2.3.4.2 Mica (Illíta).** Es un mineral compuesto de una placa octaédrica entre dos placas tetraédricas. Sus dos más importantes características son:

<sup>46</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 171 p.

**Figura 61** Estructura de la Mica



**Fuente:** Modificado de Grim (1963) por William Grham

En micas bien cristalizadas uno de cada cuatro átomos de silicio ha sido reemplazado por aluminio. El papel del Potasio en la estructura de la mica es fundamental para comprender la estabilización de arcillas usando salmueras de cloruro de potasio.

Una característica importante de los cationes es la densidad de carga, la cual está determinada por la razón entre el número de cargas y el diámetro del ion. Una alta densidad de carga es el resultado de una carga grande y un diámetro pequeño. La Tabla 19<sup>47</sup> muestra el diámetro de

<sup>47</sup> MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación. Trabajo de Grado para optar título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Químicas, 1992. 127 p.

cationes comunes en estado hidratado y deshidratado<sup>48\*</sup>, dando solo un rango debido a que las diversas técnicas de medición de este valor arrojan diferentes resultados. El ion potasio hidratado es pequeño por lo que fácilmente penetra en los huecos hexagonales en la estructura tetraédrica neutralizando efectivamente la deficiencia de carga en la placa. Como consecuencia, las placas sucesivas se unen fuertemente originando una estructura que no puede dispersarse fácilmente.

**Tabla 19** Radios Iónicos Antes y Después de la Hidratación

ÁTOMO	DIÁMETRO DESHIDRATADO	DIÁMETRO HIDRATADO
Na	1.9	5.5 – 11.2
K	2.66	4.64 – 7.6
Cs	3.34	4.6 – 7.2
Mg	1.30	21.6
Ca	1.90	19.0

**Fuente:** Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación

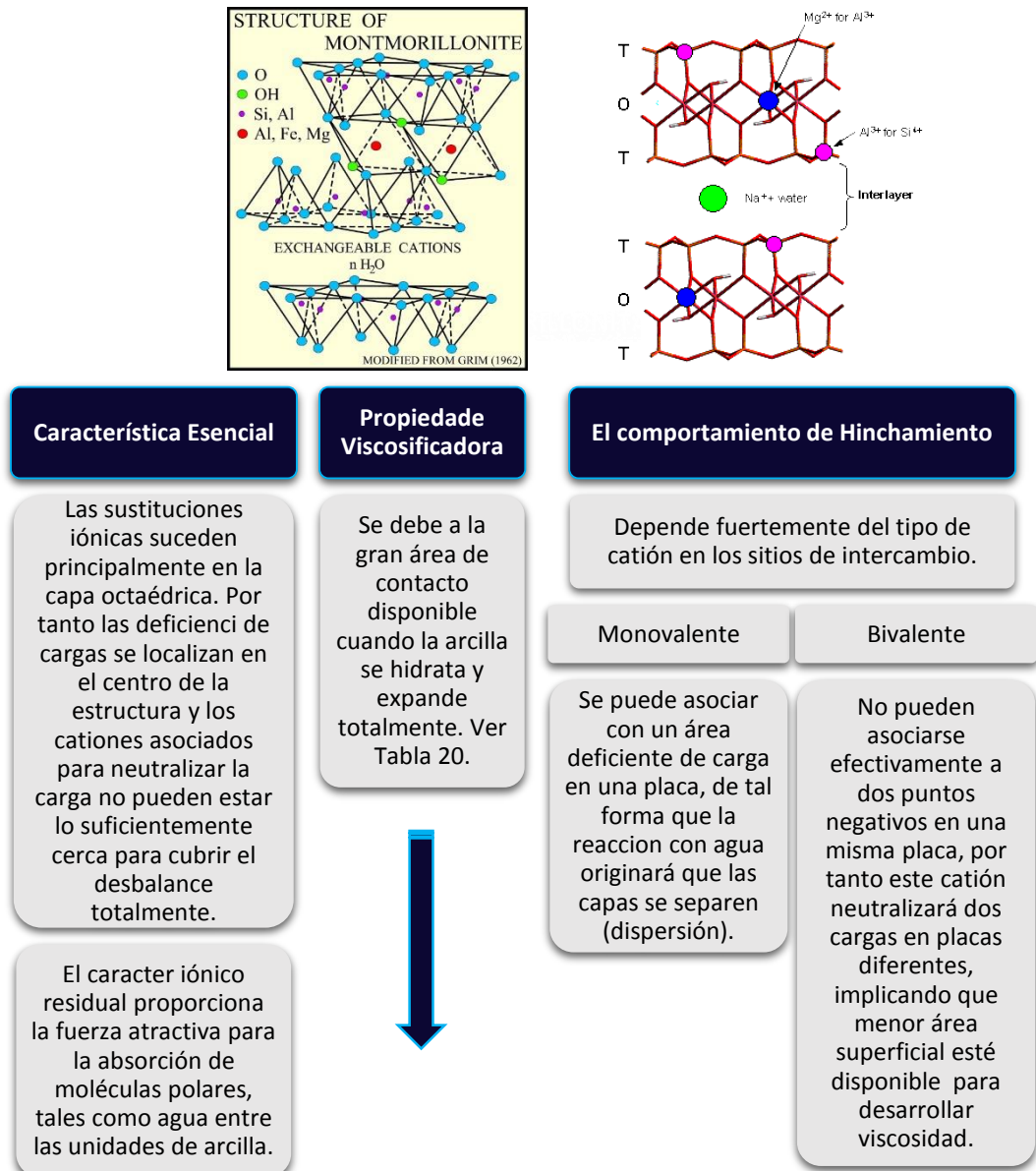
Las micas perfectamente cristalizadas no presentan imperfecciones en sus uniones entre placas, y por tanto son químicamente inactivas. Las micas usadas para el control de las pérdidas de circulación son de este tipo. Las micas encontradas en las lutitas sedimentarias son clasificadas como Illitas, en estos hay menos sustitución de aluminio por silicio y los iones de potasio entre las placas pueden estar parcialmente reemplazada por  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  o  $H^{+}$ . De esta manera, la illita puede ser estabilizada en alguna extensión por medio del tratamiento con potasio.

**2.3.4.3 Montmorillonita.** Su estructura es del mismo tipo que la mica. Es el mineral más común del grupo de minerales conocidos como esmectitas y es el principal mineral que constituye la bentonita.

---

<sup>48\*</sup> \*Las arcillas reaccionan al contacto con el agua provocando una expansión en su estructura y en consecuencia un hinchamiento de las mismas y al hincharse el diámetro del hueco perforado disminuye y las paredes del hueco se desmoronan.

**Figura 62** Montmorillonita



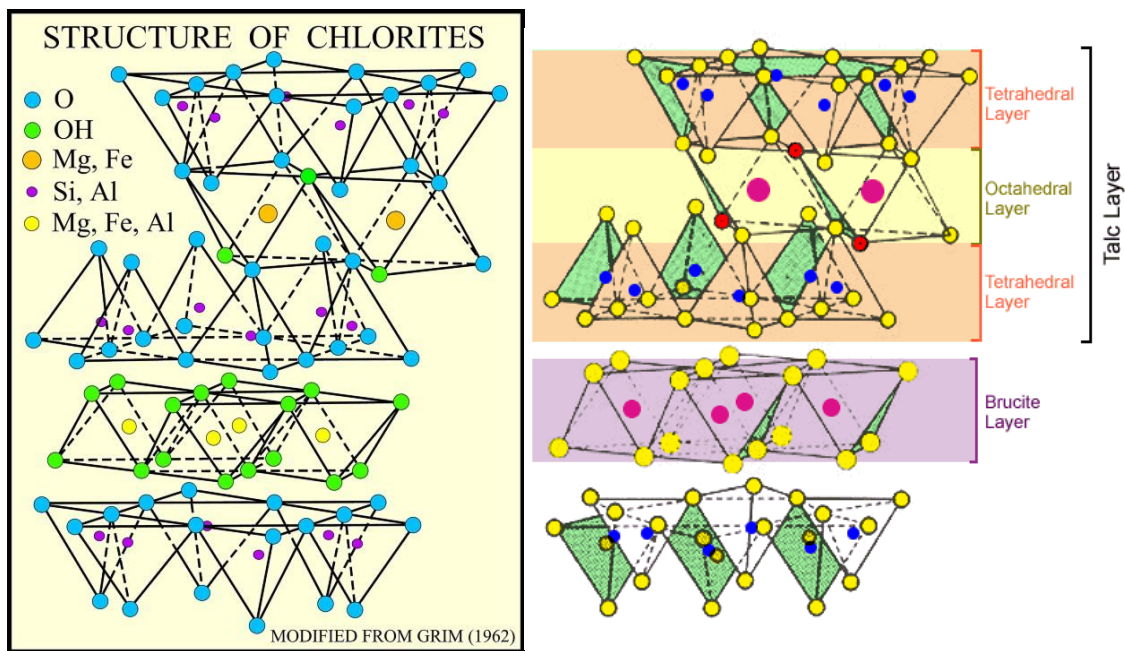
**Tabla 20** Áreas superficiales de Muestras de Arcillas determinadas por Adsorción de Nitrógeno y Vapor de Agua.

Muestra	Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)		Relación Agua/Nitrógeno
	Nitrógeno	Agua	
Na – Bentonita	38	250	6.6
Caolinita	16	12	0.8
Illita	56	82	1.5

**Fuente:** Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación

**2.3.4.4 Clorita.** La estructura de la clorita consiste de capas alternas de mica y brucita, (la brucita es una capa tipo octaédrica con iones metálicos de magnesio). Las deficiencias de carga en la mica son balanceadas por la brucita, y la estructura general es una sucesión de placas unidas por fuertes enlaces similares a los encontrados en la caolinita. Es una arcilla de baja viscosidad.

**Figura 63** Estructura de la Clorita

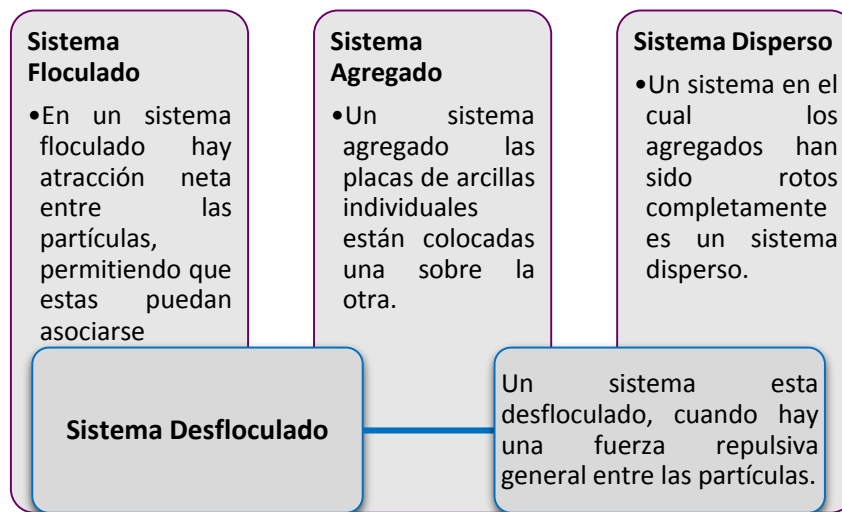


**Fuente:** Modificado de Grim (1963) por William Grham

**2.3.5 Arcillas en los Fluidos de Perforación.** Las arcillas juegan un papel muy importante en los fluidos de perforación, particularmente en los lodos base agua. Las propiedades de flujo y el control de pérdida de filtrado son modificados por tratamiento químico ya sea intencional o por contaminación con materiales como cemento, yeso, sal, sales de magnesio.

**2.3.5.1 Asociación de Partículas de Arcilla.** Las asociaciones de partículas de arcilla son importantes por su influencia en la viscosidad y la pérdida de fluido. Los términos usados para asociación de partículas son:

**Figura 64** Modelos de Asociación de las Partículas de Arcilla



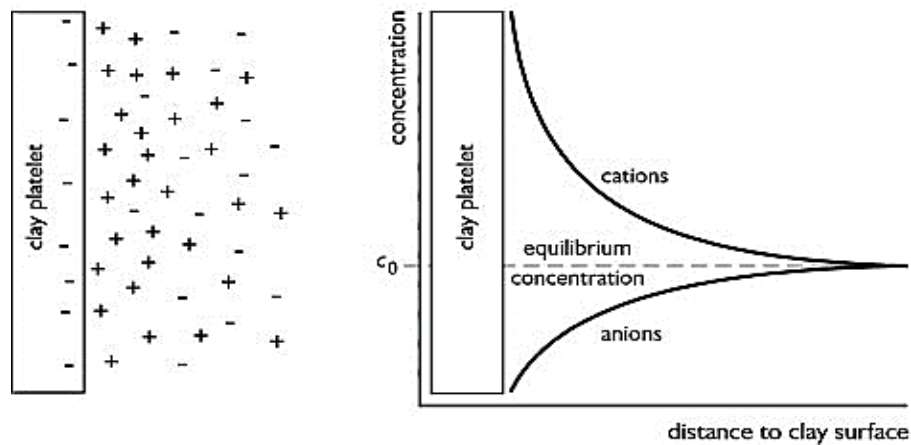
**2.3.5.2 Fuerzas entre Partículas.** Las partículas ejercen entre si fuerzas de atracción o repulsión, y el movimiento Browniano permite que estas se acerquen entre sí. La resultante de las fuerzas atractivas y repulsivas determina que las partículas se aglomeren o no.

- **Fuerzas Repulsivas**

**Repulsión Eléctrica de Capas:**

Las arcillas tienen superficies negativamente cargadas, este desbalance es compensado por adsorción de iones de la solución circundante mediante atracción electrostática. El efecto de atracción superficial y la difusión de iones, dan origen a una capa de hidratación alrededor de la partícula de arcilla con una concentración iónica alta cerca de la superficie y que disminuye gradualmente hasta el valor del medio circundante. El volumen alrededor de la superficie es conocido con capa difusa o capa de Gouy:

Figura 65 Capa Gouy



Fuente:

El grosor de la capa se reduce a medida que aumenta la concentración de sal y la valencia de los iones. Cuando dos partículas de arcilla se acercan, cada una con su atmósfera difusa de iones, se presenta una interferencia que produce variaciones en la distribución de cargas de las capas. Este cambio implica que debe introducirse energía al sistema para lograr unir las partículas, dado que la energía no está disponible, las partículas se repelen conservando el estado de más baja energía. Un aumento en la concentración electrolítica reduce el tamaño de las capas difusas, lo cual implica una disminución de la energía necesaria para alterar las distribuciones de las capas, y permitiendo a las partículas acercarse lo suficiente como para que las fuerzas atractivas superen las fuerzas repulsivas.

#### Desadsorción de Agua:

Las arcillas gracias a su polaridad mantienen una o dos capas de agua unidas estrechamente a la superficie. Para que las partículas puedan aproximarse al máximo, se requiere desplazar el agua. Esta energía repulsiva llega a ser alta cuando las distancias entre partículas son probablemente menores a 10 Angstroms.

#### Repulsión de Bordas:

Esta es una fuerza de repulsión de muy corto alcance, y que se genera cuando el contacto está lo suficientemente cerca para distorsionar los electrones de los átomos. Esta repulsión impide la interpretación de los enrejados de átomos.



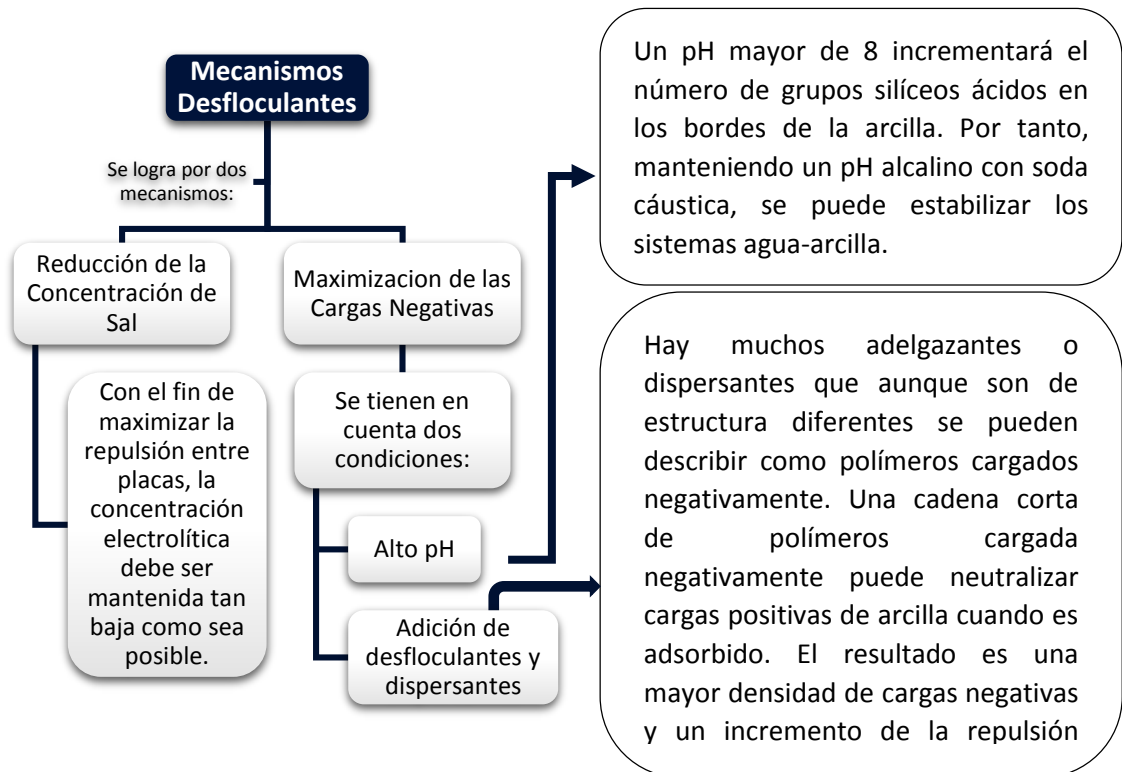
Surgen de dipolos instantáneos debido a la distorsión de la nube electrónica alrededor de cada átomo. Entre dos átomos esta atracción es inversamente proporcional a la distancia a la séptima potencia ( $1/d^7$ ); para dos partículas esféricas esta fuerza es  $1/d^3$ . Así para una estructura grande de átomos como la arcilla, esta fuerza puede ser significativa. La fuerza de atracción es esencialmente independiente de la concentración electrolítica.



- **Fuerzas Atractivas**

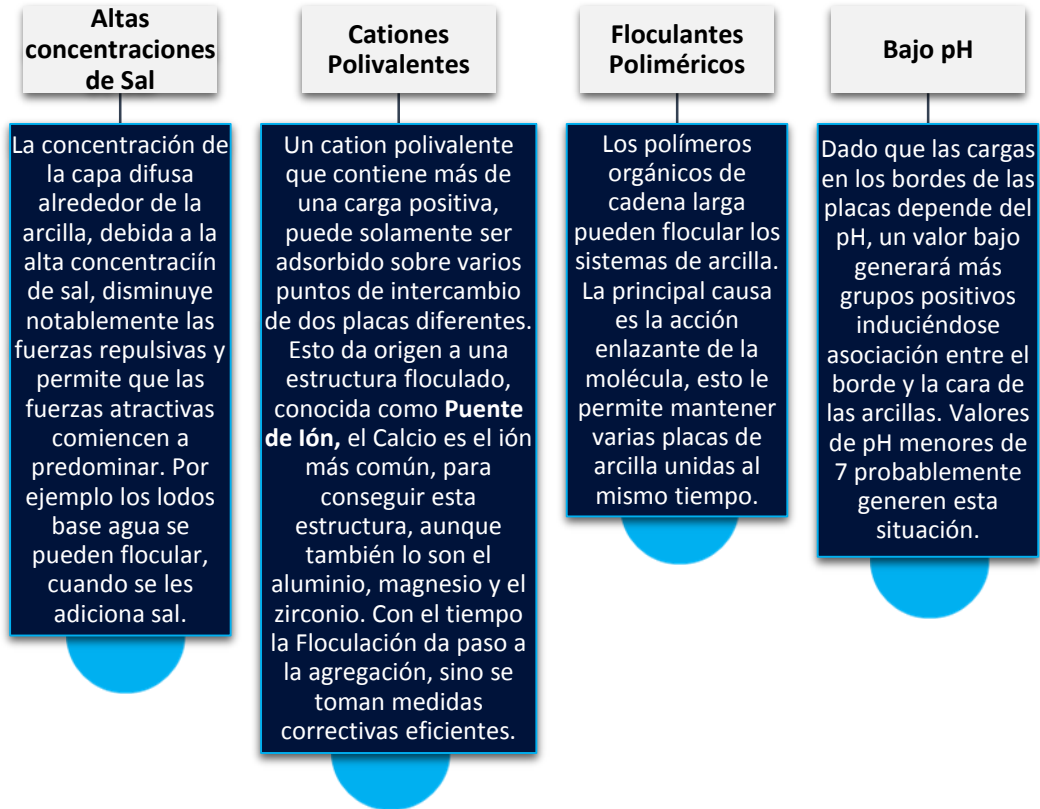
**2.3.5.3 Mecanismos Desfloculantes.** Para mantener un sistema en un estado desfloculado las fuerzas repulsivas deben ser maximizadas.

**Figura 66** Mecanismos Desfloculantes



### 2.3.5.4 Mecanismos de Floculación.

Figura 67 Mecanismos de Floculación



**2.3.5.5 Control de la Viscosidad.** La viscosidad de los fluidos, es el resultado de la interacción entre la fase continua con los sólidos y con los polímeros de alto peso molecular disueltos. Los enlaces débiles entre las fases el sistema son rotos por la acción cortante generada por el flujo, esta da origen al comportamiento tixotrópico de los fluidos. A continuación se presentan los factores que afectan la viscosidad:

Figura 68 Factores que afectan la viscosidad

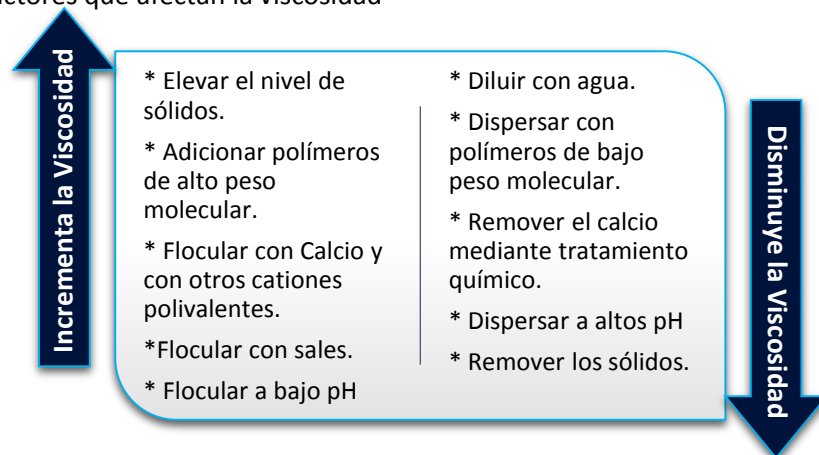
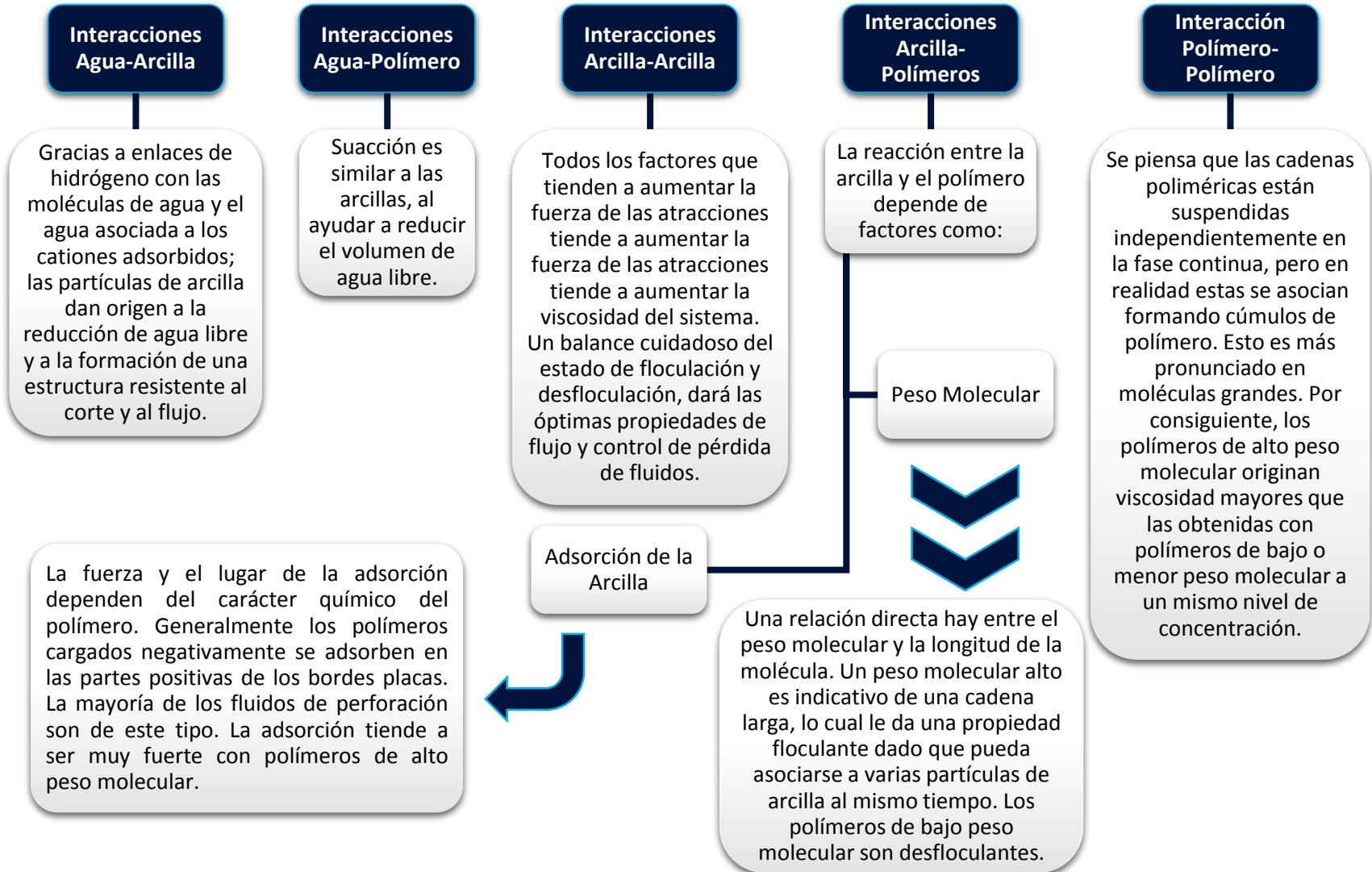


Figura 69 Control de Viscosidad



**2.3.6 Capacidad De Intercambio Catiónico (CEC)<sup>49</sup>.** La mayoría de las rocas sedimentarias contienen diversos tipos de arcilla en cantidades variantes. La reactividad de las rocas sedimentarias depende de los tipos y cantidades de minerales de arcilla presentes en las rocas sedimentarias. Con frecuencia la Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC) es una mejor medida de la reactividad de la arcilla que el análisis mineralógico infrarrojo de difracción por rayos X.

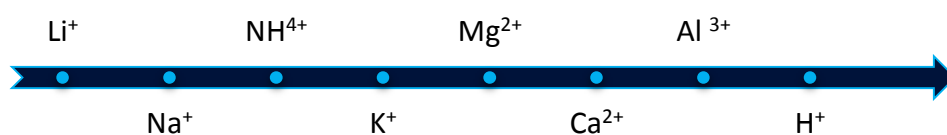
Los cationes compensadores que se absorben en la superficie de la capa unitaria pueden ser cambiados por otros cationes y se llaman cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla es medida como la CEC. La CEC está expresada en miliequivalentes por 100 g de arcilla seca (meq/100g).

**Figura 70** Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g) de Minerales Arcillos Comunes



La manera de evitar el hinchamiento de las arcillas es usando sus propias características. La propiedad más importante para inhibir arcillas es la: **“Propiedad de Intercambio Catiónico”**; la cual consiste en intercambiar un catión de mayor radio iónico por un catión de menor radio iónico. Cuando ocurra este intercambio en la estructura de las arcillas, se lograra minimizar el hinchamiento.

Para hacerse, cada tipo de ion tiene diferentes fuerzas de atracción hacia los sitios de intercambio. Para iguales concentraciones de iones, la capacidad de reemplazo es como sigue en la siguiente escala; así a iguales concentraciones el Calcio desplazará el Magnesio y el Magnesio desplazará el Sodio.



<sup>49</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001.

Es decir, que cualquier catión a la derecha reemplazará a cualquier catión ubicado a su izquierda. 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  $\text{Na}^+$  es considerablemente más alta que la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , el sodio desplazará al calcio.

El intercambio catiónico puede resultar de un cambio de temperatura porque muchos compuestos tienen diferentes relaciones de solubilidad a temperatura. La solubilidad de algunas de las sales cálcicas comunes, tales como  $\text{CaSO}_4$ , 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  $\text{Ca}^{2+}$  de la arcilla tienden a ser reemplazados por los cationes  $\text{Na}^+$  de la solución.

Además 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 y capas de la arcilla que afectan tanto el hinchamiento de la arcilla como la hidratación de la arcilla.

Según el número de cationes presentes, el espacio entre capas de la montmorillonita seca estará comprendido entre 9,8 (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. El espesor de la película de agua absorbida es controlado por el tipo y la cantidad de cationes asociados con la arcilla.

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.

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. La siguiente Tabla<sup>50</sup> contiene un resumen de los minerales arcillosos encontrados comúnmente:

---

<sup>50</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 173 p.

**Tabla 21** Arcillas Encontradas Comúnmente

GRUPO	ESTRUCTUR A	CARGA	CATIÓN DE INTERCAMBIO	DISTANCIA INTERATÓMICA (A)	HINCHAMIENTO
Caolinita	Capa 1:1	Nula	Ninguno	7.2	Ninguno
Talco	Capa 2:1	Nula	Ninguno	9.3	Ninguno
Esmectita	Capa 2:1	0.3 – 0.6	Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	11 - 15	Variable
Vermiculita	Capa 2:1	1 - 4	K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	14 - 15	Variable
Ilita	Capa 2:1	1.3 - 2	K <sup>+</sup>	10	Nulo
Mica	Capa 2:1	2	K <sup>+</sup>	10	Ninguno
Clorita	Capa 2:2	Variable	Capa de Brucita	14	Nulo
Sepiolita	Cadena 2:1	Nula	Ninguno	12	Nulo
Paligorskita	Cadena 2:1	Menor	Ninguno	10.5	Nulo

**Fuente:** Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación

**2.3.6.1 Prueba de Azul de Metileno (MTB)<sup>51</sup>.** En la prueba se determina la cantidad y capacidad de intercambio catiónico de las bentoníticas dispersas en el sistema de lodo; es decir, mide la habilidad de la arcilla para absorber cationes de la solución (atraer iones positivos) mantenerlos sobre la superficie de las partículas.

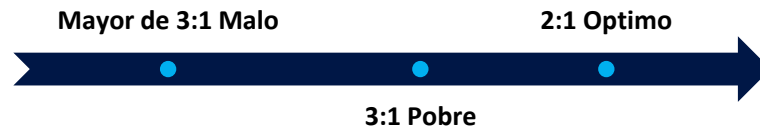
$$\frac{\text{lb}}{\text{Bb}} \text{ de Bentonita (MBT)} = 5 * \frac{\text{cc de Azul de Metileno usado}}{\text{cc de muestra de lodo}} \quad (31)$$

↓  
Capacidad de intercambio “CEC” [meq/mL]

Realizada la prueba correctamente el valor de MBT reportado como libras de bentonita por barril de lodo<sup>52\*</sup> mostrará la capacidad de intercambio catiónico de los materiales que constituyen el porcentaje de sólidos en el lodo, estos serán principalmente arcillas provenientes de la bentonita comercial que ha sido agregada al lodo y los sólidos activos incorporados al sistema durante la perforación del pozo.

<sup>51\*</sup> El valor MBT reportado como libras de bentonita por barril de lodo, se toma como “Bentonita equivalente de los sólidos” y no como “bentonita comercial” en el sistema.

El total de sólidos de baja gravedad incluyen la bentonita comercial agregada y los sólidos perforados activos e inertes. La relación de sólidos perforados (DS) a bentonita comercial (B) es un indicativo de la condición de un lodo no disperso de bajo contenido de sólidos; para este tipo de lodo no densificado la relación de sólidos perforados a bentonita debe ser como de 3 a



1; para lodos densificados la relación no debe exceder de 2 a 1.

Para rangos de sólidos perforados a bentonita comercial malo y pobre es necesario la remoción de sólidos y adición de bentonita. El contenido de sólidos partiendo de la prueba MBT se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$LGS = DS + B \quad (32)$$

$$\% LGS = 100 * F_{BG} \quad (33)$$

$$LGS = 350 * GE_{BG} * F_{BG} \quad (34)$$

$$B = 1.138 * (MBT - \%LGS) \quad (35)$$

$$\%B = \frac{MBT - \%LGS}{8}$$

Donde:

**LGS** → Sólidos de Baja Gravedad [Lb/Bb]

**DS** → Sólidos Perforados [Lb/Bb]

**B** → Bentonita Comercial [Lb/Bb]

**F<sub>BG</sub>** → Fracción de Sólidos de Baja Gravedad

**ρ<sub>BG</sub>** → Densidad de Sólidos de baja gravedad [g/cc]

**MBT** → Valor obtenido de la prueba de Azul de Metileno

**2.3.6.2 Ejemplo<sup>53</sup>.** Con los siguientes datos hallar la relación sólidos perforados-Bentonita:

Peso del Lodo: 9,2 lb/gal

% Sólidos: 6

% Aceite: 0

% Agua: 94

MBT: 20 lb/Bb

Debido a la baja densidad del lodo, predominan sólidos de baja gravedad específica (2,65).

**Solución:**

$$V_{AG} * GE_{AG} = 9,4 * 1 = 0$$

$$V_o * GE_o = 0$$

$$V_s * GE_s = V_{BG} * \rho_{BG} = V_{BG} * 2,65$$

$$V_L * GE_L = 10 * (9,2 \text{ [lb/gal]} / 8,33 \text{ [lb/gal]}) = 10 * 1,104$$

$$9,4 * 1 + V_{BG} * 2,65 = 10 * 1,1 \quad \rightarrow \quad V_{BG} = 0,604 \text{ cc} \quad \rightarrow \text{Volumen de Sólidos de baja Gravedad}$$

$$\text{Fracción de sólidos de baja gravedad} = 0,604/10 = 0,0604$$

$$\%LGS = 0,0604 * 100 = 6,04 \rightarrow \text{Porcentaje de Sólidos de baja gravedad}$$

$$LGS = 0,0604 * 2,65 * 350 = 56,021 \text{ [Lb/Bb]} \rightarrow \text{Sólidos de Baja gravedad}$$

$$B = (20 - 6,04) * 1,138 = 15,9 \text{ [Lb/Bb]} \rightarrow \text{Bentonita Comercial}$$

$$\%B = (20 - 6,04) / 8 = 1,745 \rightarrow \text{Porcentaje de Bentonita Comercial}$$

$$DS = 56,021 - 15,9 = 40,121 \text{ [Lb/Bb]} \rightarrow \text{Sólidos Perforados}$$

\*Relación de Sólidos Perforados a Bentonita Comercial (DS/B):

$$\frac{40,121}{15,9} : \frac{2,52}{1}$$

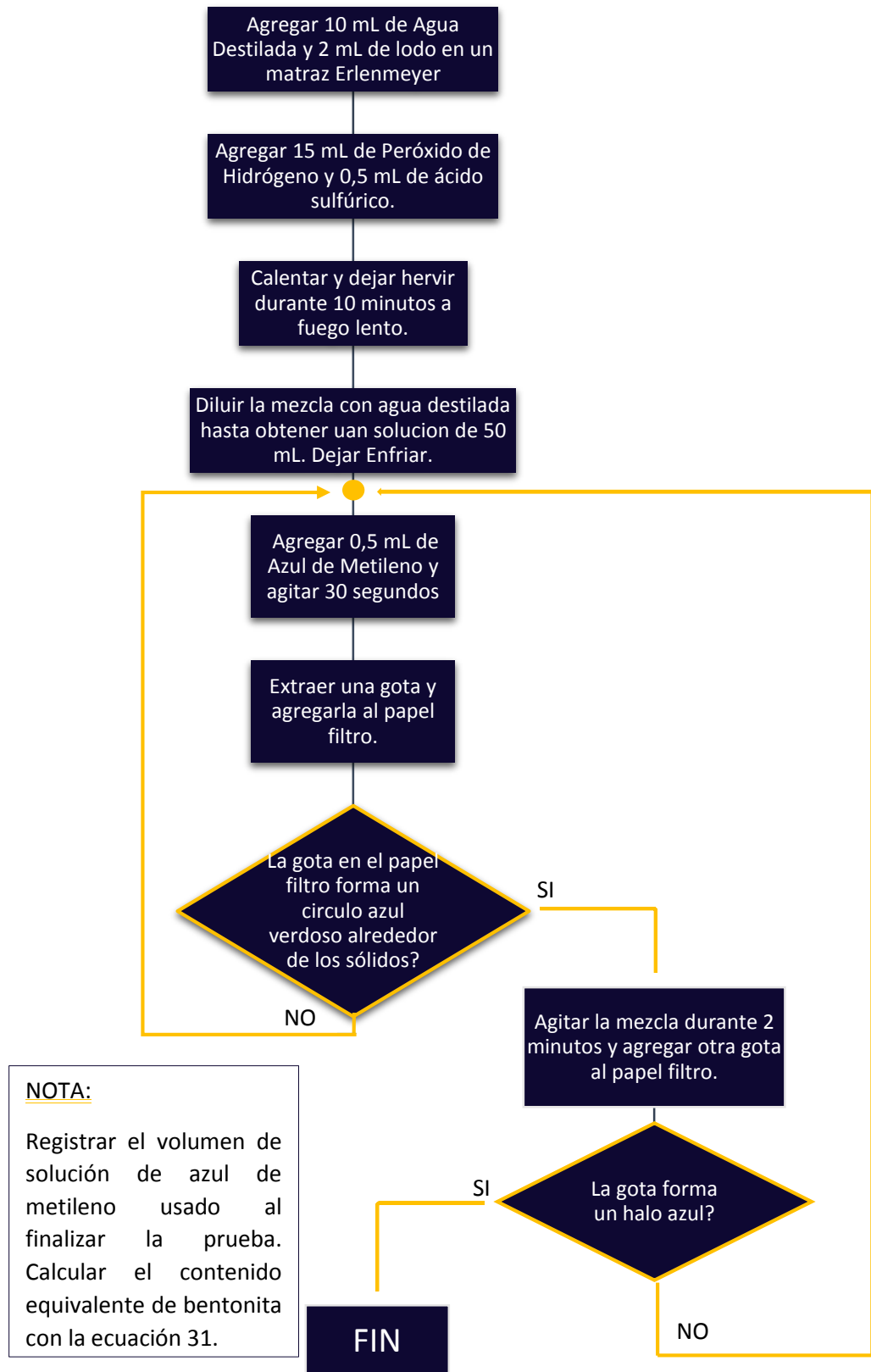
De acuerdo a los valores recomendados la relación es buena.

---

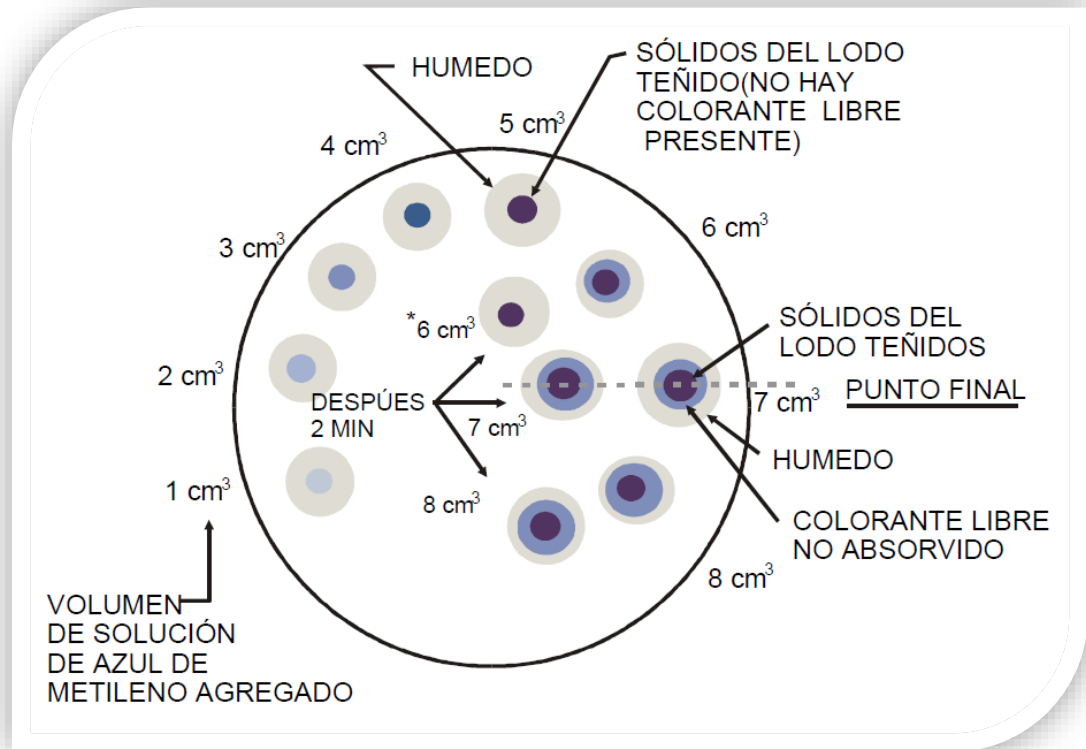
<sup>53</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. 67 p.

## PROCEDIMIENTO PARA HALLAR EL MBT:

Figura 71 Proceso Prueba Azul de Metileno



**Figura 72** Pruebas de Gotas para el punto final de la titulación con Azul de Metileno



**Fuente:** Manual de Fluidos de Perforación PDVSA

**NOTA:**

La prueba MBT debe ser realizada usando químicos frescos; especialmente el peróxido de hidrógeno cuyo objeto es eliminar el efecto de materiales orgánicos tales como CMC, Poliácridatos, lignosulfonatos y lignitos, los cuales también capacidad de absorber el azul de metileno, lo cual daría una prueba incorrecta. Se recomienda el uso de 2 cc de lodo en vez de uno para realizar la prueba, esto produce un mejor punto final.

Cada gota removida de líquido colocada en el papel filtro para indicar la aparición de la aureola azul verdosa sobre los sólidos se debe enumerar y colocar en ella los (cc) de azul de metileno gastados.

### 2.3.7 Laboratorio 3

#### RENDIMIENTO DE LAS ARCILLAS

##### 1) **Introducción**

Las arcillas se encuentran entre los materiales indispensables del ingeniero de lodos, éstas proporcionan al lodo muchas propiedades. Una de sus generosidades es la capacidad de aumentar la viscosidad del fluido. Nuestra industria constantemente está evaluando la relación costo-beneficio, es aquí que el rendimiento de las arcillas (medida de su calidad y efectividad) importa, una arcilla tendrá mayor rendimiento que otra. Eso significa ahorro, menos almacenamiento etc.

##### 2) **Objetivos**

- Observar el comportamiento de diferentes arcillas cuando se mezclan con agua dulce.
- Estudiar el rendimiento de las arcillas con agua que contienen compuestos.

##### 3) **Temas de Investigación**

- Uso de las arcillas
- Características de las Arcillas
- Rendimiento de los Viscosificantes
- Tipos de Arcillas

##### 4) **Material Utilizado**

- Arcilla Natural
- Bentonita
- Sal
- Viscosímetro rotatorio de Cilindro concéntrico FANN
- Termómetro

**5) Procedimiento experimental**

Preparar las siguientes muestras:

- a) 1 Bb eq de Agua Dulce + 10 Lb/Bb de Arcilla Natural en cada etapa y medir la viscosidad aparente, hasta lograr una viscosidad aparente mayor de 15 cP.
- b) 1 Bb eq de Agua Dulce + 8 Lb/Bb de Bentonita en cada etapa y medir la viscosidad aparente, hasta lograr una viscosidad aparente mayor de 15 cP.
- c) 1 Bb eq de Agua Dulce + 30 Lb/Bb de NaCl + 7 Lb/Bb de Bentonita en cada etapa y medir la viscosidad aparente, hasta lograr una viscosidad aparente mayor de 15 cP.
- d) 1 Bb eq de Agua Dulce + 3 Lb/Bb de Aquagel en cada etapa y medir la viscosidad aparente, hasta lograr una viscosidad aparente mayor de 15 cP.

**6) Tabulación de Datos**

- Realizar una gráfica de viscosidad aparente contra porcentaje en peso (%p/p) de los viscosificantes para cada etapa.
- Hallar el rendimiento de cada uno de los viscosificantes.

**Tabla 22** Laboratorio 3: Rendimiento de las Arcillas

MUESTRA	MASA VISCOSIFICANTE (LB)	% P/P VISCOSIFICANTE	$\Theta_{600}$	$V_A$
A				
B				
C				
D				

**7) Cuestionario**

- a) ¿Por qué la montmorillonita sódica tiene mayor hinchamiento en agua dulce que en agua salada?
- b) Mencione y Explique los factores que afectan el rendimiento de las arcillas.
- c) Realice un mapa conceptual de los tipos de arcillas y viscosificantes usados en los fluidos de perforación.
- d) ¿Por qué la viscosidad es un factor tan importante en los fluidos de perforación?

## 2.3.8 Laboratorio 11

### PRUEBA DE AZUL DE METILENO

#### 1. Introducción

La capacidad de azul de metileno de un lodo, es el indicador de la cantidad de arcillas reactivas (bentonita comercial y/o en sólidos perforados) presentes en él. Esta prueba provee una estimación de la capacidad total de intercambio de cationes de los sólidos (arcillas) de un lodo.

#### 2. Objetivos

- Determinar la capacidad de intercambio catiónico (CEC) de las arcillas.
- Estudiar la importancia de esta prueba como complemento a la prueba de la retorta para la composición de los sólidos presentes en el lodo.
- Determinar la resistividad del lodo, la retorta y del filtrado, para entender su aplicación práctica.

#### 3. Temas de Investigación

- Resistividad del lodo, del filtrado y de la torta.
- Sólidos de baja y alta gravedad
- Capacidad de intercambio catiónico

#### 4. Material Utilizado

- Frasco Erlenmeyer de 250-mL
- Pipetas de 1-mL
- Cilindro graduado de 25-mL
- Varilla agitadora
- Calentador eléctrico
- Agua destilada
- Solución de azul de metileno (3.74 g/L; 1 mL = 0.01 meq)
- Solución peróxido de hidrógeno 3%
- Solución ácido sulfúrico 0,5N
- Papel de filtro API

## 5. Procedimiento experimental

- A. 3 bbl eq con 20 lpb de bentonita y 1.2 lpb de Pac-L + 12 lpb de arcilla natural + 10 lpb de barita + 10 lpb de arcilla natural + 25 lpb de sal.
- B. Lodo 2: 3 bbl equ con 15 lpb de bentonita + 10 lpb de arcilla natural + 10 lpb de barita + 10 lpb de arcilla natural + 20 lpb de sal.
- C. Lodo 3: 3 bbl eq con 20 lpb de bentonita + 10 lpb de arcilla natural + 10 lpb de arcilla natural + 10 lpb de sal.

## 6. Tabulación de Datos

A cada una de las muestras anteriores hallar las siguientes propiedades:  $V_a$ ,  $V_p$ ,  $Y_p$ , %Sólidos de baja y alta gravedad, %arena, pérdidas de filtrado, resistividad del lodo ( $R_m$ ), resistividad del filtrado ( $R_{mf}$ ), resistividad de la torta ( $R_{mc}$ ) y la cantidad total equivalente de bentonita.

**Tabla 23** Laboratorio 11: Prueba Azul de Metileno Parte A

Muestra	$V_p$	$Y_p$	$V_a$	Gel a 10 Seg	$R_m$	$R_{mf}$	$R_{mc}$
A							
B							
C							

**Tabla 24** Laboratorio 11: Prueba Azul de Metileno Parte B

Muestra	%Arena	Filtrado API	%Sólidos	MBT (Lpb)
A				
B				
C				

## 7. Cuestionario

- A. Un lodo tiene un incremento de 5% en el % de sólidos, ¿si los sólidos incrementados son inertes, hay incremento en el MBT? Explique.
- B. ¿Físicamente qué significado tiene la capacidad de azul de metileno?
- C. ¿Cómo es el cambio en la resistividad de un lodo cuando disminuye la salinidad?
- D. ¿Cuál es el objetivo del uso de peróxido de hidrógeno en esta prueba?

## 2.4 PROPIEDADES DE FLUJO Y DENSIDAD DE LOS LODOS

**2.4.1 Modelos Reológicos.** Un modelo reológico es una descripción de la relación entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) que experimenta el fluido y la tasa de corte ( $\gamma$ ). Para un fluido Newtoniano, la relación del esfuerzo de corte a la tasa de corte es constante. Esta constante es la viscosidad ( $\mu$ ) del fluido. Así, la ecuación que describe la reología de un fluido Newtoniano se puede expresar como:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (37)$$

Donde:

$\mu$  → Viscosidad, poise (dina-seg/cm<sup>2</sup>)

$\tau$  → Esfuerzo de corte (fuerza/área), (dinas/cm<sup>2</sup>)

$\gamma$  → Tasa de corte, (seg<sup>-1</sup>)

La ecuación se denomina “**ley de viscosidad de Newton**”.

Todos los gases y fluidos sencillos como el agua a temperatura y presión ambiente presentan un comportamiento que puede ser descrito por esta ecuación.

Los fluidos que no presentan comportamientos para ser descritos por la ley de Newton son denominados como no Newtonianos. Para estos fluidos la viscosidad cambia con la variación en la velocidad de corte (tasa de corte).

La mayoría de fluidos de perforación son no newtonianos y para darles un verdadero significado cada medición de viscosidad que se les haga debe especificar siempre la tasa de corte. El término “viscosidad efectiva” ( $\mu_e$ ) se utiliza para diferenciar las mediciones de la viscosidad en fluidos no Newtonianos en relación con los Newtonianos. La viscosidad efectiva siempre se mide o calcula a la tasa de corte que se corresponde con las condiciones de flujo existentes en el pozo o tubería perforación.

**2.4.1.1 Modelo Newtoniano.** El comportamiento reológico los fluidos Newtonianos puede expresarse de una fácilmente con una ecuación matemática simple, conocida como modelo Newtoniano. Para desarrollar esta representación solo se requiere conocer el esfuerzo de corte a una sola tasa de corte. Y está definido por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (38)$$

Donde:

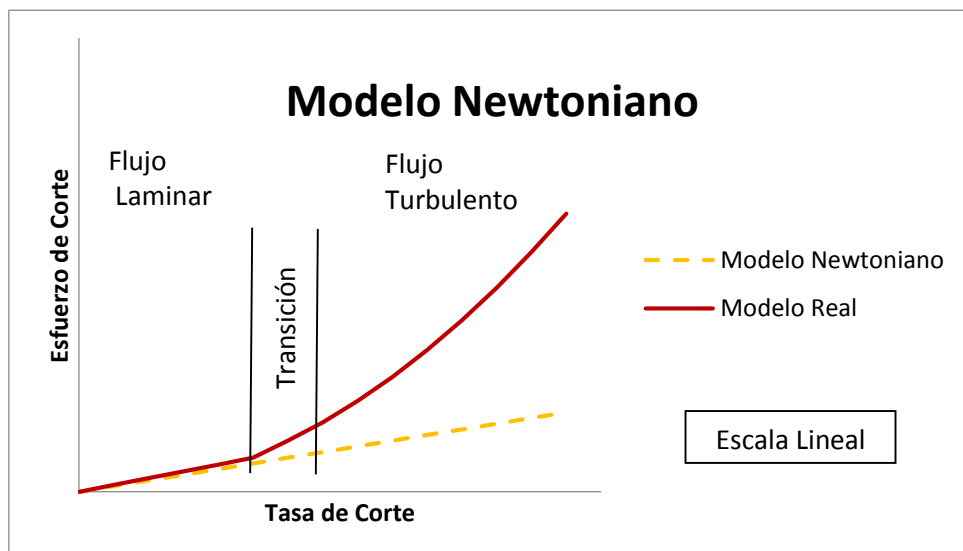
$\frac{F}{A}$  → Esfuerzo de corte ( $\tau$ )

$\mu$  → Viscosidad del fluido

$\frac{dv}{dr}$  → Tasa de corte

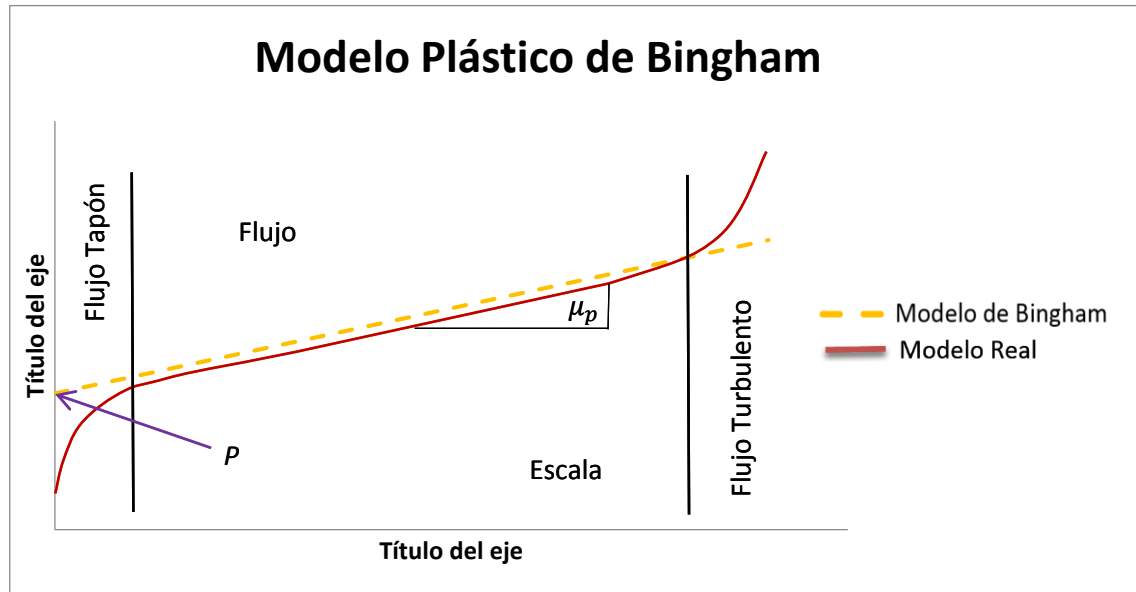
En este modelo la relación lineal que se expresa para el esfuerzo de corte y la tasa de corte solo es válida para flujo laminar. La siguiente figura muestra el comportamiento real de un fluido Newtoniano y la aproximación matemática del modelo.

**Figura 73** Esfuerzo de corte vs Tasa de corte para un fluido real y uno modelado por la ecuación de flujo de Newton.



**2.4.1.2 Modelo plástico de Bingham.** La mayoría de los fluidos de perforación exhibe un comportamiento mucho más complejo de caracterizar que los fluidos Newtonianos y se han desarrollado varios modelos que describen de forma parcial su comportamiento siendo el modelo de Bingham uno de ellos. Este modelo tiene gran aplicación en el campo debido a que, a pesar de ser muy simple, proporciona buenos resultados.

**Figura 74** Esfuerzo de corte vs Tasa de corte para un fluido real y uno modelado por la ecuación de Bingham.



El modelo supone que el esfuerzo de corte es una función lineal de la tasa de corte, una vez se ha excedido un esfuerzo corte específico (el esfuerzo de corte umbral o punto cedente) y se expresa como:

$$\tau = PC + \mu_p(\gamma) \quad (39)$$

Donde:

$PC \rightarrow$  Punto Cedente (libras/100 pies<sup>2</sup>)

$\mu_p \rightarrow$  Viscosidad plástica (centipoise)

El modelo se apoya en datos suministrados por el viscosímetro de Fann VG de dos velocidades a tasas de corte de 500 y 1000 ( $seg^{-1}$ ). El  $PC$  y  $\mu_p$  se calculan a partir de datos obtenidos a 600 y 300 rpm, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (40)$$

Donde:

$\theta_{600} \rightarrow$  Lectura del cuadrante para 600 rpm.

$\theta_{300} \rightarrow$  Lectura del cuadrante para 300 rpm.

$$PC = \theta_{300} - \mu_p \quad (41)$$

La tasas de corte en rpm multiplicada por 1,702, da la tasa de corte en  $seg^{-1}$ , para los reómetros convencionales utilizados en campos petroleros

**2.4.1.3 Ley de Potencia.** Los cálculos basados en el modelo de Bingham han dado con mucha frecuencia resultados muy diferentes de las condiciones reales de pozo. Esto se explica por qué las velocidades de corte en el espacio anular están, frecuentemente, en un rango donde dicho modelo difiere del comportamiento reológico del fluido.

El modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte graficado en función de la tasa de corte es una línea recta, cuando se utiliza papel de coordenadas doblemente logarítmicas. Debido a que se aproxima más al comportamiento de un fluido de perforación a bajas tasas de corte, en comparación con el modelo plástico de Bingham, con frecuencia se emplea para monitorear las características de suspensión y calcular la pérdida de presión del fluido de perforación en el anular. El modelo de ley de potencia está descrito por la siguiente ecuación:

$$\tau = K\gamma^n \quad (42)$$

Donde:

$K \rightarrow$  Índice de consistencia del fluido, (lb seg<sup>n</sup>/100 pies<sup>2</sup>)

$n \rightarrow$  Exponente de la ley exponencial (adimensional)

Las lecturas del cuadrante del viscosímetro para un instrumento estándar de 6 velocidades se pueden emplear para determinar las constantes de la ley de potencia. La práctica usual consiste en utilizar las lecturas de 3 rpm y 100 rpm para la tasa baja de corte y las lecturas de 300 rpm y 600 rpm para el intervalo de altas tasas de corte. Las formulas generales para los parámetros de “n” y “K” son:

$$n = \frac{\log(\tau_2/\tau_1)}{\log(\gamma_2/\gamma_1)} \quad (43)$$

$$K = \frac{\tau_2}{(\gamma_2^n)} \quad (44)$$

Donde:

$\tau_2 \rightarrow$  Lectura del esfuerzo de corte a la tasa de corte más alta.

$\tau_1 \rightarrow$  Lectura del esfuerzo de corte a la tasa más baja.

$\gamma_2 \rightarrow$  Tasa de corte más alta (rpm).

$\gamma_1 \rightarrow$  Tasa de corte más baja (rpm).

Si se utilizan las lecturas del cuadrante del reómetro a 600 y 300 rpm, las ecuaciones se simplifican como sigue:

$$n = 3,32 \log\left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}\right) \quad (45)$$

$$K = \frac{300}{511^n} \quad (46)$$

**2.4.1.4 Modelo de Herschel-Buckley (Modelo de la Ley Exponencial Modificado).** Este modelo combina las características de los modelos Newtoniano, Plástico de Bingham y de la ley Exponencial. Es un modelo de tres parámetros que reproduce los resultados de los tres modelos anteriores cuando se han medido los parámetros adecuados. Desafortunadamente, los tres parámetros son difíciles de derivar en base a las lecturas del reómetro. En la práctica se supone que el PC es igual a la lectura de 3 rpm.

En base a este supuesto se calcula “n” y “K” de la siguiente formula:

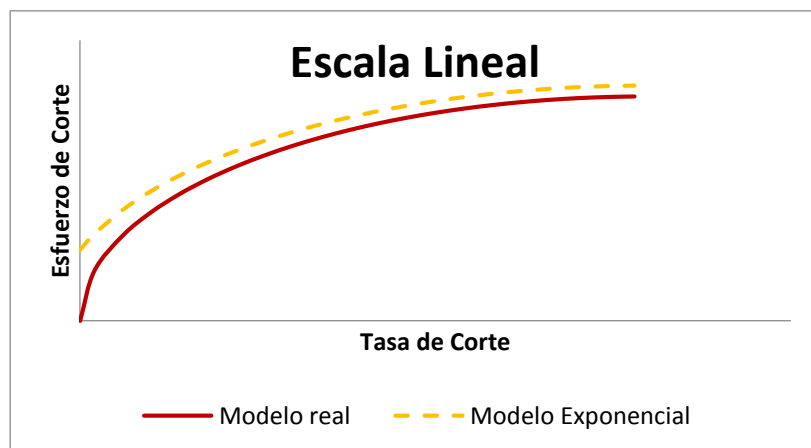
$$\tau = PC + K\gamma^n \quad (47)$$

$$PC = \theta_3, (\text{LB}/100 \text{ pies}^2)$$

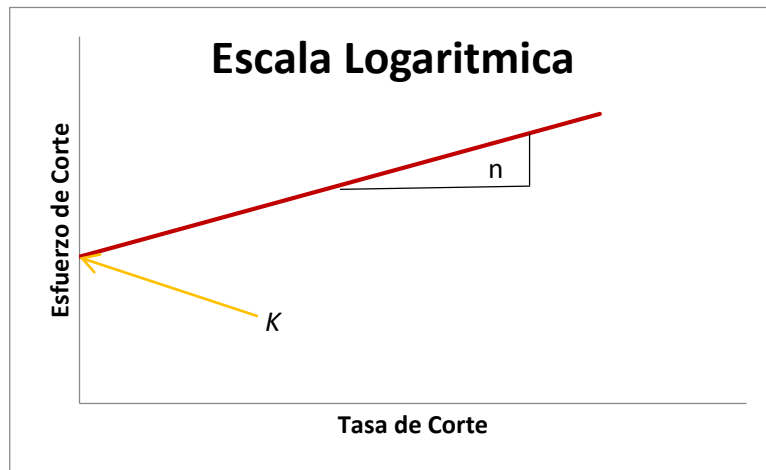
$$n = 3,32 * \text{Log} \left[ \frac{\theta_{600} - PC}{\theta_{300} - PC} \right] \quad (48)$$

$$K = \theta_{300} / 511^n \quad (49)$$

**Figura 75** Comportamiento de un Fluido Real y uno modelado por la Ley de Potencia



**Figura 76** Comportamiento del Modelo de Ley de Potencia en Escala Logarítmica



La siguiente Tabla<sup>54</sup> presenta el comportamiento de los modelos reológicos en los diferentes regímenes de flujo:

**Tabla 25** Comportamiento de los Modelos Reológicos en los diferentes Regímenes de Flujo

MODELO	TAPÓN	LAMINAR	TURBULENTO
<b>Newtoniano</b>	Reproduce el comportamiento real	Reproduce el comportamiento real	Estima valores menores de esfuerzo de corte
<b>Bingham</b>	Estima valores mayores de esfuerzo de corte	Reproduce el comportamiento real	Estima valores menores de esfuerzo de corte
<b>Ley de Potencia</b>	Estima valores menores que el comportamiento real	Reproduce el comportamiento real	Estima valores mayores de esfuerzo de corte

**Fuente:** Modificado de Manual de Hidráulica CIED

**2.4.2 Densidad de los Lodos.** Ver Sección 2.3.6.1, ahí encontrará Incremento, Reducción, Cálculo de Densidad y Balance de Masa para variar la densidad.

<sup>54</sup> Manual de Hidráulica CIED. Reología Hidráulica y Mechas de perforación. Cap. 1. 21 p.

**2.4.3 Control de sólidos.** El control de sólidos es el proceso de controlar la acumulación de sólidos indeseables en un sistema de lodos. La acumulación de sólidos tiene efectos indeseables sobre el rendimiento del fluido de perforación y sobre el proceso de perforación. Las propiedades reológicas y de filtración pueden hacerse difíciles de controlar cuando la concentración de sólidos de perforación (sólidos de bajo peso específico) se vuelve excesiva. Los índices de penetración y la vida útil del trépano decrecen y los problemas del pozo aumentan con una alta concentración de sólidos de la perforación.

Los equipos de control de sólidos en una operación de perforación deben ser manejados como una planta de procesamiento. En una situación ideal, todos los sólidos de la perforación son removidos del fluido de perforación.

Bajo condiciones de perforación típicas, los sólidos de bajo peso específico deben ser mantenidos por debajo del 6 por ciento en volumen.

**2.4.3.1 Procedencia y tamaños de los sólidos.** Las dos fuentes principales de sólidos (partículas) son los aditivos químicos y los recortes de la formación. Los recortes de la formación son contaminantes que degradan el rendimiento del fluido de perforación. Si no se remueven los recortes, serán molidos y reducidos a partículas más y más pequeñas que se hacen más difíciles de remover del fluido de perforación.

La mayor parte de los sólidos de la formación pueden ser removidos por medios mecánicos en la superficie. Las partículas pequeñas son más difíciles de remover y tienen un efecto mayor sobre las propiedades del fluido de perforación que las partículas más grandes. El tamaño de partículas de sólidos de perforación incorporadas en el fluido de perforación puede variar entre 1 y 250 micrones (1 micrón es igual a 1/25.400 de pulgada ó 1/1.000 de milímetro).

**Tabla 26** Tamaños aproximados de los Sólidos Contaminantes

MATERIAL	DIÁMETRO MICRONES	MALLA DE TAMIZ REQUERIDA PARA REMOVER	DIÁMETRO PULGADAS
Arcilla	1	-	0,00004
Coloides Bentonita	5	-	0,0002
Silt (limo) Baritas Polvo de cemento	44-6	1.470-400	0,00004-0,0015
Arena Fina	44	325	0,0015
	53	270	0,002
	74	200	0,003
Arena Mediana	105	140	0,004
	149	100	0,006
Arena Gruesa	500	35	0,020
	1000	18	0,040

**Fuente:** Modificado de Manual de Fluidos de BAROID Cap. 10-3

**2.4.3.2 Equipos mecánicos de remoción de sólidos.** Uno de los métodos de control de sólidos es el uso de equipos mecánicos de remoción de sólidos. Los equipos que remueven sólidos mecánicamente se pueden clasificar en dos grupos principales:

- Dispositivos tamizadores
- Dispositivos de separación centrífuga

A continuación se identifica los tamaños de partícula que el equipo puede remover.

**Tabla 27** Equipos de control de sólidos y amplitudes efectivas de funcionamiento en micrones

EQUIPO DE CONTROL DE SÓLIDOS	TAMAÑO DE PARTÍCULAS REMOVIDAS
Dispositivos tamizadores	Corte de 61 micrones con criba de malla 250
Centrífugas decantadoras	Sólidos coloidales hasta de 5 micrones
Hidrociclones	Sólidos de 20-70 micrones, dependiendo del tamaño del cono

**Fuente:** Modificado de Manual de Fluidos de BAROID Cap. 10-4

#### **Dispositivos tamizadores.**

El dispositivo separador más común es una zaranda, que contiene uno o más tamices vibratorios que el lodo atraviesa a medida que circula fuera del pozo. Las zarandas se clasifican en zarandas de movimiento circular/elíptico o lineal.

**Zaranda de movimiento circular/elíptico.** Esta zaranda emplea rodillos elípticos que generan un movimiento circular de vaivén para obtener una mejor remoción de sólidos a través de los tamices.

**Zaranda de movimiento lineal.** Este colador emplea un movimiento de vaivén recto hacia adelante y atrás para mantener el fluido circulando a través de las mallas.

#### **Eficiencia de los tamices.**

Dos factores que determinan la eficiencia de un tamiz son la finura de la malla y el diseño.

**Finura de la malla.** El tamaño de las aberturas de tamiz determina el tamaño de las partículas que un tamiz puede remover. La malla es el número de aberturas por pulgada lineal medidas desde el centro del alambre. Por ejemplo, un tamiz de malla oblonga 70 por 30 (abertura rectangular) tiene 70 aberturas a lo largo de una línea de una pulgada en un sentido, y 30 aberturas a lo largo de una línea de una pulgada perpendicular a la primera.

Las medidas reales de separación las determinan factores tales como la forma de las partículas, viscosidad del fluido, índices de paso, y cohesión de las partículas. Algunos lodos pueden formar una película de alta tensión superficial sobre los alambres de la malla y reducir el tamaño efectivo de aberturas de la malla.

**Diseño de las mallas.** Las mallas están disponibles en diseños bi- y tridimensionales.

Las mallas bidimensionales se pueden clasificar en:

Mallas de paneles, con dos o tres capas unidas en cada lado por una tira de una pieza en gancho doblada en dos.

Mallas de chapas perforadas, con dos o tres capas unidas a una chapa metálica perforada que proporciona sostén y es fácil de reparar.

Las mallas tridimensionales son mallas de chapa perforada con una superficie corrugada que corre paralelamente al flujo del fluido. Esta configuración proporciona mayor área de separación que la configuración de la malla bidimensional. Los diferentes tipos de mallas tridimensionales son:

♣ Pirámide

♣ Meseta

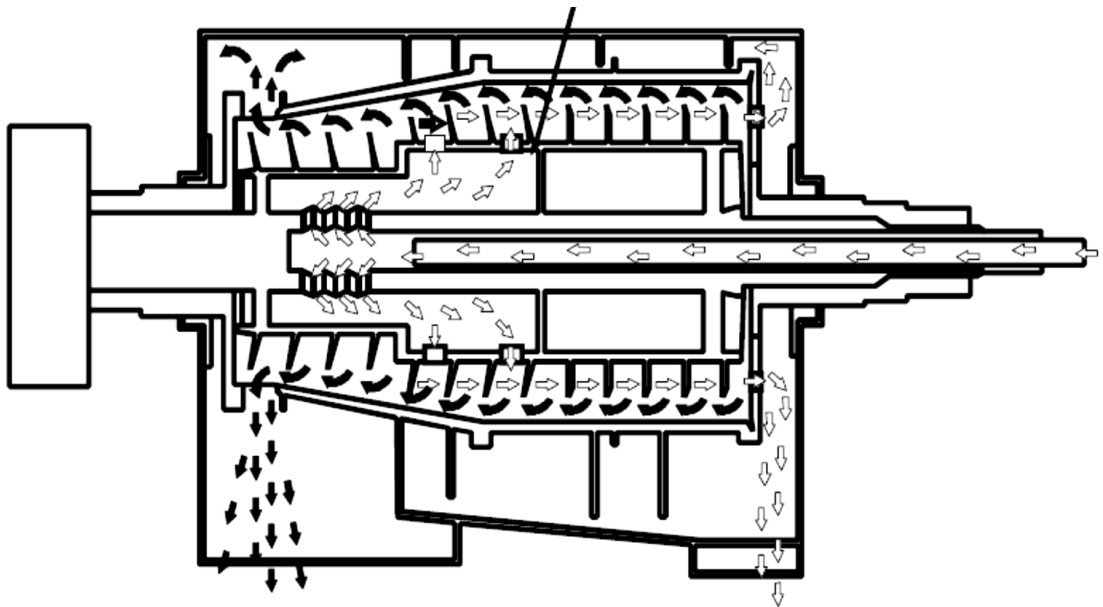
**Dispositivos de separación centrífuga.** Los dos tipos de dispositivos de separación centrífuga son:

**Centrífugas decantadoras:**

Una centrífuga decantadora se compone de una vasija cónica horizontal de acero que gira a alta velocidad usando un transportador tipo doble tornillo sinfín. El transportador gira en el mismo sentido que la vasija externa, pero a velocidad un poco menor.

Un aspecto importante del funcionamiento de la centrífuga es la dilución de la lechada que es alimentada al interior de la unidad. La dilución de la lechada reduce la viscosidad del caudal alimentado y mantiene la eficiencia separadora de la máquina. Cuanto mayor sea la viscosidad del lodo base, tanto mayor dilución será necesaria (lo común son 2 a 4 galones de agua por minuto). La viscosidad del efluente (líquido saliente de la centrífuga) debe ser de 35 a 37 segundos por cuarto de galón para una separación eficiente. Si la viscosidad baja de 35 segundos por cuarto, es porque se está agregando demasiada agua. Esto causará turbulencia dentro de la vasija y reducirá la eficiencia. Se deben seguir estrictamente las recomendaciones de los fabricantes relativas a índices de alimentación de lodo y velocidades de la vasija.

**Figura 77** Sección Transversal de Centrífuga Decantadora



**Fuente:** Modificado de Manual de Fluidos de BAROID Cap. 10-12

Para sistemas de baja densidad debe usarse un equipo único de unidad centrífuga para desechar el total de los sólidos. La función principal de una centrífuga no es controlar el porcentaje total de sólidos de un sistema, sino mantener en ese sistema propiedades de flujo aceptables y deseables.

Se recomiendan dos centrífugas trabajando en serie para los siguientes sistemas:

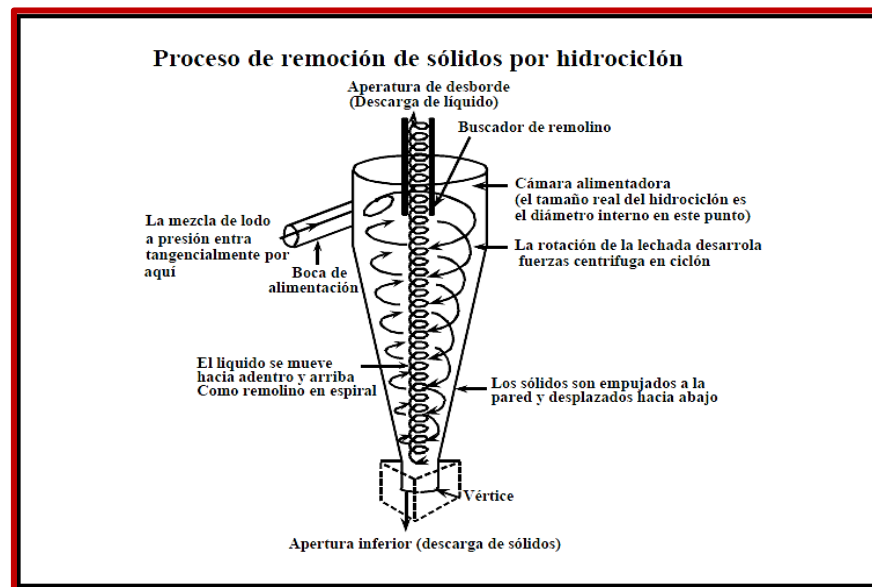
- A. Emulsión inversa
- B. Sistemas de alta densidad base agua
- C. Sistemas base agua en los que el fluido base es costoso
- D. Circuito cerrado
- E. Cero descarga

La primera unidad centrífuga se usa para separar la barita y retornarla al sistema de lodo. La segunda unidad procesa el flujo de líquido en exceso de la primera unidad, descartando todos los sólidos y retornando la porción líquida al sistema de lodo.

*Nota: En la eficiencia de una centrífuga influyen el peso del lodo y la viscosidad del lodo. Durante el funcionamiento de la centrífuga, el flujo inferior debe ser analizado regularmente para determinar la cantidad de sólidos de bajo peso específico y barita que son removidos y retenidos.*

### Hidrociclones

**Figura 78** Proceso de Remoción de Sólidos por Hidrociclón



**Fuente:** Modificado de Manual de Fluidos de BAROID Cap. 10-15

Los hidrociclones, clasificados como desarenadores o desarcilladores, son dispositivos cónicos de separación de sólidos en los cuales la energía hidráulica se convierte en fuerza centrífuga. El

lodo es alimentado tangencialmente por una bomba centrífuga a través de la entrada de alimentación al interior de la cámara de alimentación. Las fuerzas centrífugas así desarrolladas multiplican la velocidad de decantación del material de fase más pesado, forzándolo hacia la pared del cono. Las partículas más livianas se desplazan hacia adentro y arriba en un remolino espiral hacia la abertura de rebasamiento de la parte superior.

La descarga por la parte superior es el sobreflujo o efluente; la descarga de la parte inferior es el flujo inferior. El flujo inferior debe tomar la forma de un rociado fino con una ligera succión en el centro. Una descarga sin succión de aire es indeseable. La Figura 10-4 ilustra el proceso del hidrociclón.

### **Dilución**

La dilución, o sea la adición de fluido base a un sistema de lodo, sirve para:

- A. Reducir la concentración de sólidos dejados por un equipo mecánico de remoción de sólidos.
- B. Reemplazar los líquidos perdidos cuando se han usado equipos mecánicos de control de sólidos.

La dilución puede generar volúmenes excesivos. Los costos de descarte y limpieza pueden ser muy costosos.

## 2.4.4 Laboratorio 4.

### PROPIEDADES DE FLUJO Y DENSIDAD

#### 1. Introducción

Las Propiedades de flujo juegan un papel importante en el funcionamiento apropiado del fluido de perforación, se describe usualmente por su viscosidad y su fuerza de gel, que directamente afectan la remoción, suspensión y separación de ripios. Las propiedades de flujo además influyen sobre la hidráulica de la broca, la predicción de las pérdidas de presión en las diferentes partes del sistema de circulación y el cálculo de densidades equivalentes de circulación.

#### 2. Objetivos

- Analizar el comportamiento reológico de los lodos.
- Comparar los modelos reológicos.
- Observar la desviación del comportamiento newtoniano de los fluidos de perforación.

#### 3. Temas de Investigación

- Modelos reológicos
- Variables de comportamiento reológico.
- Balance de Masa para variar la Densidad de un lodo
- Sólidos Presentes y su control.

#### 4. Material Utilizado

- Balanza de Lodos
- Termómetro
- Viscosímetro rotatorio de cilindro concéntrico FANN
- Arcilla Natural
- Bentonita
- Cal, Pac-L, NaCl y Cal
- Kit de Campo
- Embudo Marsh

## 5. Procedimiento experimental

**Muestra 1:** Estudiar los efectos reológicos de adicionar **Yeso al lodo**.

- A. A 1 bbl equiv. de Agua adicionar 28 lpb bentonita y 1 lpb de Pac-L
- B. El objetivo **1a** adicionar 1 lpb de Yeso.

**Muestra 2:** Estudiar los efectos reológicos de adicionar **Cal al lodo**.

- A. A 1 bbl equiv. de Agua adicionar 30 lpb bentonita y 1 lpb de Pac-L.
- B. El objetivo **2a** adicionar 1 lpb de Cal.

**Muestra 3:** Estudiar los efectos reológicos de adicionar **Sal la lodo**.

- A. A 1 bbl equiv. de Agua adicionar 32 lpb bentonita y 1 lpb de Pac-L.
- B. El objetivo **3a** adicionar 5 lpb de Sal.

## 6. Tabulación de Datos

**Tabla 28** Laboratorio 4: Propiedades de Flujo y Densidad

REOLOGIA	pH	$\rho$	GEL	Revoluciones por Minuto [RPM]											
				600	300	200	180	100	90	60	30	6	3	1.8	0.9
1	A														
	B														
2	A														
	B														
3	A														
	B														

## 7. Cuestionario

- ♣ ¿Cuál es la diferencia entre Viscosidad Plástica y la Aparente de un fluido de Perforación?
- ♣ ¿Cuáles son las desventajas de agregar sólidos al lodo base agua?
- ♣ Deduzca la fórmula de  $n$  y  $K$  a partir de la ley de la potencia y enuncie la ley de la potencia y defina cada uno de sus parámetros.
- ♣ Defina esfuerzo de corte (Shear Stress) y rata de corte (Shear Rate)

## 2.4.5 Laboratorio 5.

### ESTUDIO Y CONTROL DE LA FILTRACIÓN DE LODOS

#### 1. Introducción

Durante el proceso de perforación el lodo nos ayuda a controlar las presiones en la formación, por esto normalmente la presión de la columna de lodo se mantiene por encima de la presión de poro. Esta diferencia de presión ocasiona que la fase líquida del lodo invada la formación creando un daño que depende de la cantidad de líquido que invada y de las propiedades de las arcillas de la formación. Las pruebas de filtración me permiten detectar estas cantidades de líquido que invaden la formación y hacer los correctivos necesarios en el lodo.

#### 2. Objetivos

- Analizar las propiedades de filtración de los lodos de perforación.
- Estudiar la relación entre el tiempo y cantidad de filtrado.
- Ver el efecto de la contaminación sobre las propiedades de filtrado
- Determinar la cantidad de fluido perdido a 100 psi y a temperatura ambiente.

#### 3. Temas de Investigación

- Propiedades de la Torta
- Filtración estática y dinámica
- Variables que afectan la filtración
- Contaminantes y Tratamiento

#### 4. Material Utilizado

- Filtro prensa.
- Papel de filtro.
- Cronómetro.
- Cilindro graduado 25 o 50 ml.
- Drispac (u otro controlador de filtrado).
- Pac-L.
- Bentonita.
- Arcilla natural.
- Soda cáustica (NaOH).
- Sal común (NaCl).

## 5. Procedimiento experimental

### Muestra 1.

- A. Preparar un lodo agua dulce con 30 lpb de bentonita, agregar 1.5 lpb de CaCl<sub>2</sub>. Determinar pérdidas de filtrado en (cc o ml) a: 5, 7, 10, 14, 18, 22, 25, 28 y 30 minutos.
- B. Al lodo **1.a** agregar 3 lpb de lignox y 1 lpb Polypac-UL. Determinar perdidas de filtrado API. Analizar características de la torta.

### Muestra 2.

- A. Preparar un lodo agua dulce con 30 lpb de bentonita, agregar 20 lpb de NaCl. Determinar pérdidas de filtrado en (cc o ml) a: 5, 7, 10, 14, 18, 22, 25, 28 y 30 minutos.
- B. Al lodo **2.a** agregar 4 lpb de lignox y 1 lpb Pac-L. Determinar perdidas de filtrado API. Analizar características de la torta.

### Muestra 3.

- A. Preparar un lodo agua dulce con 30 lpb de bentonita, agregar 1 lpb de cal. Determinar pérdidas de filtrado en (cc o ml) a: 5, 7, 10, 14, 18, 22, 25, 28 y 30 minutos.
- B. Al lodo **3.a** agregar 1.3 lpb de lignox y 0.8 lpb Pac-R. Determinar perdidas de filtrado API. Analizar características de la torta

## 6. Tabulación de Datos

**Tabla 29** Laboratorio 5: Análisis de Filtrado y Torta B

MUESTRA	7.5 MIN	ANALISIS DE LA TORTA		
		CONSISTENCIA	QUEBRADIZA	ESPEJOR
<b>1B</b>				
<b>2B</b>				
<b>3B</b>				

**Tabla 30** Laboratorio 5: Análisis de Filtrado y Torta A

MUESTRA	PERDIDAS DE FILTRADO [mL]									ANALISIS DE LA TORTA		
	5 MIN	7 MIN	10 MIN	14 MIN	18 MIN	22 MIN	25 MIN	28 MIN	30 MIN	CONSISTENCIA	QUEBRADIZA	ESPESOR
1A												
2A												
3A												

### 7. Cuestionario

- ♣ Diga las causas principales de los problemas de filtración.
- ♣ ¿Cuáles son las principales sustancias que aumentan la pérdida de filtrado y cuáles aditivos servirán como controladores?
- ♣ ¿De qué depende el espesor de la torta en la prueba de filtrado?

## 2.5 CONTAMINANTES Y TRATAMIENTO

“Un contaminante es cualquier tipo de material (sólido, líquido o gas) que tiene un efecto perjudicial sobre las características físicas o químicas de un fluido de perforación. Lo que en un tipo de fluido de perforación constituye un contaminante, en otro no será necesariamente un contaminante”<sup>55</sup>.

Los sólidos reactivos de baja densidad son contaminantes comunes en todos los fluidos de perforación. Estos sólidos se componen de sólidos perforados que se han incorporado dentro del sistema o que resultan del tratamiento excesivo con arcillas comerciales. Desde el punto de vista económico, los sólidos perforados y los problemas relacionados con su control tienen un mayor impacto sobre el costo del lodo que los otros tipos de contaminación. El tratamiento del lodo contaminado se puede hacer por medios físicos o químicos. En la superficie se hace la separación de los sólidos por medio de un equipo de control, ver sección 2.5.3. Sin embargo este capítulo se centra principalmente en los medios químicos para controlar las contaminaciones, ya sea precipitando dichos contaminantes o tolerándolos.

Las principales contaminaciones que se tienen son:

**Figura 79** Principales Contaminantes de los Lodos



La frecuencia de monitoreo de las propiedades del lodo, debe ser tal que permita identificar la tasa a la cual cada propiedad se deteriora, y por lo tanto seleccionar el tratamiento que minimice las fluctuaciones en las propiedades del lodo.

**2.5.1 Contaminación por Cemento.** Se introduce en el pozo durante la perforación y se presenta cuando después de cementar el revestimiento, se perforan los tapones de cemento.

<sup>55</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 191 p.

Un cemento bien fraguado es prácticamente inerte a los fluidos de perforación; sin embargo, cuando el fraguado no es completo el cemento puede causar una contaminación severa a la mayoría de los fluidos de perforación. Estas circunstancias ocurren en los siguientes casos:

**Cementaciones del Casing de Superficie:** La baja densidad del cemento y la baja temperatura tiene un efecto retardante sobre el fraguado del cemento.

**Cementaciones Remediales:** El cemento se puede contaminar con el lodo, lo cual puede retardar o impedir el fraguado del cemento.

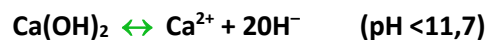
**Cementos sobre-retardados para cementaciones de Casing:** Requeridos para largos tiempos de bombeo y que por lo tanto han fraguado insuficientemente mientras se perfora el zapato.

**Cementaciones de Linnners:** La mezcla de cemento en el tope del linner a menudo no fragua, como consecuencia de la contaminación.

El cemento no es un contaminante cuando se usa agua clara, salmueras, lodos a base calcio o base aceite, o cuando el cemento está totalmente curado.

El sistema de lodo más usado es el sistema de bentonita de bajo pH. En este caso, el cemento puede tener efectos muy perjudiciales sobre las propiedades del lodo. La severidad del contaminante depende de factores tales como el tratamiento químico anterior, el tipo y la concentración de sólidos, la cantidad de cemento perforada, y la medida en que el cemento se curó en el pozo.

Debemos recordar que la barita a granel puede ser contaminada ocasionalmente por cemento durante el transporte o en el equipo de perforación, y puede causar una contaminación de



cemento grave, aunque no se haya anticipado ninguna. El efecto inicial de la contaminación de cemento es la alta viscosidad, altos esfuerzos de gel y la reducción del control de filtrado. Al reaccionar los silicatos del cemento con el agua del lodo, se forman grandes cantidades de Hidróxido de Calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que produce una abundancia de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ). La presencia del hidróxido de calcio causa reacciones químicas las cuales deterioran las propiedades reológicas y del filtrado del lodo. El ion  $\text{OH}^-$  aumenta el pH drásticamente y el ion Calcio  $\text{Ca}^{++}$  afecta las características de las arcillas.

La reacción anterior es reversible y representa un equilibrio entre la concentración de cemento y el pH del lodo. La solubilidad de la cal disminuye a medida que el pH del lodo aumenta.

Cuando el pH excede 11,7, la cal se precipita de la solución. Por lo tanto, la cal se vuelve prácticamente insoluble a un pH mayor de 11,7 y proporciona un excedente o una reserva de cal no reaccionada, debido a la presencia de cemento no disuelto.

“...Siempre se debe tener mucho cuidado al realizar el tratamiento del lodo contaminado por cemento. Es posible que las bajas propiedades de flujo derivadas de las pruebas realizadas a bajas temperaturas no indiquen la condición del lodo en el fondo del pozo, especialmente a las temperaturas de fondo mayores de 275°F. La gelificación producida por altas temperaturas puede constituir un problema grave con los lodos contaminados por el cemento<sup>56\*</sup>...”<sup>57</sup>

**2.5.1.1 Tratamiento.** El éxito del tratamiento consiste en controlar el pH mientras se remueve el calcio y el exceso del hidróxido del calcio del sistema, en forma de precipitado inerte insoluble al calcio. Un saco de cemento (94 Lb) al reaccionar con agua puede formar 74 Lb de hidróxido de calcio disponible para reaccionar con el lodo. El volumen de un saco de cemento en la mayoría de los casos es de 1,1 ft<sup>3</sup>, de modo que si se conoce el volumen de cemento que se debe perforar, se puede predecir mejor tratamiento; esto suponiendo que la totalidad del cemento perforado fuera dispersado en el sistema del lodo.

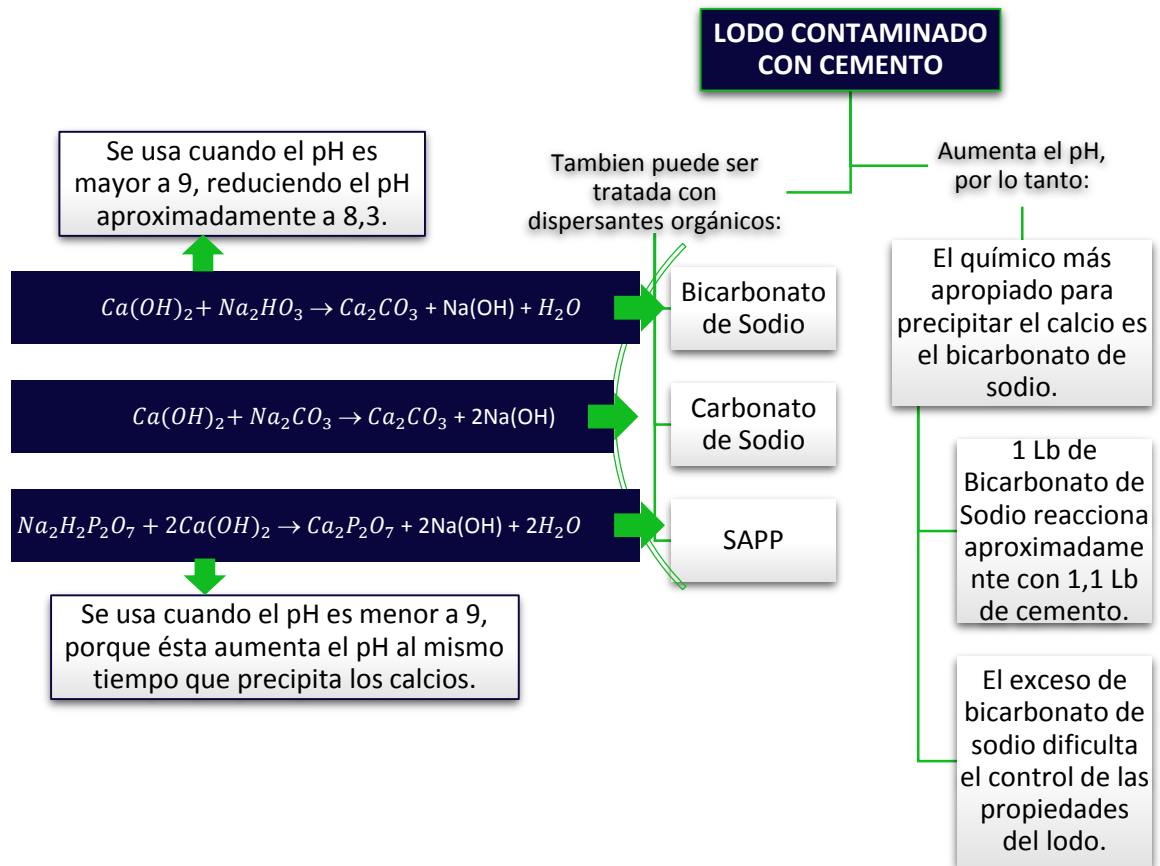
Para evitar alteraciones del lodo al perforar cemento es necesario tratar al lodo con Soda Ash “SAPP” y Bicarbonato de Sodio antes de perforar el cemento. Tan pronto se obtiene retornos de cemento en superficie se debe verificar el  $P_f$ ,  $P_m$ , tres o cuatro veces así como también la fracción volumétrica de agua ( $f_w$ ) por medio de la retorta, para calcular el exceso de hidróxido de calcio.

---

<sup>56\*</sup> La contaminación de cemento a altas Temperaturas de Fondo (BHT) debe ser tratada rápida y completamente para evitar la gelificación o solidificación que suele producirse a altas temperaturas.

<sup>57</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 195 p.

**Figura 80** Tratamiento al Lodo Contaminado con Cemento



Cuando se usa bicarbonato de sodio, el objetivo es proporcionar una fuente de iones carbonato y bicarbonato que se combinarán con los excedentes de iones calcio y calcio. Uno de los problemas que surge frecuentemente con este tipo de tratamiento es el uso de una cantidad excesiva de carbonatos. Si la cantidad de carbonatos presentes excede la cantidad requerida para precipitar el calcio, los problemas del lodo relacionados con los carbonatos pueden surgir. En general, la mejor manera de proceder consiste en tratar inicialmente la contaminación de cemento con una cantidad insuficiente, observando los resultados antes de realizar tratamientos adicionales.

**2.5.2 Contaminación por Anhídrita-Yeso.** El yeso y la anhídrita son formas cristalinas diferentes del sulfato de Calcio ( $CaSO_4$ ) que se encuentra algunas veces al perforar. El yeso es un sulfato de calcio hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), mientras que la anhídrita es un sulfato de Calcio. El sulfato de calcio se encuentra en secciones espesas, en estratos, en aguas de formación,

incrustado en sedimentos como en formaciones de evaporitas y algunas veces como roca cubierta de un domo salino.

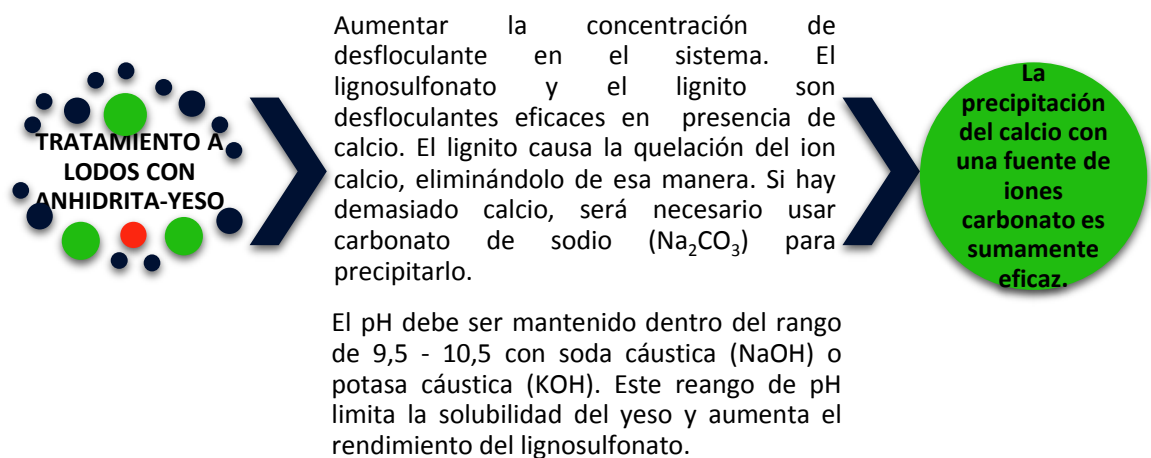
Al perforar estas formaciones, la anhidrita se ioniza en iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en la fase continua del lodo.



Esto origina una agregación y floculación dentro de éste, lo cual produce un aumento en la viscosidad, el gel, el filtrado o la torta del lodo y disminuye el pH. La solubilidad de  $\text{CaSO}_4$  es controlada por el pH, la salinidad y la temperatura. El aumento del pH y de la temperatura reduce la solubilidad del yeso, mientras que el aumento de los cloruros del lodo aumenta la solubilidad. La solubilidad del sulfato de calcio es reversible y alcanzará algún grado de equilibrio con el ambiente químico.

El efecto de perforar formaciones con anhidrita sobre lodos de agua dulce es similar al que se produce al perforar secciones con sal, excepto que un número relativamente pequeño de iones calcio puede causar tanto daño como un ingreso mucho mayor de iones sodio. Aquí también se reduce el daño si el nivel de sólidos en el lodo es bajo o si la hidratación de las arcillas ha sido inhibida.

**2.5.2.1 Tratamiento.** Los tratamientos para la contaminación con sulfato de calcio, varían según el espesor de la sección de yeso/anhidrita y el sistema de lodo empleado. Si el espesor de la formación es grande lo más aconsejable es convertir al lodo en un sistema base calcio. Si es relativamente pequeña la cantidad encontrada del contaminante puede ser tolerado mediante la precipitación de los iones calcio, un pretratamiento.



**Tabla 31** Agentes para descontaminar el Fluido de Anhidrita-Yeso

TRATAMIENTO	ANÁLISIS	REACCIÓN QUÍMICA	OBSERVACIONES	RESULTADO
Carbonato de Sodio	Por su bajo pH la anhidrita-yeso (6 – 6.5) el carbonato de sodio se prefiere por su alto pH (11 – 11.4), mayor que el Bicarbonato de Sodio.	$2\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 + 4\text{Na}^+ + \text{OH}^-$ (pH < 11.3)	Si los iones calcio están presente, éstos se precipitarán como $\text{CaCO}_3$ insoluble (caliza). Este es el más utilizado pero presenta 2 desventajas: <ul style="list-style-type: none"> <li>♣ Continua acumulación del sulfato de sodio (<math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>) incrementando la resistencia de gel.</li> <li>♣ El incremento del ion carbono lo cual eleva el pH</li> </ul>	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4 \leftrightarrow \text{NaSO}_4 + \text{CaCO}_3$ (pH > 11.3)
Carbonato de Bario	Precipita el ion calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) y el radical sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ), permaneciendo constante el pH.	$\text{CaSO}_4 + \text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ba}(\text{SO})_4 + \text{CaCO}_3$	Solo se emplea para pequeñas contaminaciones. Sus desventaja son: <ul style="list-style-type: none"> <li>♣ El costo; la cantidad de Bario (1,45 Lb) para precipitar 1 Lb de sulfato de Calcio, lo cual es poco económico.</li> <li>♣ No puede ser empleado si se han incorporado fosfatos al fluido a tratar.</li> </ul>	-
Fosfatos	Tienen la capacidad de complejar el calcio del filtrado. Esta reacción produce un fosfato de calcio insoluble.	Pirofosfato Ácido de Sodio (SAPP) $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7 \rightarrow$ (pH 4,8) Tetrafosfato de Sodio (STP o PHOS) $\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13} \rightarrow$ (pH 8,0)	Los fosfatos están limitados por su estabilidad térmica relativamente baja (aproximadamente 200°F). Cuando se excede esta temperatura, los fosfatos se convierten en ortofosfatos. Como tales, no son eficaces como desfloculantes pero aún son capaces de eliminar el calcio.	-

**2.5.2.2 Convirtiendo en un sistema a base de calcio<sup>58</sup>.** Procedimiento descrito en el Manual de Fluidos de Perforación M-I: “Cuando se perforan grandes secciones de anhidrita o yeso, la magnitud de la contaminación hace que sea prácticamente imposible mantener las propiedades de flujo y el control de filtrado deseables. Por lo tanto es necesario añadir sulfato de calcio para convertir el sistema en un sistema de lodo a base de calcio.

El lodo puede ser convertido en un lodo yeso mediante el tratamiento con soda cáustica, lignosulfonato y yeso adicional. Un lodo yeso es un sistema de bajo pH, pero se requieren grandes cantidades de soda cáustica para mantener el pH dentro del rango deseado de 9,5 a 10,5. Una “cresta” de viscosidad (aumento) ocurrirá a medida que se añade el yeso adicional, pero con las adiciones apropiadas de agua, soda cáustica y lignosulfonato, el tipo de lodo cambiará después de una circulación y la viscosidad disminuirá. El yeso es añadido hasta que no tenga ningún efecto perjudicial sobre las propiedades del lodo, después de lo cual se mantiene un excedente de yeso (5 a 8 lb/bbl) para alimentar las reacciones químicas que se están produciendo. Los niveles típicos de calcio varían de 600 a 1.200 mg/l en un lodo yeso, según el pH.

El lodo también puede ser convertido en lodo cálcico mediante la aplicación del tratamiento químico que acabamos de describir. Para convertir el lodo en lodo cálcico, se añade una cantidad adicional de cal en vez de yeso, manteniendo un excedente. Para mantener un excedente de cal, la mayoría de la cal debe permanecer insoluble. Por lo tanto, el pH del lodo cálcico debe ser controlado en exceso de 11,5, mediante adiciones de soda cáustica y cal. La soda cáustica reacciona con el sulfato de calcio para producir cal adicional, de la manera indicada por la siguiente ecuación:



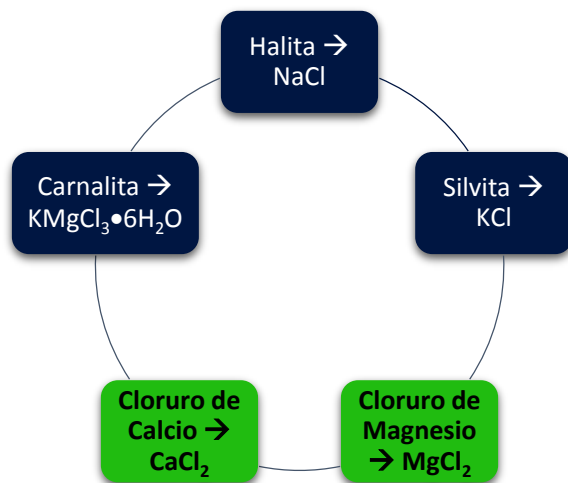
El lodo resultante tratado con cal requiere una cantidad anormal de soda cáustica para mantener el excedente de cal, si se están perforando grandes cantidades de anhidrita o yeso. Por lo tanto, se prefiere generalmente usar un lodo yeso. Ambos lodos requieren la adición de un agente de control de filtrado que no sea demasiado sensible al calcio.”

---

\*La reducción del pH y de la alcalinidad y el aumento de la cantidad de calcio en el filtrado constituyen los indicadores más confiables.

<sup>58</sup> M-I SWACO. Manual de Fluidos De Perforación. A-1 Edición. Febrero de 2001. 194 p.

**2.5.3 Contaminación con Cloruro de Sodio (Sal).** Esta contaminación puede provenir de la perforación de domos salinos o de corrientes de agua salada. Se encuentran tres tipos de sales de roca naturales:



Las tres son tipos de sales de roca naturales encontradas durante las operaciones de perforación. Las otras dos sales comunes no existen naturalmente en la forma cristalina, debido a su extrema solubilidad. Sin embargo, ambas pueden existir individualmente, juntas o con otras sales disueltas en agua irreductible.

El manual de fluidos de perforación M-I describe: “Un flujo de agua salada puede ser mucho más perjudicial para las propiedades de flujo que la perforación dentro de sal de roca, porque las sales ya están solubilizadas y reaccionan más rápidamente con las arcillas. Cuando se produce algún flujo de agua salada, la densidad del lodo debe ser aumentada para controlar el flujo antes de que se pueda tomar el tiempo de acondicionar las propiedades del lodo.

En el caso de las sales, el mecanismo de contaminación está basado en las reacciones de intercambio catiónico con las arcillas, la acción de masas por el catión predominante y, a veces, el pH. Los únicos sistemas sobre los cuales las sales disueltas no tienen casi ningún efecto son los sistemas de agua clara, las salmueras, los lodos base aceite y algunos sistemas de polímeros con bajo contenido de coloides. Los sistemas de lodo a base de bentonita no son afectados de diferentes maneras según el origen de la sal, ya sea el agua de preparación, agua salada, sal de roca o los flujos de agua salada. Los efectos iniciales son la alta viscosidad, altos esfuerzos de gel, un filtrado alto y un aumento importante del contenido de cloruros, acompañado por pequeños aumentos de la dureza en el filtrado del lodo. Se produce un intercambio catiónico entre la sal y las arcillas para expulsar el ion calcio de las partículas de arcilla, lo cual resulta en un aumento de la dureza”.

La contaminación con sal es un problema grave, debido a que produce una disminución en el pH, en la viscosidad aparente y en las pérdidas de filtrado. El componente de la viscosidad aparente que más se altera es el punto de cedencia, por la neutralización de las cargas

superficiales de las partículas de arcillas, las cuales, al disminuir su fuerza de repulsión, tienden a unirse formando agregados de tamaño no coloidal.

Los grandes cambios que genera la sal en las propiedades de los lodos en el pozo son:

- ♣ Derrumbe de Lutitas
- ♣ Ensanchamiento del Hueco, hasta que el lodo esté completamente saturado de sal.

La sal es un contaminante que no puede removerse económicamente. Los lodos que contengan hasta 10.000 ppm de sal pueden tratarse con químicos para restablecer las propiedades reológicas y de filtración. Para lograr un mejor entendimiento de las sales que afectan y la manera de tratarlas, se describen así:

**Tabla 32** Sal Contaminante Halita y su Tratamiento

TIPO DE SAL	DETALLES	REACCIÓN	TRATAMIENTO
Halita (NaCl)	<p>Es la sal perforada con más frecuencia y constituye la mayoría de los flujos de agua salada. La halita tiene un efecto sobre los instrumentos usados para medir el pH. Si se usa papel indicador de pH, la precisión de este papel será afectada por la concentración de cloruros y el papel indicará un pH más bajo a medida que la concentración de cloruros aumenta.</p> <p>Si se debe perforar a través de sal maciza o frecuentes venitas de sal, el lodo debería estar saturado de sal para evitar derrumbes y el hundimiento del pozo. Que el lodo esté saturado o no, se requiere generalmente un agente de control de filtrado, cuando las concentraciones son mayores de 10.000 mg/L.</p>	<p>El efecto inicial es la floculación de las arcillas causada por la acción de masas del ion sodio. La Viscosidad Marsh, punto cedente, los esfuerzos de gel y el filtrado aumentan. La presencia de halita puede ser confirmada por un aumento de los cloruros. Las arcillas se deshidratan cuando hay suficiente sodio y tiempo. Cuando esto ocurre, el tamaño de la partícula disminuye debido a la reducción de agua adsorbida. El agua liberada se reincorpora a la fase continua del lodo, lo cual puede resultar en una ligera reducción de la viscosidad plástica. Pero las partículas de arcilla deshidratada floculan, causando un alto punto cedente, altos esfuerzos de gel y un filtrado alto. El filtrado aumentará en proporción directa a la cantidad de sal que se ha incorporado en el lodo. Si la halita es pura, el pH no debería sufrir ninguna reducción de más de una unidad hasta que se alcance la saturación total del lodo. Sin embargo, es muy raro que se encuentre halita pura. Minerales asociados tales como la anhidrita están generalmente presentes en cierta medida, lo cual aumentará el calcio del filtrado.</p>	<p>El tratamiento del lodo incluye añadir suficiente desfloculante para mantener las propiedades de flujo y la dilución con agua dulce deseables a fin de obtener una reología adecuada. Se debe continuar el tratamiento químico hasta que las arcillas estén desfloculadas. Se requiere una cantidad adicional de soda cáustica para aumentar el pH. Esto depende de la cantidad de sal perforada y de si existe una cantidad suficiente para deshidratar todas las arcillas contenidas en el sistema. Si el pH disminuye hasta menos de 9,5, será necesario aumentarlo con soda cáustica para que los desfloculantes base ácido se vuelvan solubles a fin de ser eficaces. La halita pura tiene un pH de 7. Por lo tanto, cuanto más halita se perfora, más soda cáustica será requerida para mantener el pH a más de 9,5.</p> <p>Cualquiera que sea el tipo de contaminación de sal, se recomienda añadir bentonita. Bajo estas circunstancias, la bentonita seca no debería ser añadida directamente al sistema. La bentonita debería ser prehidratada y protegida con otro producto químico, antes de ser añadida al sistema activo.</p>

**Tabla 33** Sal Contaminante Silvita y su Tratamiento

TIPO DE SAL	DETALLES	REACCIÓN	TRATAMIENTO
Silvita (KCl)	Es importante conocer el tipo de sal que se perforará. Como la solubilidad de la Silvita es ligeramente más alta que la halita, una sección de sal de Silvita maciza perforada con un fluido saturado de halita aún puede derrumbarse en cierta medida, aunque no con la misma severidad que si se usara agua dulce.	Si el lodo no contiene cloruros, excepto los que se obtienen al perforar la sal de Silvita, el valor de la valoración del cloruro constituiría una medida precisa de la concentración de iones potasio. Sin embargo, esto casi nunca ocurre. No es raro que estas sales estén interestratificadas. La valoración cuantitativa del ion potasio puede ser utilizada para identificar la sal como Silvita pura o Silvita parcial, a efectos geológicos.	La contaminación de Silvita produce la misma reacción de las propiedades del lodo y requiere el mismo tratamiento del lodo que la contaminación de halita.  <b>NOTA:</b> Es difícil preparar un fluido saturado de KCl que tenga propiedades de flujo deseables, un buen control de filtrado y buenas características de suspensión. Sin embargo, si fuera necesario (y suponiendo que las condiciones del pozo lo permiten), se podría usar un fluido claro saturado de KCl.

**Tabla 34** Sal Contaminante Carnalita y su Tratamiento

TIPO DE SAL	DETALLES	REACCIÓN	TRATAMIENTO
Carnalita (KMgCl <sub>3</sub> •6 H <sub>2</sub> O)	La sal compleja “carnalita” es relativamente rara. Sin embargo, esta sal existe en cierta medida en algunas partes de los Estados Unidos, Sudamérica, Europa y el Medio Oriente. El caso más notable es el de Europa del Norte, donde la carnalita subyace el área de perforación del Mar del Norte. Se trata de la sal de Zechstein, la cual se compone de halita, Silvita y carnalita interestratificadas.	Los problemas del lodo asociados con la carnalita son graves y tienen dos aspectos:  ♣ Cuando está solubilizada, dos cationes fuertes (calcio y magnesio) actúan sobre las arcillas para causar la floculación y la deshidratación.  ♣ En la presencia de iones hidroxilo (OH <sup>-</sup> ), el magnesio de la carnalita disuelta se precipita como hidróxido de magnesio (Mg(OH) <sub>2</sub> ).	Este precipitado (Mg(OH) <sub>2</sub> ) es una sustancia gelatinosa espesa que actúa como viscosificador. Al pH relativamente bajo de 9,9, hay suficientes iones hidroxilo presentes para que el precipitado tenga un profundo efecto sobre la viscosidad del lodo. El magnesio sólo puede ser precipitado por la soda cáustica. Esta reacción empieza a producirse con solamente 0,03 lb/bbl de soda cáustica. Por lo tanto, si es posible, la soda cáustica no debería usarse.

**Tabla 35** Flujos de Agua Salada y su Tratamiento

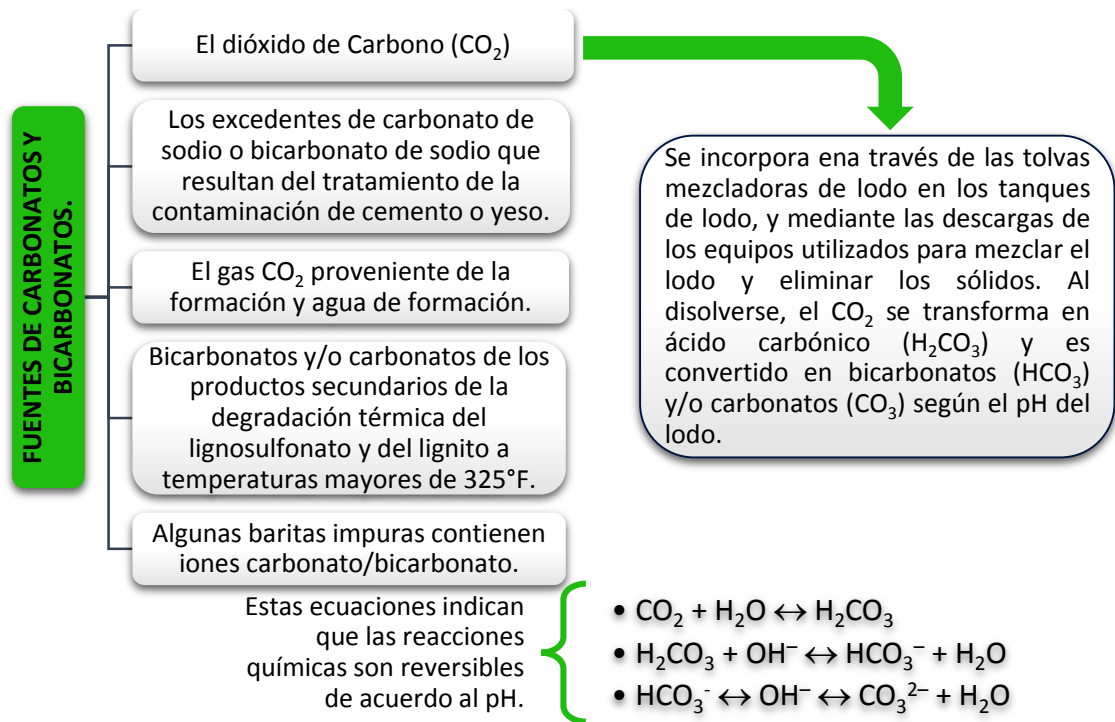
TIPO DE SAL	DETALLES	REACCIÓN	TRATAMIENTO
Flujos de Agua Salada	<p>Las aguas irreductibles pueden contener una amplia gama de sales. El origen de estas sales está directamente relacionado con el origen de los sedimentos propiamente dichos. Como los sedimentos marinos se depositan en agua salada, éstos contienen generalmente sales que son similares a las que se encuentran en el agua salada.</p> <p>Sin embargo, como la mayoría del agua es expulsada durante el proceso de compactación, la concentración de sal puede ser considerablemente más alta.</p>	<p>Reacciones químicas, tales como la lixiviación de los minerales de sedimentos por el agua freática, pueden enriquecer las aguas irreductibles con aniones y cationes adicionales. Muchas de éstas pueden ser perjudiciales para los fluidos de perforación. Las aguas muy enriquecidas con calcio y magnesio son las más perjudiciales.</p> <p>Los indicadores de magnesio son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>♣ Reducción rápida del pH</li> <li>♣ Espesamiento del lodo con adiciones de soda cáustica o carbonato de sodio.</li> <li>♣ Valoración para la concentración de iones magnesio.</li> </ul> <p>Los indicadores para un flujo de agua con alto contenido de calcio, suponiendo que la cantidad de magnesio presente es poca o prácticamente nula, sería:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>♣ Menor efecto sobre el pH</li> <li>♣ Respuesta positiva del lodo a las adiciones de soda cáustica o carbonato de sodio.</li> <li>♣ Valoración para la concentración verdadera de iones calcio.</li> </ul>	<p>En una solución pura de una sal, esta sal puede ser identificada por el contenido de cloruros y la valoración de los cationes (excepto el sodio). Sin embargo, en soluciones de sales mezcladas, el problema se complica hasta el punto de convertirse en una cuestión puramente teórica. Esto es especialmente cierto porque sólo el calcio, el potasio y el magnesio pueden ser identificados con facilidad en el campo. Se supone que los cloruros que no están asociados con los cationes identificables, están asociados con los iones sodio.</p>

**NOTA:**

La solubilidad de la mayoría de las sales comunes es directamente proporcional a la temperatura. A medida que la temperatura de una solución de sal aumenta, la solubilidad de la sal en esa solución aumenta. Una solución que está saturada con una sal en particular a la temperatura superficial, es capaz de contener más sal en solución a temperaturas elevadas.

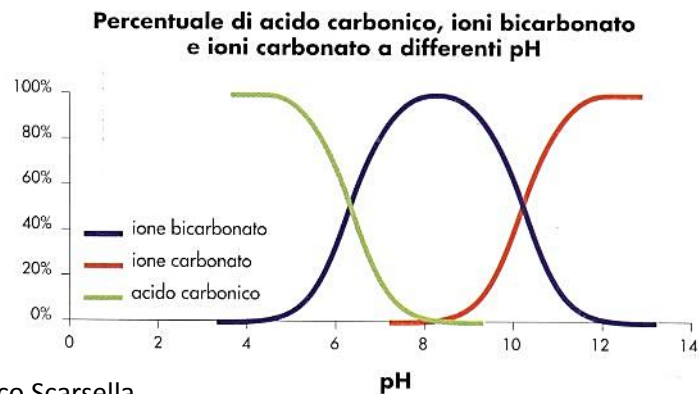
**2.5.4 Contaminación con Carbonatos/Bicarbonatos.** Los carbonatos pueden existir como grandes depósitos de calcio o como carbonato de magnesio en diversas formas. La contaminación química causada por los carbonatos solubles es uno de los conceptos menos comprendidos y más complicados de la química relacionada con fluidos de perforación.

**Figura 81** Fuentes de Carbonatos y Bicarbonatos



Esto también está ilustrado gráficamente, muestra la distribución del ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), del bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y de los carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) en relación con el pH.

**Figura 82** Equilibrio Carbonato-Bicarbonato



Fuente: Marco Scarsella

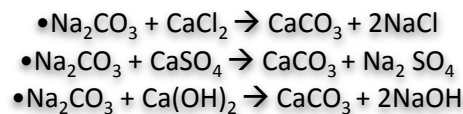
La contaminación de carbonatos/bicarbonatos resulta generalmente en la alta viscosidad de la línea de flujo, un alto punto cedente y esfuerzos de gel progresivos, y podría causar la solidificación del lodo. Estos aumentos de la viscosidad son producidos cuando los carbonatos y/o bicarbonatos floculan los sólidos de tipo arcilloso en el lodo. El análisis químico permite identificar el contaminante Carbonato/Bicarbonato:

El método de pH/Pf usado para realizar el análisis de carbonatos/bicarbonatos está basado en la cantidad (ml) de ácido sulfúrico 0,02 N (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) requerida para reducir el pH de una muestra de filtrado de lodo, a partir de un pH existente hasta un pH de 8,3.

Esto cubre el rango de pH en el cual los hidroxilos y carbonatos existen. Más cuando no hay carbonatos, se requiere muy poca soda cáustica para lograr los rangos típicos de pH de los fluidos de perforación, y que la P<sub>f</sub> correspondiente también es baja.

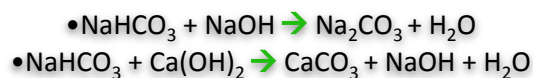
#### 2.5.4.1 Tratamiento.

El tratamiento para remover los carbonatos es precipitarlo como un carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>).



Las reacciones que ocurren son:

Los bicarbonatos de sodio no son precipitados como los carbonatos de sodio en las anteriores reacciones, sino que tienen que ser convertidos a carbonatos con la adición de iones hidroxilo,



para luego ser precipitados. Las reacciones con las siguientes:

$$\frac{\text{ppmHCO}_3^-}{\text{ppmCa}^{++}} < 3$$

→ Se debe agregar soda cáustica para incrementar el pH a niveles cercanos a 9,4.

$$\frac{\text{ppmHCO}_3^-}{\text{ppmCa}^{++}} > 3$$

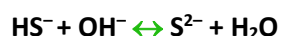
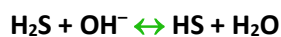
→ No es necesario adiciones de soda cáustica.

**2.5.5 Contaminación con Gases.** El contaminante más severo y más corrosivo descrito en este capítulo es el gas de sulfuro de Hidrógeno ( $H_2S$ ). Este gas es destructivo para los materiales tubulares y tóxicos para los seres humanos. Cuando se identifica la presencia de  $H_2S$ , el personal debe usar inmediatamente los equipos apropiados de protección personal y poner en práctica las medidas de seguridad de los trabajadores. El gas de sulfuro de hidrógeno se origina en: Depósitos térmicos, Gas de la formación, Degradación biológica y Descomposición de materiales que contienen azufre.

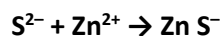
El gas de sulfuro de hidrógeno puede ser identificado por:

1. Reducción del pH del lodo.
2. Decoloración del lodo (hacia un color oscuro) debido a la formación de  $FeS$  a partir de la Barita.
3. Olor a huevo podrido.
4. Aumento de la viscosidad y del filtrado debido a la reducción del pH.
5. Formación de incrustaciones negras ( $FeS$ ) sobre las tuberías de perforación de acero.

Como el  $H_2S$  es un gas ácido, el pH del lodo es reducido rápidamente mediante la neutralización de  $OH^-$ . Para compensar los aspectos dañinos del gas  $H_2S$ , el pH debe ser aumentado hasta por lo menos 11, o a un nivel más seguro de 12, añadiendo soda cáustica o cal. La siguiente reacción química describe la aplicación de alcalinos al  $H_2S$ .



El ion bisulfuro ( $S^{2-}$ ) puede ser eliminado por una reacción con óxido de cinc para formar sulfuro de cinc, el cual es insoluble.



Un tratamiento de 1 lb/bbl de óxido de cinc elimina aproximadamente 1.000 mg/l de sulfuros. No se debe usar más de 2 lb/bbl de óxido de cinc en el tratamiento preliminar del lodo para eliminar  $H_2S$ . Para proteger los materiales tubulares contra la corrosividad del  $H_2S$ , se recomienda usar un lodo base aceite. El aceite actúa como un agente formador de película en

la presencia de  $H_2S$ . La ruptura por absorción de hidrógeno es la causa de la destrucción de los materiales tubulares, porque el  $H_0$  (hidrógeno atómico) entra en los pequeños poros del metal sometidos a grandes esfuerzos y se transforma en gas  $H_2$  (hidrógeno molecular), causando la ampliación del volumen de la molécula de hidrógeno, lo cual rompe el metal.

El  $H_2S$  no es menos tóxico en los lodos base aceite que en los lodos base agua. En realidad, con los lodos base aceite sería necesario tomar mayores precauciones que con los lodos base agua, debido a la solubilidad del  $H_2S$  en el aceite. La detección del sulfuro de hidrógeno en el lodo puede ser probada de dos maneras:

### **Tren de Gas de Garrett (GGT).**

#### **Prueba de Hach.**

Ambas pruebas son rápidas, fáciles y producen resultados fáciles de definir, pero con el tren de gas de Garrett es más preciso y proporciona un resultado cuantitativo. El procedimiento está descrito en RP 13B.

Si se detecta  $H_2S$  en el lodo cuando se usa la prueba de filtrado soluble en el tren de gas de Garrett, será necesario tomar medidas para:

- Aumentar inmediatamente el pH hasta un valor de por lo menos 11,5 a 12, mediante la adición de soda cáustica.
- Amortiguar el pH con cal.
- Comenzar tratamientos con óxido de cinc para eliminar los sulfuros solubles del sistema.

Si parece que el  $H_2S$  proviene (fluye) de la formación, la densidad del lodo debería ser aumentada para interrumpir el flujo de gas dentro del pozo. Las propiedades químicas del gas de sulfuro de hidrógeno son bastante complejas. Las acciones descritas anteriormente son recomendadas para minimizar los aspectos tóxicos de este contaminante corrosivo.

A continuación en la siguiente tabla<sup>59</sup> se muestra las propiedades reológicas que afectan gravemente cuando hay algún tipo de contaminación, además se hace una recomendación para el tratamiento de lodos.

---

<sup>59</sup> BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988. 147 p.

**Tabla 36** Reconocimiento de Contaminantes y Tratamiento del Lodo

CAMBIOS	CONTAMINANTE							
	Anhidrita-Yeso	Cemento Ca(OH) <sub>2</sub>	Cloruro de Sodio	Cloruro de Calcio	Carbonatos/Bicarbonatos	H <sub>2</sub> S	Sólidos perforados	Aceite
Viscosidad Plástica	-	-	-	-	-	-	↑	↑
Yield Point	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Gel	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
pH	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	
Filtrado API	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
Ca <sup>++</sup>	↑	↑	-	↑	↓	-	-	
Cl <sup>-</sup>	-		↑	↑	-	-	-	
P <sub>m</sub>	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	
P <sub>f</sub>	↓	↑	↓	↓	↔	↓	↓	
M <sub>f</sub>	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	
Peso del Lodo	-	-	-	-	-	-	↑	↓
Sólidos	-	-	-	-	-	-	↑	↓
Contenido de Aceite								↑
Contenido de Agua							↓	
<b>TRATAMIENTO</b>	Soda Cáustica Agua Carbonato de Sodio Controlador de Filtrado Dispersante	Bicarbonato de Sodio SAPP Dispersante	Soda Cáustica Agua Controlador de Filtrado Dispersante	Soda Cáustica Agua Carbonato de Sodio Controlador de Filtrado Dispersante	pH < 10.3 Cal 10.3 < pH < 11.3 Cal y Yeso pH > 11.3 Yeso Dispersante	Soda Cáustica Cal Óxido de Cinc	Agua Equipo de Control de Sólidos	Controlar peso Lodo Detectar fuente de Aceite y sacarlo del sistema.

↑ Aumento      ↓ Disminución      - No cambia.

Fuente: Modificado Manual de Fluidos de Perforación M-I

## 2.5.6 Laboratorio 6

### CONTAMINANTES Y TRATAMIENTO

#### 1. Introducción

Prever la contaminación de un fluido de perforación es tan importante como el tratamiento a efectuar. Esta práctica se establece para momentos donde la predicción que se estableció no es suficiente y se requiere tratamientos adecuados al fluido; conocer los efectos que causa cada contaminante de las formaciones que se está atravesando o por algunos productos que se le adicionan.

#### 2. Objetivos

- Estudiar el efecto de los contaminantes sobre las propiedades del lodo.
- Analizar el comportamiento del lodo en presencia de los diferentes contaminantes.
- Evaluar los efectos de los contaminantes y estudiar la forma de contrarrestarlos.

#### 3. Temas de Investigación

- Contaminación por sólidos: fuentes, efectos, detección y tratamiento.
- Contaminación por anhidrita o yeso: fuentes, efectos, detección y tratamiento.
- Contaminación por cemento: fuentes, efectos, detección y tratamiento.
- Contaminación por sal: fuentes, efectos, detección y tratamiento.
- Contaminación por cal: fuentes, efectos, detección y tratamiento.

#### 4. Material Utilizado

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| • Equipo para prueba de filtrado API.                  | • Drispac.              |
| • Equipo de retorta completo.                          | • Pac-R y Pac-L.        |
| • pH-metro.  | • Bentonita.            |
| • Equipo y reactivos para pruebas de química de aguas. | • Arcilla natural.      |
| • Embudo Marsh.  | • Soda cáustica (NaOH). |
| • Equipo completo para medir viscosidades.             | • Sal común (NaCl).     |
|  | • Termathin             |

## 5. Procedimiento experimental

- **Muestra 0. Lodo base**

A 1 Bb eq. de agua adicionar 30 lpb bentonita, 1 lignox, 0.5 lpb de Pac-R, NaOH 0.5 lpb. Determine pH, Pf, Mf, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>. Viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto de cedencia, gel inicial 10 segundos, pérdida de filtrado, porcentaje de sólidos, contenido de arena y analice la torta.

- **Muestra 1. Lodo Salado**

A 1 Bb eq. de lodo base agregue 30% en volumen de agua. Agregue 30 Lpb de NaCl. 2 lpb de lignox, 2 lpb de Pac-L y agregar NaOH hasta obtener un pH (9 – 11). Y luego obtenga un lodo de densidad de 10.5 lpg utilizando CaCO<sub>3</sub> o barita. Determine pH, Pf, Mf, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>. Viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto de cedencia, gel inicial 10 segundos, pérdida de filtrado, porcentaje de sólidos, contenido de arena y analice la torta.

- **Muestra 2. Lodo Calado**

A 1 bbl equiv. de lodo base agregue 15% en volumen de agua. Agregue 2lpb de Cal (Ca(OH)<sub>2</sub>) y 3 lpb de lignox, adicione 1 lpb de Pac-L y agregar NaOH hasta obtener un pH (9 – 11) pH. Y luego obtenga un lodo de densidad de 11 lpg utilizando CaCO<sub>3</sub> o barita. Determine pH, Pf, Mf, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>. Viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto de cedencia, gel inicial 10 segundos, pérdida de filtrado, porcentaje de sólidos, contenido de arena y analice la torta.

- **Muestra 3 Lodo Base Yeso**

A 1 lpb de lodo base dilúyalo con 10% en vol. De agua, 1lpb de NaOH, agregue 7 lpb de yeso y 3 lignox, 1.2 de Pac-L y barita suficiente para llevar el lodo a una densidad de 11 lpg. Determine pH, Pf, Mf, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>. Viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto de cedencia, gel inicial 10 segundos, pérdida de filtrado, porcentaje de sólidos, contenido de arena y analice la torta.

## 6. Tabulación de Datos

**Tabla 37** Laboratorio 6: Contaminantes y Tratamiento

## 7. Cuestionario

PROCEDIMIENTO	pH	600 RPM	300 RPM	VA (CP)	VP (CP)	YP	GEL INICIAL (10S)	FILTRADO API (CC)	P <sub>F</sub>	M <sub>F</sub>	CL <sup>-</sup>	CA <sup>++</sup>	% SOLIDOS	% ARENA	ANÁLISIS TORTA			
															GROSOR	PLÁSTICA	CONSIS	TENCIA
Muestra 0																		
Muestra 1																		
Muestra 2																		
Muestra 3																		

- A. Enumere los problemas que pueden existir en el lodo cuando existe contaminación por sólidos, cal, yeso, sal (NaCl y CaCl<sub>2</sub>), cemento, y aceite; y su tratamiento.
- B. Haga un cuadro comparativo de las propiedades de un lodo cuando se contamina con Sal, Yeso-Anhidrita y Cemento.
- C. ¿Es mejor tratar el lodo antes o después de la contaminación con cemento? Explique.

## 2.6 LODOS DE AGUA SALADA

Se denominan lodos salados a aquellos cuya concentración de sal sobrepasa las 10.000 ppm de sal (1% en peso) y no han sido convertidos a un lodo base yeso o lignosulfonato. Los lodos de agua salada se clasifican de acuerdo a la cantidad de sal presente y/o a la fuente del agua de constitución.

De acuerdo a la cantidad de sal se clasifican en:

- **Lodos saturados de sal** (315.000 ppm de sal o más)
- **Lodos salados** (más de 10.000 ppm de sal, pero no saturados).

**2.6.1 Usos de los lodos de agua salada.** Estos lodos pueden ser preparados a propósito para cumplir operaciones específicas o ser el resultado de la sal que existe en un agua de constitución (donde no se tenga disponibilidad de agua dulce), la perforación de una veta de sal o de un acuífero. Dentro de las operaciones más comunes donde se usan estos lodos están:

- ★ Los lodos saturados de sal se usan para perforar secciones masivas de sal (domos salinos), para evitar el lavado de estas secciones que puede ocasionar ensanchamiento del pozo. Los lodos de agua dulce se convierten en lodos de agua saturada de sal por adición de sal a los mismos hasta alcanzar el nivel de saturación.
- ★ Ocasionalmente se añade sal a un lodo con el fin de controlar la resistividad.
- ★ La sal también puede ser añadida a propósito en incrementos desde 10.000 a 315.000 ppm con el fin de inhibir lutitas bentoníticas (evita el hinchamiento).

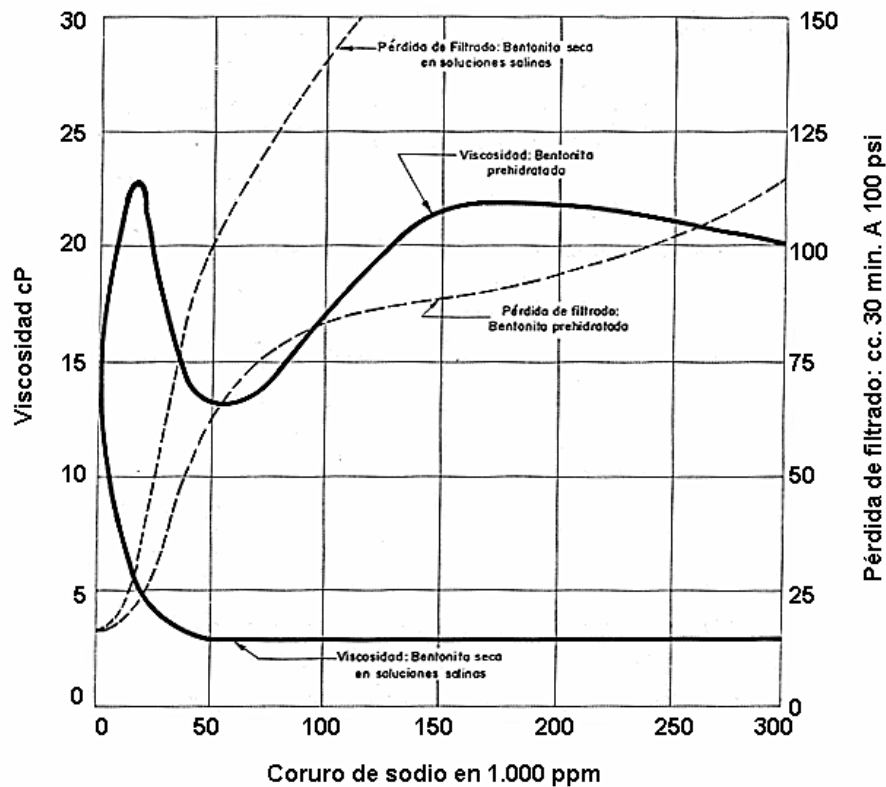
**2.6.2 Características de los lodos de agua salada.** La sal actúa como un contaminante en los sistemas de lodo de agua dulce debido a que produce un aumento de la viscosidad aparente y las pérdidas de filtrado. La componente de la viscosidad aparente que se altera es el punto cedente por la neutralización de las cargas superficiales de las partículas de arcilla, las cuales al disminuir su fuerza de repulsión tienden a unirse formando agregados de tamaño no coloidal. A bajas concentraciones de sal (menores a 10.000 ppm) los lodos de agua dulce y bajo pH pueden ser tratados exitosamente con químicos para restablecer las propiedades reológicas y de filtración. El tratamiento consiste en agregar soda caustica (NaOH) para aumentar el PH y activar los adelgazantes orgánicos que contenga el lodo, logrando que se mantengan las

propiedades. Al aumentar la concentración de sal se recomienda usar lignosulfonato con soda caustica en relación de 4 a 1 lbs/ bbl. Para controlar las pérdidas de filtrado se usa la bentonita pre hidratada y polímeros (CMC) en cantidades moderadas para evitar incrementos en las propiedades reológicas.<sup>60</sup>

Cuando las concentraciones aumentan por encima de 10.000 ppm, resulta cada vez difícil controlar las propiedades y puede hacerse necesario convertir al lodo a otro tipo más resistente a la sal. Ej. Tratado con calcio o lodo de lignosulfonato.

Las arcillas secas del tipo montmorillonita, cuando se añaden a un lodo que contiene más de 10.000 ppm de sal, muestran una hidratación y dispersión pobre. A mayor concentración de sal, menor hidratación y dispersión de las arcillas. Cuando la concentración de la sal alcanza 50.000 ppm o mayor, la viscosidad y el control de filtrado de la arcilla se hace insignificante.

**Figura 83** Efecto de la Sal en la Viscosidad y el Filtrado



**Fuente:** Tecnología aplicada de lodos. IMCO

Las arcillas del tipo montmorillonita pueden ser pre-hidratadas antes de añadirlas al agua salada. El catión sodio provoca floculación de la arcilla hidratada, originando viscosidad con la

<sup>60</sup> HERNANDEZ PARRA, Martin, LADRON DE GUEVARA Álvaro, Manual de laboratorio de lodos: Contaminación con sal. Bucaramanga, 1979. 171 H. Trabajo de grado (ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. División de ciencias físico-químicas. Facultad de ingeniería de petróleos.

adición de cantidades mínimas de arcilla (figura 36). Con el tiempo el ion sodio actúa sobre la bentonita hidratada y hace que se encojan las plaquetas de arcilla; liberando así agua y eso determina una disminución de la viscosidad.

Para mantener la viscosidad debe agregar más bentonita prehidratada. Debido al ambiente floculado en los lodos salados, la velocidad de filtración es, con mayor frecuencia, extremadamente alta. Se hace necesario el empleo de filtrado como tratamiento suplementario.

**2.6.3 Lodos de agua salada saturada.** Los lodos de agua salada saturada se usan principalmente para perforar lechos masivos de sal o domos de sal, para evitar un ensanchamiento excesivo del pozo a nivel de estas secciones. Un pozo ensanchado puede causar:

- A. Falla de la sarta debido al golpeteo y exceso de torque.
- B. Sarta aprisionada debido a recortes que se acumulan en la cavidad.
- C. Dificultad en operaciones de pesca si se requiere hacer.
- D. Requerimientos excesivos de cemento en la zona ensanchada

Los lodos saturados de sal también se usan frecuentemente en operaciones de reparación.

**2.6.3.1 Preparación de los lodos saturados de sal.** Normalmente se perfora con un lodo de agua dulce hasta encontrar la zona de sal, luego se hace la conversión a un lodo saturado.

Cuando se decide convertir un lodo de agua dulce a un lodo saturado de sal, es deseable utilizar la mayor cantidad del viejo lodo. Este ofrece una fuente de viscosidad y de densidad, y de esta manera se ahorra en la cantidad de arcilla a usar.

Las adiciones de sal a un lodo de agua dulce producirán un espesamiento en este; por consiguiente, se hace necesario añadir agua al lodo viejo. Usualmente se requieren adiciones de un 30% y un 50%, dependiendo de la concentración de sólidos.

La cantidad de sal necesaria para saturar el lodo se calcula y luego se añade por medio del embudo.

El agente de control de filtrado se añade a continuación. Esto se hace por medio del embudo, mientras el lodo está circulando, hasta lograr la pérdida de filtrado deseada. Generalmente se emplea almidón como control de filtrado y como viscosificante suplementario.

Grandes adiciones de almidón darán como resultado un aumento de la viscosidad del lodo. Para hacer bajar esa viscosidad, contrólase con agua saturada de sal. Para elevar la viscosidad se emplean arcillas modificadas.

Con el tiempo (uno o dos días), la deshidratación y sedimentación de las partículas de arcilla de agua dulce, pueden causar una disminución de la viscosidad, con la consiguiente necesidad de un reajuste.

El lodo tendrá una densidad de 10.4 a 10.5 lpg sin material densificante agregado. Si se desea densidades mayores, puede añadirse barita. Cuando se usa un lodo densificado se recomienda un dispersante de lignosulfonato para impedir que se eleven más de lo deseado la viscosidad y la resistencia de gel. Soda cáustica se usa para controlar el pH, se añade usualmente junto con el dispersante, para lograr una mejor reducción de la viscosidad.

Generalmente en este tipo de lodos el pH se mantiene a 11 o 11.5, lo que ofrece varias ventajas:

1. Los dispersantes son más eficaces.
2. La corrosión se reduce.
3. El calcio soluble se reduce; esto hace que se necesiten menos aditivos reductores de pérdida de filtrado.
4. Hay menor tendencia a la formación de espuma.
5. El lodo es generalmente más estable.

Los lodos saturados de sal son sistemas altamente inhibitorios y es infrecuente que se presenten problemas de alta viscosidad. Sin embargo, a pesar de que los lodos saturados de sal evitan la dispersión e hidratación de las arcillas y lutitas, el porcentaje de sólidos en volumen debe mantenerse dentro del rango deseado, mediante adiciones de agua saturada de sal, para evitar un aumento indebido del gel o de la viscosidad. El agua saturada de sal contiene aproximadamente 12% en volumen de sal disuelta. Por consiguiente, para determinar el verdadero contenido de sólidos debe multiplicarse la fracción fluida del lodo (que depende de la densidad) por 12 y sustraerse esa cifra al contenido de sólidos, que se determinaron en la prueba de la retorta.

**2.6.4 Lodos salados.** Los lodos salados se originan con mayor frecuencia como resultado de perforar formaciones de sal con un lodo de agua dulce. Generalmente se les denomina de acuerdo al tipo principal de aditivo para control de filtrado que se utiliza en ellos. Estos

contienen entre 30.000 ppm y 100.000 ppm de sal, dependiendo de la cantidad de sal perforada y del grado de dilución con agua dulce.

Estos lodos, pueden, en algunos casos, prepararse intencionalmente con sal en bolsas o con salmuera, para perforar secciones de lutitas dificultosas y para evitar que las lutitas se desprendan o desmoronen, bien para prevenir la dispersión de los sólidos perforados con aumento de la viscosidad.

Los lodos de agua salada proveniente de la formación y se utilizan frecuentemente para operaciones de reparación o como lodos de terminación.

- ♣ Se emplean para evitar que las arcillas o lutitas de la formación productora se hinchen o hidraten, con lo que se reduciría la permeabilidad y la producción
- ♣ También pueden ser utilizados como lodos de bajo contenido de sólidos con suficiente densidad, sin adición de barita como densificante, para controlar presiones que se encuentran frecuentemente en operaciones de reparación y terminación de pozos.

Estos lodos pueden contener desde 30.000 ppm de sal hasta niveles de saturación.

**2.6.4.1 Preparación de lodos salados.** Se trata usualmente de lodos con baja concentración de sólidos, baja densidad y un tratamiento químico mínimo, y normalmente poseen baja viscosidad y alta pérdida de filtrado. En muchos casos, se emplean agua dulce y acuagel para comenzar la perforación y colocar revestimiento de superficie. A medida que la perforación progresa, y cuando el contenido de sal excede las 20.000 ppm, generalmente se emplea un viscosificante.

Cuando las propiedades del lodo se hacen más críticas, se usa el almidón para control de la filtración y como viscosificante, teniendo en cuenta de usar un preservativo. Esos lodos son generalmente denominados lodos de almidón. Si se utiliza Drispac como aditivo principal para el control de la filtración, se les suele llamar lodos de Drispac.

**2.6.5 Lodos de agua salobre y lodos de agua de mar.**

**2.6.5.1 Lodos de agua salobre.** En muchas áreas, por razones económicas o por falta de agua dulce en cantidad suficiente, se utiliza agua salobre como agua de constitución para lodos. Estos lodos se denominan generalmente lodos de agua salobre si su contenido de sal es de aproximadamente de 10.000 a 20.000 ppm. Se usan generalmente en bahías de tierra adentro o donde el agua de constitución de la formación es salobre.

**2.6.5.2 Lodos de agua de mar<sup>61</sup>.** En perforaciones costa afuera, donde el transporte de agua dulce puede ser muy costoso, se usa agua de mar la cual contiene en solución iones de sodio, calcio y magnesio. En general se puede considerar dos tipos de lodos de agua de mar:

- ★ Aquellos en los cuales el calcio y el magnesio se remueven en forma de precipitados insolubles con la adición de álcalis como NaOH, Ca (OH)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub> CO<sub>3</sub>, y NaHCO<sub>3</sub>. El pH del lodo se mantiene en valores por encima de 11,0. La remoción del magnesio y del calcio permite un tratamiento más económico con lignosulfonatos.
- ★ Aquellos en los cuales el pH se mantiene en 9 y 10, el cual es bastante alto para asegurar solubilidad de los adelgazantes y suficientemente bajo para mantener el magnesio en el sistema. En este lodo se sacrifica el mantenimiento económico de las propiedades del fluido con el objetivo de obtener la estabilidad de las lutitas a causa del magnesio.

**Tabla 38** Composición típica de una muestra de agua de mar

COMPONENTE	Mg/L
Sodio	10 400
Potasio	375
Magnesio	1 270
Calcio	410
Cloruro	18 970
Sulfato	2 720
Dióxido de carbono	90
Densidad 8,5 lb <sub>m</sub> /gal	

<sup>61</sup> HERNADEZ PARRA, Martin, LADRON DE GUEVARA, Álvaro. Manual de laboratorio de lodos: Lodos salados. Bucaramanga, 1979. 171 H. Trabajo de grado (ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. División de ciencias físico-químicas. Facultad de ingeniería de petróleos.

**2.6.5.3 Corrección de los sólidos para lodos de agua salada.** En la prueba de la retorta, la sal como los otros sólidos se separan de la fracción líquida por ello hay que determinar la cantidad de sal y la cantidad de sólidos del lodo. Para hacer esta corrección se usa la figura 37. Con la concentración Cl<sup>-</sup> se lee el % v/v de NaCl. Dependiendo de la densidad (lpg), se lee la fracción líquida, esta se multiplica por el % v/v leído, esto se le resta al % de sólidos de la prueba de la retorta.

#### **2.6.5.4 Aditivos usados para controlar las propiedades de los lodos de agua salada.**

- Viscosificantes. La arcilla atapulgita es el viscosificante más comúnmente utilizado en lodos que contienen sal en concentraciones mayores a 35.000 ppm. También se usan para este propósito la goma guar, la fibra de asbesto y en los lodos de menos de 35.000 ppm de sal arcillas del tipo montmorillonita.
- Pérdida de filtrado. El almidón es el aditivo que se emplea para el control de filtrado en lodos salados. Es el aditivo más efectivo cuando la concentración es mayor a 35.000 ppm. También se usa para controlar el filtrado en lodos de menos de 50.000 ppm de sal la CMC.
- Dispersantes. Los dispersante más eficaces para lodos salados son los lignosulfonatos modificados.
- Controlador de pH. Se usa generalmente soda cáustica para mantener el valor de pH entre 9.0 y 11.0. Se puede utilizar carbonato de sodio para precipitar el calcio del agua salada, permitiendo así una mejor hidratación de las arcillas y una máxima eficacia de los aditivos para el control de filtrado. Los antiespumígenos de tipo jabón se recomiendan para combatir la espuma en lodos salados. También pueden usarse alcoholes de alto peso molecular como el alcohol octílico.

## **2.7 LODOS DISPERSOS**

Este tipo de lodo se utiliza en las operaciones de perforación según lo requieran las condiciones del lodo. Se denominan dispersos puesto que usan materiales dispersantes para corregir las propiedades como viscosidad y pérdidas de filtrado debido a la contaminación del lodo durante la perforación, la cual no es posible controlar con tratamiento químico o este se hace muy costoso. Este tipo de lodos soporta una mayor cantidad de sólidos en suspensión, siendo los apropiados para ser utilizados en lodos de alta densidad.

**2.7.1 Lodos de Lignosulfonato.** A raíz del éxito obtenido en el tratamiento de la fuerza gelatinosa en lodos de yeso en el año de 1956 con lignosulfonato de cromo y hierro se empezó el camino hacia el desarrollo de la tecnología de los lodos lignosulfonatos.

Estos compuestos orgánicos funcionan como aditivos de propósitos múltiples, ya que actúan como agentes de control de pérdida de filtrado, protectores de la pared del hueco, preventores de corrosión y además controlan la reología de los lodos de agua dulce o en presencia de contaminantes.

Los fluidos de lignosulfonato de agua dulce se utilizan comúnmente para la perforación en áreas donde prevalecen las formaciones “productoras de lodo” estos fluidos ofrecen control reológico e inhibición de los sólidos de la perforación.

El mecanismo por el cual los lignosulfonatos cumplen con las funciones antes descritas no se ha podido explicar de una manera total, sin embargo autores como Browning<sup>62</sup> estudiaron el mecanismo de emulsión, estabilización y concluyeron que los lignosulfonatos son adsorbidos en la interfaz agua-aceite formando una película semirrígida que tiene mayor estabilidad mecánica y química que las capas formadas por polvo sólido. Los lignosulfonatos no son solubles en aceite aunque son mojados por él. Se cree que los lignosulfonatos de cromo se fijan sobre las partículas de arcilla por atracción de valencias del borde del enlace fracturado, reduciendo de esa manera la fuerza atractiva entre las partículas; este dispersante reduce a cero las cargas negativas de la superficie del mineral y actúa además como agente de control de pérdida de filtrado. Así este fenómeno explica la habilidad del dispersante para reducir la viscosidad y la resistencia de gel. Se cree también que en altas concentraciones, el lignosulfonato, por adsorción masiva sobre la estructura de la arcilla, tiene un efecto bloqueante que minimiza la reacción de intercambio de bases y suprime la hidratación de las partículas de arcilla, por su efecto bloqueante. En consecuencia, los lodos tratados con altas concentraciones de lignosulfonato crómico poseen cualidades inhibitorias las cuales tienden a mantener las arcillas de la formación en su condición natural.

Los tratamientos con lignosulfonato de cromo proveen un excelente control de la reología del lodo así como estabilidad de las paredes del pozo. El dispersante actúa también como agente

---

<sup>62</sup> Browni ng, W.C., "Lignosulfonate Stabilized Emulsions in Oil Well Drilling Flu1ds." J. Petrol. Technol. (June, 1955). pp. 915. Citado por: H.C.H. Darley. GRAY. R. George. Composition and properties of drilling and completion fluids. Drilling fluids components. 5 edition. Gulf Professional Publishing. Houston TX 1988 P 580

efectivo de control de filtrado debido al efecto taponante de las sales ferrocromicas y a la máxima dispersión que se logra. Las sales de metales pesados en estos lignosulfonatos modificados no se descomponen fácilmente, pueden ser estables a temperaturas por encima de los 400°F es decir que tienen poca degradación con la temperatura, lo cual facilita su uso en pozos profundos, sin necesidad de utilizar otros aditivos para controlar las diferentes propiedades. Además tiene la propiedad de ser un lodo de agua dulce inmune a contaminantes como la sal, el cemento y el yeso. Estos lodos mantienen bajo pH y baja concentración de iones de calcio.

**2.7.2 Lodos dispersos con fosfatos.** Son aquellos en los cuales uno o más fosfatos complejos son usados como adelgazantes. Los fosfatos más usados en el lodo de perforación son:

<b>Pirofosfato Ácido de Sodio (SAPP)</b>	<b>pH de 4,8.</b>
<b>Tetra fosfato de Sodio (STP o PHOS)</b>	<b>pH de 8,0.</b>
<b>Pirofosfato tetra sódico (TSPP)</b>	<b>ph de 10,0</b>

Estos fosfatos son potentes dispersantes no iónicos y sólo un tratamiento pequeño puede producir la máxima reducción de la viscosidad. La cantidad de producto de tratamiento para la simple dispersión casi nunca excede 0,2 lb/bbl. Esto significa que para un sistema de 1.000 bbl, sólo se requiere 200 lb para diluir el fluido. Los fosfatos pueden ser añadidos directamente a través de la tolva o a partir del barril químico. Si los fosfatos son añadidos a partir del barril químico, se mezclará aproximadamente 50 lb de fosfato con un barril de agua. Luego se añade la solución directamente al lodo, de manera uniforme durante una circulación.

Los fosfatos son usados principalmente en lodos de bajo pH entre 8-9 y lodos de perforación inicial. Los fosfatos reducen la viscosidad de dos maneras:

Neutralizan las fuerzas de atracción al ser adsorbidos en la superficie de los sólidos  
Eliminan el calcio y el magnesio.

Debido a su bajo pH y a su capacidad para eliminar el calcio, el SAPP es un excelente agente de tratamiento para la contaminación de cemento la cantidad requerida depende de la gravedad de la contaminación y en algunos manuales se proporcionan patrones de la cantidad a utilizar: “como una pauta general, podemos decir que se pueden utilizar 0,2 lbm/bbl (0,6 kg/m<sup>3</sup>) de

SAPP para tratar aproximadamente 200 mg/L de ión calcio<sup>63</sup>. Los fosfatos casi nunca son usados solos en el tratamiento del lodo; más bien se usan para complementar el control, junto con la soda cáustica y un diluyente orgánico. Si el SAPP (pH de 4,8) fuera usado solo de manera continua, el lodo se volvería ácido. Esto podría ser perjudicial y podría causar una corrosión grave y una viscosidad excesiva. El PHOS tiene un pH más neutro (8,0), lo cual hace que sea más adecuado para los tratamientos de rutina de dilución del lodo.

Los fosfatos tienen una aplicación limitada para el tratamiento. Los materiales no son diluyentes eficaces del lodo a temperaturas moderadas. Si la temperatura del lodo excede considerablemente 175°F (79,4°C), los fosfatos se transforman en ortofosfatos. Como ortofosfatos, éstos pueden ser flocculantes en vez de ser deflocculantes. Esto no descarta la posibilidad de utilizar fosfatos para secuestrar el calcio a altas temperaturas. Como ortofosfatos, estos materiales aún tienen la capacidad de reducir el calcio, aunque su capacidad diluyente sea inferior. Además, los fosfatos no son eficaces en altas concentraciones de sal.

#### **TANINO Y LIGNITO<sup>64 65</sup>**

Los aditivos ricos en tanino, es decir quebracho, solían utilizarse como adelgazadores antes de la llegada de los lignosulfonatos. El material se deriva del árbol conocido como “quebracho” y generalmente su pH es de 3,8.

La mayoría de los productos del quebracho son una mezcla de extractos. Fundamentalmente, se emplean como adelgazadores en los fluidos de perforación de agua dulce, para los pozos de profundidad moderada. El producto es inestable a temperaturas por encima de 240°F (114°C). Además, pierde su eficacia en ambientes que contienen sal en exceso (6000 a 7000 mg/L) o ión calcio (240 mg/L). El sistema puede mantenerse en un pH tan bajo como 9, pero puede tolerar una mayor contaminación por sal y calcio en intervalos de pH entre 10,5 a 11,5. Cuando se utiliza como adelgazador para los fluidos de agua dulce, generalmente es suficiente agregar 1 a 2 lbm/bbl (2,8 a 5,7 kg/m<sup>3</sup>). Los materiales de lignito generalmente se emplean para el control de la filtración y, algunas veces, también en los fluidos de perforación de agua dulce y bajo

---

<sup>63</sup> BAKER HUGHES.Fluidos. Manual de ingeniería. Guía de referencia 750-500 Rev. B agosto de 1998. P 200.

<sup>64</sup> lbit., p 200 201

<sup>65</sup> H.C.H. Darley. GRAY. R. George. Composition and properties of drilling and completion fluids. Drilling fluids components. 5 edition. Gulf Professional Publishing.Houston TX 1988 P 580

contenido de sólidos, como adelgazador. Al utilizar materiales ligníticos, agregue suficiente soda cáustica para obtener un pH de 9,5 a 10,5. Generalmente, se requiere 1 lb de cáustico por cada 2 a 4 lbs de lignito utilizado. Se suelen recomendar tratamientos de 1 a 2 lbm/bbl (2,8 a 5,7 kg/m<sup>3</sup>), cuando estos materiales se emplean como adelgazadores en los fluidos de agua dulce.

## **2.8 LODOS NO DISPERSOS**

La rata de penetración es un factor importante en el costo de perforar un pozo. La experiencia ha demostrado que con los otros factores iguales, cuanto más baja es la concentración de sólidos en el lodo, mayor es la velocidad de penetración.

Las partículas de arcilla y los sólidos perforados del tamaño de arcilla parecen ser particularmente perjudiciales para la velocidad de penetración.

Los dispersantes aumentan la tolerancia de los lodos a los sólidos perforados y aumenta la cantidad de sólidos coloidales en el lodo. Por lo tanto un lodo de sólidos mínimos implica un lodo no disperso.

Hay consideraciones reológicas que diferencian los lodos dispersos de los no dispersos. El punto de cedencia (yield point  $Y_p$ ) es un parámetro que está muy relacionado con la capacidad de un lodo para mantener en suspensión los recortes (cuttings) y la barita, y para retener las características de flujo laminar. La viscosidad plástica  $V_p$  es principalmente un indicador de la consistencia del lodo que fluye hacia abajo a lo largo de la sarta, donde la viscosidad no es un indicador significativo. La reología normal de los lodos dispersos, con la viscosidad plástica que es el triple del punto de cedencia es claramente contraria a los objetivos para los no dispersos. Un lodo típico no disperso, de baja densidad, posee una reología invertida, es decir, caracterizada porque el punto de cedencia es igual o excede a la viscosidad plástica.

El incremento de sólidos pueden espesar los lodos no dispersos hasta el punto en que se hace necesario añadir dispersantes. Un control continuo y efectivo de los sólidos es absolutamente esencial si se quiere mantener un lodo no disperso.

Debido a que los dispersantes orgánicos están ausentes y que la concentración de sólidos coloidales es baja, estos lodos normalmente presentan velocidades de filtración más altas de lo que es habitual en los lodos dispersos, aunque la torta (cake) es más delgada de lo que se podría esperar. Para prevenir las pérdidas de filtrado estos lodos se tratan con diferentes aditivos entre los cuales encontramos los polímero y almidones.

**2.8.1 Lodos no dispersos con Acuagel.** La bentonita acuagel y el agua dulce producen un lodo con buena capacidad de acarreo, características favorables de reducción de viscosidad por corte y buen control de pérdida de filtrado. Este es un lodo de inicio de empleo frecuente, que también se utiliza en algunos casos a mayores profundidades.

Las propiedades desagua son importantes. La presencia de sal y la dureza en el agua interfieren con la hidratación de la bentonita y reducen su eficacia.

La dureza de calcio debe ser eliminada del agua por adición de carbonato de sodio. La adición de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  lpb de soda cáustica puede también ayudar a disminuir la dureza. La sal no puede ser removida del agua. Si hay menos de 5.000 ppm de sal, la hidratación de la bentonita no se ve virtualmente afectada; si hay más de 50.000 ppm de sal, se produce muy poca hidratación.

La bentonita se añade por medio del embudo a razón de 2 a 15 minutos por bolsa. Esta adición debe ser suficientemente lenta y la agitación en las piletas suficientemente vigorosa para que no se produzcan montones adheridos, embolamiento o desperdicio de arcilla. El rendimiento inicial depende, en parte, de la calidad del equipo mezclador en superficie; normalmente, el lodo se hace más espeso con el tiempo y con la circulación.

Como regla empírica, se puede decir que 20 a 25 lpb de bentonita en agua dulce, producirán un lodo con una viscosidad de embudo de 35 a 40 segundos por cuarto de galón.

La capacidad de acarreo de los lodos de agua-bentonita puede ser aumentada añadiendo más bentonita, agregando fibras de asbesto o, en lodo de agua dulce, mediante la adición de un extendedor de bentonita. Otra forma de incrementar la capacidad de acarreo consiste en flocular la bentonita ya hidratada con una o dos bolsas de cal o de cemento. Esto se hace en algunos lodos de inicio en los que preocupa poco el control de pérdida de filtrado y las presiones de circulación. La bentonita es un viscosificante eficaz en lodos de agua salada si se ha pre-hidratado en agua dulce. Después de mezclarla con agua salada, la bentonita pre-hidratada flocula, produciendo un lodo de textura esponjosa. La viscosidad se mantiene o aumenta mediante adiciones ulteriores de bentonita pre-hidratada. Generalmente no hay control de pH en los lodos de inicio. Sin embargo, en los otros lodos de agua-bentonita el pH se mantiene normalmente entre 8.0 y 9.5.

**2.8.2 Lodos no dispersos con polímeros.** Los polímeros son los productos de control de filtración más usados en los lodos base agua. Pueden variar de almidones naturales y celulosa

modificada a polímeros sintéticos complicados, capaces de proporcionar el control de filtración a temperaturas elevadas y en condiciones adversas.

Estos polímeros a veces se clasifican según su acción dentro de un sistema de lodo, así como también según su composición química. La clasificación basada en la acción depende de si el polímero se adsorbe en los sólidos o viscosifica la fase fluida.

Los polímeros de pérdida de filtrado más comunes no sólo viscosifican la fase fluida, sino también se adsorben en los sólidos cuando son usados en suficientes concentraciones, proporcionando la encapsulación de dichos sólidos. Al agregar polímeros a los lodos será necesario tomar ciertas precauciones, debido a las posibles interacciones con otros productos químicos contenidos en el sistema de lodo. Para las operaciones en el campo, se recomienda realizar pruebas piloto antes de usar un nuevo aditivo de control de filtración.

Los polímeros reducen la pérdida de filtrado de varias maneras:

- A. Sellando las aberturas del revoque con partículas de polímeros.
- B. Encapsulando los sólidos mediante la formación de un revestimiento o una película deformable más grande que reduce la permeabilidad del revoque.
- C. Mediante la viscosificación de la fase líquida.

**2.8.3 Lodos no dispersos con almidón.** Los lodos con almidón son lodos no dispersos cuyo agente principal de control de filtrado es el almidón pre-gelatinizado. Además del control de filtración, el almidón contribuye con su viscosidad y provee inhibición encapsulante por su acción de recubrimiento de los sólidos de perforación.

Los lodos de almidón son usualmente sistemas de agua salada; sin embargo, en algunas áreas se han utilizado lodos de almidón con agua dulce.

El contenido en almidón es aumentado gradualmente hasta alcanzar un total de 2 a 8 lpb. Como ocurre con cualquier viscosificante, debe tenerse cuidado para evitar que se sobrepase en todo momento.

Para evitar la fermentación del almidón, estos sistemas deben incorporar un bactericida, a menos que sean saturados de sal o que tengan un Pf de 1.0 o más. Los síntomas iniciales de fermentación son el aumento de las pérdidas de filtrado API y la aparición de pequeñas

burbujas en la torta o en la superficie de las piletas no agitadas. Si se detectan síntomas, se debe iniciar inmediatamente un tratamiento intensivo. El pH de los lodos de almidón no dispersos se mantiene habitualmente en un nivel entre 7.0 y 9.5. Se usan a menudo secuestrantes de oxígeno, aminas fílmicas u otros materiales inhibidores de corrosión.

## **2.9 LODOS CON CALCIO**

La abundancia de minerales arcillosos en las capas superficiales terrestres es abundante, esto hace que en casi cualquier pozo petrolero se encuentre en abundancia.

Durante la perforación los uno de los estratos más difíciles de perforar son los de arcillas y entre estos causan mayor dificultad las arcillas no consolidadas, ya que estas se hidratan en presencia de agua. La intrusión de agua en los espacios inter laminares a lo largo de las partículas planas del mineral es lo que hace que se produzca el efecto de hidratación; siendo el grado de adsorción de agua una cualidad que depende del tipo de arcilla presente.

Los lodos con calcio retardan o inhiben, dependiendo del tipo de arcillas y las condiciones del lodo, la hidratación de estas y son aplicables en la perforación de secciones de anhidrita, yeso y cal de considerable espesor; al perforar dichas formaciones el calcio actúa como un contaminante del lodo base, si la contaminación es baja se puede tolerar con tratamientos químicos; cuando es muy alta su tratamiento no es económico y es mejor pasar a transformar el lodo a un sistema de lodo con calcio.

La principal diferencia de estos lodos y otros base agua radica en que las arcillas base sodio de cualquier bentonita comercial o la que es aportada por la formación es convertida en arcilla base calcio mediante la adición de cal o yeso, logrando así mantener más unidas a las placas de arcillas, liberando agua, disminuyendo viscosidad y logrando una mejor tolerancia a sólidos con bajas viscosidades.

Existen principalmente tres tipos de lodos base calcio:

**Lodos calados  $\text{CaOH}_2$**

**Lodos de cloruro de calcio  $\text{CaCl}_2$**

**Lodos de yeso  $\text{CaSO}_4$**

Cuando se agrega calcio a las arcillas prehidratadas el efecto inicial es una intensa floculación debida a una alteración de las cargas eléctricas de las partículas de arcilla. Inicialmente la viscosidad del lodo aumenta pero después disminuye; esta variación de viscosidad se denomina pico de variación.

El punto en el cual se aprecia reducción en la viscosidad corresponde a una concentración de 200 ppm de  $\text{Ca}^{++}$ ; por esta razón, se deben convertir a lodos base calcio.

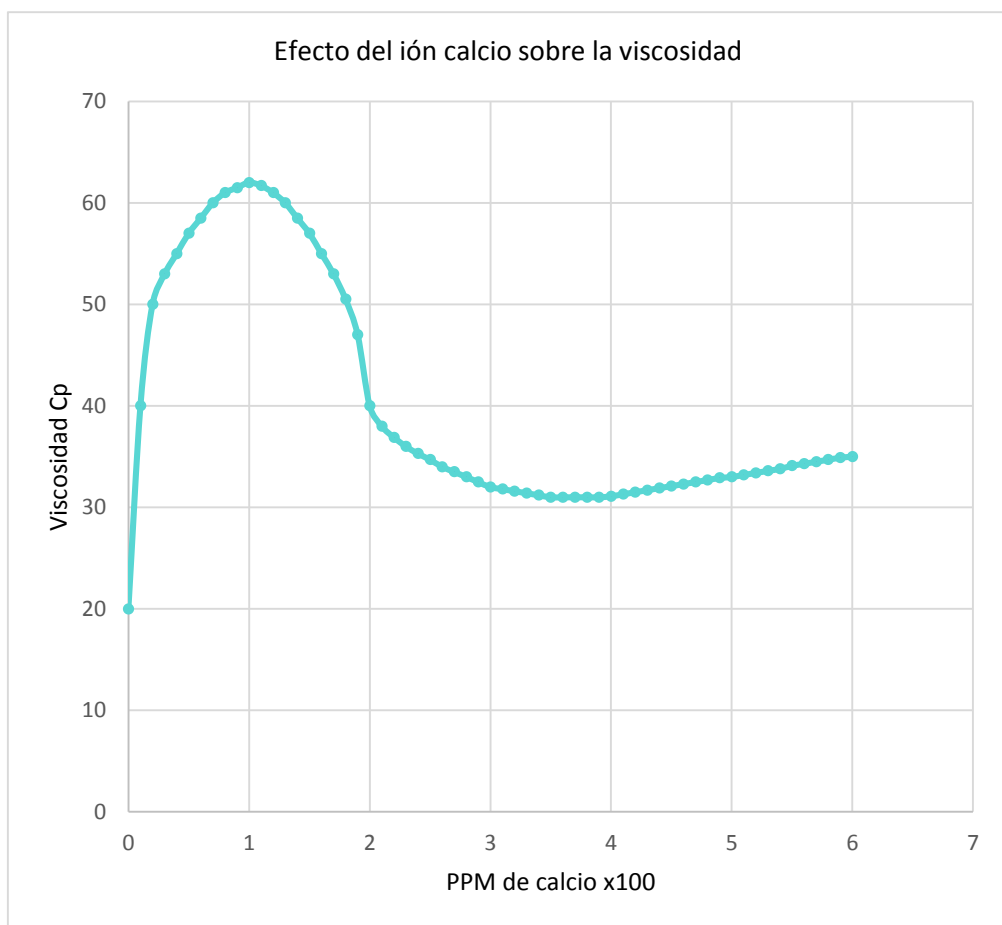
El calcio está presente en proporciones diferentes según el tipo de lodo base calcio que se tenga, así de esta manera se tiene de mayor a menor:

Valores por encima de 1.200 ppm de  $\text{Ca}^{++}$  en lodos base yeso

400-800 ppm de  $\text{Ca}^{++}$  lodos de  $\text{CaCl}_2$

80-200 ppm de  $\text{Ca}^{++}$  en un lodo de cal

**Figura 84** Efecto del ión calcio sobre la viscosidad



**Fuente:** Modificado de Clay Chemistry

<sup>66</sup> Milchen, "Clay Chemistry" citado por: BUSTOS DOMÍNGUEZ Jorge Enrique. OSPINO ROJAS Enoc Rafael. Reestructuración teórico-práctica del laboratorio de lodos y cementos (manual teórico). Bucaramanga, 1988, 77 p. Requisito parcial para optar por el título de ingeniero de petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-químicas, escuela de ingeniería de petróleos.

**2.9.1 Factores que pueden afectar la conversión de los lodos.** Los principales factores que pueden afectar la conversión de un lodo base a uno base calcio son:

**La concentración de sólidos:**

Mientras exista una mayor concentración de sólidos, mayor será el pico de conversión de la viscosidad, por lo tanto, el lodo se debe disolver en agua.

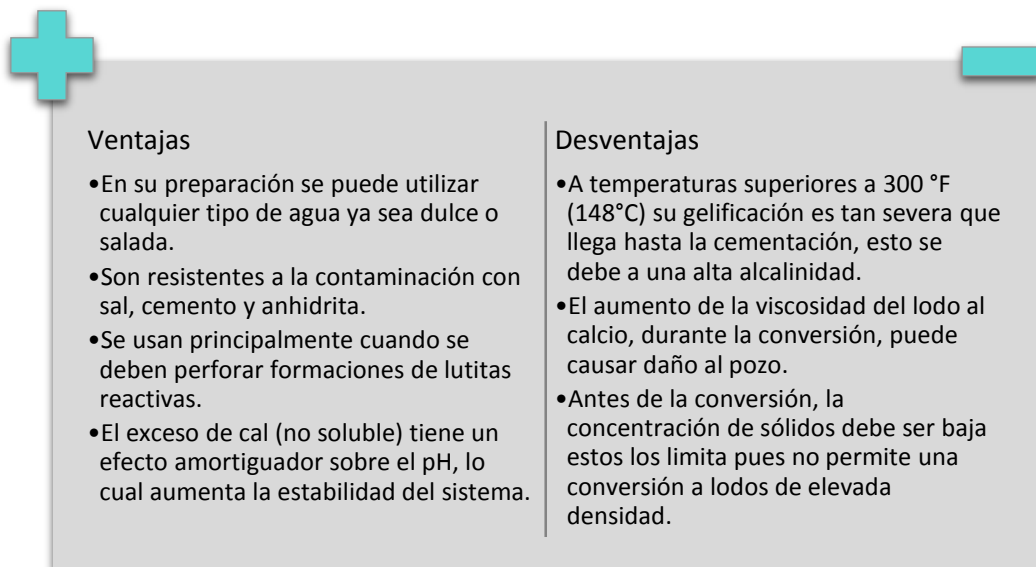
**El tipo de arcilla:**

La montmorillonita sódica tiene una capacidad mucho más alta de intercambio de base que la cálcica, absorbiendo cantidades mayores de calcio soluble.

**La alcalinidad:**

Para controlar la alcalinidad, la soda caustica y los dispersantes se deben agregar simultáneamente al lodo con la adición del compuesto de calcio, reduciendo así un mínimo el espesamiento del lodo.

**2.9.2 Ventajas y desventajas de los lodos con calcio.**



Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• En su preparación se puede utilizar cualquier tipo de agua ya sea dulce o salada.</li><li>• Son resistentes a la contaminación con sal, cemento y anhidrita.</li><li>• Se usan principalmente cuando se deben perforar formaciones de lutitas reactivas.</li><li>• El exceso de cal (no soluble) tiene un efecto amortiguador sobre el pH, lo cual aumenta la estabilidad del sistema.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• A temperaturas superiores a 300 °F (148°C) su gelificación es tan severa que llega hasta la cementación, esto se debe a una alta alcalinidad.</li><li>• El aumento de la viscosidad del lodo al calcio, durante la conversión, puede causar daño al pozo.</li><li>• Antes de la conversión, la concentración de sólidos debe ser baja estos los limita pues no permite una conversión a lodos de elevada densidad.</li></ul>

**Figura 85** Ventajas y Desventajas de Lodos con Calcio

**2.9.3 Lodos calados.** Los lodos calados son aquellos que usan como fuente el hidroxilo de calcio o cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Se emplean cuando se desea un lodo inhibido con temperaturas hasta de 275°F (135°C) y reducir los efectos de los gases ácidos  $\text{CO}_2$  o  $\text{H}_2\text{S}$ , también ayuda a reducir la hidratación de las arcillas de la formación.

Los lodos de cal se clasifican en:

**Lodos de bajo contenido de cal y de baja alcalinidad:**

Se emplean generalmente a altas temperaturas.

**Lodos de moderado contenido de cal y moderada alcalinidad:**

Se usan en áreas donde se encuentran flujos de agua salada o zonas de yeso.

**Lodos de alto contenido de cal y alta alcalinidad:**

El calcio soluble varía entre 80 y 200 ppm y está controlado por la alcalinidad del filtrado así que mientras más alta sea la alcalinidad menor será la cantidad de cal en ppm.

**2.9.3.1 Conversión.** Convertir un lodo de base agua a uno tratado con cal puede realizarse de la siguiente manera:

1. Reducir la viscosidad de embudo de Marsh a 33 o 40 seg/ ¼ gal, mediante la adición de agua.
2. Agregar soda caustica (2-3 lb/bbl).
3. Dispersante (2-4 lb/bbl)
4. Cal (4-8 lb/bbl).

A medida que se agrega la soda caustica, se hacen las adiciones correspondientes al dispersante y la cal. Al momento de agregar la cal, el lodo se flocula y se hace muy viscoso, esto se debe controlar agregando más dispersante y/o agua.

Después de la conversión inicial, las propiedades como el filtrado, la viscosidad y el pH deben ser refinadas mediante la adición de materiales propios para estos propósitos como lo es el almidón de para el control del filtrado. El uso de preservativo no es necesario debido a la alta alcalinidad del lodo que impide que inicie el proceso de fermentación. Además se usa aceite diésel con lignito de 1-3 lb/bbl para aumentar la lubricidad y disminuir la pérdida de filtrado.

Después de la conversión se debe mantener el pH con soda caustica y la viscosidad con la adición de agua o sustancias químicas.

**2.9.3.2 Tratamiento.** Las contaminaciones en los lodos con cal son por:

**Temperatura:**

A temperaturas mayores de 275°F (135°C) ocurre gelificación y cementación que depende de la concentración de sólidos, el grado de alcalinidad y el contenido de calcio en el lodo; por lo tanto estas características se deben reducir.

**Yeso-anhidrita:**

Al perforar grandes secciones puede causar problemas de viscosidad, de resistencia de gel o de pérdida de filtrado. La adición de soda caustica mantiene el pH en un rango deseado y hace que las propiedades se mantengan en los valores estipulados. En este caso es más económico convertir a lodo de yeso.

**Sal:**

Para concentraciones mayores de 60.000 ppm es necesario el uso de dispersantes.

**Cemento:**

Siempre y cuando las concentración de sólidos este dentro de un rango aceptable y se haya utilizado los dispersantes adecuados la contaminación con cemento tiene escasos efectos sobre las propiedades del lodo.

**2.9.4 Lodos de cloruro de calcio.** Permiten la estabilización de las paredes del hueco gracias a su gran capacidad inhibitoria. Se emplean principalmente para perforar zonas de lutitas y arcillas esquistosas.

**2.9.4.1 Conversión.** Se pueden preparar a partir de cualquier lodo base agua. Antes de la conversión se debe diluir con agua para evitar el exceso de sólidos y la evitar el espesamiento excesivo.

Debido a que el pico de conversión es mayor que en los otros tipos de lodo con calcio, se presenta un alto grado de floculación al agregar el cloruro de calcio, lo cual hace necesario el uso de agentes dispersantes.

Después de adicionar agua se debe agregar:

Lignosulfonato o hacer un tratamiento previo con un dispersante para reducir la viscosidad Marsh.

Cloruro de calcio (5-8 lb/bbl)

Almidón (2-4 lb/bbl), para el control de filtrado

Soda cáustica para mantener el pH entre 11.8 y 12.5

Mantener las propiedades de un lodo con cloruro de calcio requiere tratamiento con dispersantes, controladores de filtrado, soda caustica y cloruro de calcio.

El  $p_m$  de los lodos con cloruro de calcio debe estar entre 8 y 10 cc y el calcio soluble debe controlarse entre 400 y 800 ppm de  $Ca^{++}$

A diferencia de otros lodos con calcio, los lodos de  $\text{CaCl}_2$  presentan altas resistencias de gel, pero frágiles, lo cual ocasiona problemas en la circulación del pozo.

**2.9.4.2 Tratamiento.** Las contaminaciones en los lodos de  $\text{CaCl}_2$  son por:

**Sal:** toleran contaminación con sal hasta de 90.000 ppm, mayores adiciones de sal en el sistema producen un aumento de su viscosidad, resistencia de gel y pérdida de filtrado; por lo tanto, se hace necesario el uso de soda caustica para controlar el pH y un dispersante para reducir la viscosidad.

**Cemento:** al perforar grandes secciones de cemento, es necesario el lignosulfonato para mantener las propiedades reológicas.

**Yeso-anhidrita:** en la perforación de zonas de estos minerales se puede producir un aumento del calcio soluble, incrementando así la pérdida de filtrado. Se debe mantener el ión calcio en el rango deseado con la adición de carbonato de sodio y lignosulfonato de cromo.

**2.9.5 Lodos con yeso.** Al perforar formaciones de anhidrita o yeso es preferible optar por diseñar un lodo cálcico en base de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como fuente de calcio; estos son altamente inhibidores de lutitas sensibles y son capaces de mantener óptimas propiedades de flujo con altas densidades.

**2.9.5.1 Conversión.** Su preparación al igual que en los anteriores lodos, parte de cualquier lodo base agua o ligeramente tratado. Antes de la conversión a un lodo con yeso, debe diluirse con agua para reducir la concentración de sólidos y evitar espesamiento excesivo.

Después de la adición de agua se debe agregar:

Yeso (4-8lb/bbl)

Dispersante (lignosulfonato modificado) de 3-6 lb/bbl, para controlar viscosidad y gel

Soda cáustica (0.5-1.5 lb/bbl), mantener el pH entre 9.5 y 10.5

Almidón (1-1.5 lb/bbl), conveniente para controlar el filtrado

Aceite para mejorar la lubricidad.

Generalmente, no se requiere el uso de emulsificante ya que lignosulfonato modificado tiene un excelente efecto como emulsificante.

En estos lodos el calcio soluble en el filtrado debe estar entre 500 y 1.200 ppm y se aprecia su gran capacidad para tolerar altas concentraciones de sólidos, pero se deben mantener dentro de las especificaciones para evitar súbitos cambios en las propiedades reológicas.

**2.9.5.2 Tratamiento.** Los contaminantes de los lodos de yeso y su tratamiento son:

**Yeso-anhidrita:** tienen escasos efectos siempre y cuando la concentración de sólidos este dentro del rango aceptable.

**Cemento:** al perforar grandes secciones de cemento, puede elevarse el  $p_f$  más de lo normal y esto producirá un aumento de la viscosidad; en este caso se debe agregar un dispersante.

**Sal:** son tolerantes hasta 100.000 ppm de sal, después de esto se requiere adicionar soda cáustica para mantener el ph deseado y el uso de un dispersante reductor de viscosidad.

**2.9.6 Comparación de las propiedades de los lodos base calcio.** La diferencia principal en las propiedades de los lodos base calcio se presenta en la alcalinidad y en el calcio soluble. Estos factores afectan las propiedades e flujo, resistencia de gel e inhibición de las arcillas y lutitas.

**Tabla 39** Comparación de las propiedades de los lodos base calcio

PROPIEDAD	LODO BASE CAL	LODO DE CLORURO DE CALCIO	LODO DE YESO
Densidad del lodo (lb/bbl)	15	15	15
Viscosidad Marsh (seg/ ¼ gal)	55	55	55
Viscosidad aparente (cp)	35	35	35
Viscosidad plástica (cp)	30	24	25
Punto cedente (lb/100 pie <sup>2</sup> )	10	22	20
Geles (lb/100 pie <sup>2</sup> )	0/0	10/15	5/10

**Fuente:** Modificado de<sup>67</sup>

<sup>67</sup> BUSTOS, Op. cit., p 91

**Tabla 40** Concentraciones de Aditivos de los Lodos Base Calcio

PRODUCTO (LB/BBL)	LODOS CALADOS	LODOS CLORURO DE CALCIO	LODOS DE YESO
Controlador de filtrado	El necesario	El necesario	El necesario
Dispersante	El necesario	El necesario	El necesario
Na(OH) <sub>2</sub>	Necesario para mantener el pH	El necesario para mantener el pH	El necesario para mantener el pH
Ca(OH) <sub>2</sub>	4-8		
Yeso			4-8
CaCl <sub>2</sub>		3-6	

**Fuente:** Reestructuración teórico-práctica del laboratorio de lodos y cementos <sup>68</sup>

## 2.10 LODOS EMULSIONADOS

Los lodos de emulsión inversa o base aceite son lodos en los que la fase continua es un producto oleo o aceite. Sus propiedades están influenciadas por: la relación aceite/agua, el tipo de emulsificador y concentración y el Contenido de sólidos.

**2.10.1 Teoría de las emulsiones inversas.** En una emulsión inversa se mezclan dos líquidos inmiscibles: el aceite y el agua. Esta agua está dispersa en pequeñas gotas y distribuida uniformemente en la fase externa o aceitosa. Las gotas permanecen suspendidas en el aceite y agentes tensoactivos impiden que las haya coalescencia entre las gotas.

Para emulsificar correctamente el agua en aceite, debe haber suficiente agente químico que forme una película alrededor de cada gota de agua. La emulsión será inestable si no hay suficiente emulsificante ya que se tendrá mayor oportunidad para que las gotas de agua se fusionen. La concentración de emulsificante aumenta a medida que aumenta la concentración de agua.

La emulsion será más estable mientras más pequeñas sean las gotas, ya que las gotas grandes se fusionan con más facilidad. El menor tamaño en las gotas se puede conseguir con un adecuado esfuerzo de corte, este deberá ser suficiente para asegurar la estabilidad del lodo.

En los sistemas emulsionados al tener la tendencia de minimizar el contenido de agua, las funciones que se cumplían por esta ahora serán ser realizadas por aditivos suplementarios que son especialmente desarrollados para este propósito.

<sup>68</sup> RODRIGUEZ BERMUDEZ Eliserio, Reestructuración teórico-práctica del laboratorio de lodos y cementos (manual teórico). Tipos de lodos. Bucaramanga, 2007, 244 p. Requisito parcial para optar por el título de ingeniero de petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-químicas, escuela de ingeniería de petróleos.

Al agregar sólidos dentro de una emulsión agua aceite se puede tener un efecto positivo o negativo, esto depende de la humectabilidad que tengan los sólidos, si mantienen una condición humectada preferiblemente por aceite y no se fusionan ni agotan las concentraciones de agentes tensoactivos requeridos se formará una emulsión estable.

La estabilidad eléctrica constituye un indicio relativo de la estabilidad de la emulsión y se trata de una medida del voltaje requerido para romper la emulsión permitiendo que las gotas se conecten y exista transmisión de corriente eléctrica. Varios factores afectan la estabilidad eléctrica:

- Contenido de agua:  
A mayor contenido de agua menor distancia entre las gotas favoreciendo la coalescencia y así poder tener conexión entre las gotas y cerrar el circuito.
- Sólidos humectados por agua:  
La película de agua que en adsorción humecta estos sólidos produce el efecto de asemejarlos a gotas de agua con lo que se reduce la estabilidad eléctrica.
- Emulsificante:  
La cantidad de emulsificante afecta el tamaño de las gotas haciéndolas más pequeñas. Esto aumenta los valores de estabilidad eléctrica.
- Temperatura:  
La estabilidad eléctrica cambia según sea la temperatura a la cual se mida. Esta temperatura siempre debería ser registrada con el valor de estabilidad eléctrica. La misma temperatura debería ser usada para analizar las tendencias (120°F o 49°C).

**2.10.2 Aplicación de los lodos base aceite.** Los sistemas de lodo base aceite presentan las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Estabilidad e inhibición de las arcillas.
- Estabilidad térmica
- Lubricidad
- Resistencia a la contaminación química
- Tolerancia a los sólidos
- Menor daño a la producción
- Menor tendencia al atascamiento de tubería
- Perforación con menor densidad de fluido
- Reducción de la fatiga por esfuerzo
- Menor corrosión

Desventajas:

- Elevado costo inicial por barril
- Se requiere corte mecánico
- Menor detección de arremetidas
- Se requiere control de la contaminación
- Elevado costo relacionado con

- pérdida de circulación Los equipos de control de sólidos se limitan a las zarandas, los limpiadores de fluidos y las centrífugas
- Limpieza del hoyo y del taladro
- El personal puede requerir cuidado especial para la piel
- Vapores peligrosos y riesgo de incendio
- Se requieren herramientas de toma de registro especiales

**2.10.3 Preparar lodos de los sistemas de lodo base.** Un procedimiento general para preparar un lodo base aceite se puede definir por los siguientes pasos:

1. Agregar a la cantidad de aceite (según relación agua/aceite), el controlador de filtrado y agitar durante mínimo 15 minutos.
2. En un recipiente separado agregar al agua sal ( $\text{CaCl}_2$ ) y agitar durante mínimo 15 minutos.
3. Agregar el agente emulsificante principal al paso 1, agitar durante mínimo 15 minutos.
4. Agregar la salmuera a la mezcla. Agitar durante mínimo 15 minutos.
5. Agregar el emulsificante secundario; Agitar durante mínimo 15 minutos.
6. Agregar cal; Agitar durante mínimo 15 minutos.
7. Agregar material pesante; Agitar durante mínimo 15 minutos.

**2.10.3.1 100% aceite.** Estos sistemas no contienen agua en su formulación. En la práctica, durante la perforación, estos sistemas incorporan pequeñas cantidades de agua de la formación y los recortes. La mayoría tolerarán solamente muy pequeñas cantidades de agua y casi nunca contienen más de 5% de agua. Muchas veces, estos sistemas, son usados para extraer núcleos en intervalos productivos.

**2.10.3.2 Filtrado relajado.** Estos sistemas son fluidos emulsionados menos estables gracias a su mayor contenido de agua, resultado de esto tendrán un aumento en su filtrado y en la velocidad de penetración al perforar con estos.

Los sistemas de filtrado relajado usan un emulsificante primario, un agente humectante y una arcilla organofílica y un viscosificante de sistemas base aceite y agentes gelificantes. La salmuera de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) a 25% en peso constituye normalmente la fase interna, pero se puede cualquier porcentaje en peso deseado hasta 38%. En general no se usa ningún aditivo de filtrado en los sistemas relajados.

**2.10.3.3 Emulsión firme.** Estas son emulsiones fuertes o convencionales muy estables que tienen un filtrado API (100 psi) igual a cero. Generalmente tienen una alta estabilidad eléctrica y un filtrado a Altas Temperaturas-Altas Presiones ATAP controlado inferior a  $10 \text{ cm}^3$  ( $0.1024 \text{ in}^3$ ) a 500 psi y 300 °F. Tiene una aplicación general en áreas de alta temperatura de hasta 500 °F (260°C).

**2.10.3.4 Alto contenido de agua.** Su aplicación tiene mayor importancia cuando se quiere reducir la retención de aceite en los recortes por ejemplo en perforaciones costa afuera que son ambientalmente más sencibles.

Estos sistemas pueden tener una relación aceite agua típica de 50/50, pueden reducir hasta un 45% el aceite que queda en los recortes y no son recomendables a temperaturas superiores a los 250°F (121°C)

#### **2.10.3.5 Aditivos para los lodos base aceite<sup>69</sup>**

- **Emulsificantes:**

Los emulsificantes son agentes tensioactivos que reducen la tensión superficial entre las gotas de agua y el aceite (o sintético). Los emulsificantes estabilizan la mezcla al ser parcialmente solubles en agua y parcialmente solubles en aceite.

- **Jabones**

Algunos emulsificantes son jabones formados por la reacción de un éster de ácido graso con un álcali (como la cal), donde el hidrógeno del ácido graso es reemplazado por un metal, como el calcio de la cal. Los jabones hechos con sodio son solubles en agua y forman emulsiones de aceite en agua. El hidróxido de sodio es el álcali que se usa en muchos jabones domésticos.

- **Agentes humectantes**

Un agente humectante es un agente tensioactivo que reduce la tensión interfacial y el ángulo de contacto entre un líquido y un sólido. Esto hace que el líquido se extienda sobre la superficie del sólido. Los agentes humectantes tienen un extremo que es soluble en el líquido de fase continua y otro que tiene una fuerte afinidad con las superficies de los sólidos.

- **Viscosificadores**

Aunque el agua emulsionada aumente la viscosidad, los viscosificadores y agentes gelificantes también son necesarios. Las arcillas no tratadas no pueden ser usadas como viscosificadores porque no se hidratan ni aumentan la viscosidad en el aceite o el fluido sintético. Si son recubiertas previamente con una amina, de manera que sean organofílicas, entonces las arcillas aumentarán la viscosidad del aceite y los fluidos sintéticos.

- **Material densificante**

La barita es el material densificante más común que se usa en los lodos base aceite y sintético. También se usa carbonato de calcio, especialmente en los fluidos de empaque de densidad más baja, donde se puede suspender más fácilmente que en la barita o la hematita.

---

<sup>69</sup> Manual de fluidos de perforación Energy API. Emulsiones no acuosas: Aditivos. Cap. 11

- **Aditivos de control de filtración**

El control de filtración HPHT de los lodos de emulsión inversa es afectado por la viscosidad de la fase fluida continua, la relación de aceite o sintético a agua, la estabilidad de la emulsión, la humectación por agua de los sólidos, el contenido de sólidos y la cantidad de arcilla tratada con amina en el sistema.

## **2.11 CEMENTOS**

Al principio de las operaciones petroleras aparece un gran problema relacionado con las aguas intersticiales o de formación, este consistía en que algunas de las zonas atravesadas por la perforación producían agua en cantidades tales que inundaban el pozo. En ocasiones la presión hidrostática de esta columna de agua era tan grande que resultaba en la invasión de zonas productoras de petróleo y gas; esta producción de agua también ocasionaba corrosión a las tuberías que se insertan en el pozo para revestirlo.

Estos efectos fueron tratados de remediar con proyectos para la exclusión de aguas del tope de la formación que consistían en adición a la tubería de revestimiento unos sacos a manera de bolsas llenas de cereales, mica u otra sustancia de características similares. Estos se hacían bajar por la tubería y ascender por el espacio anular, proceso muy difícil de llevar a cabo. El fin perseguido era obtener una dilatación de las sustancias con el agua de formación para producir un sello. También se concibieron empaques de fibras o caucho que se expandían por compresión o rotación de la tubería dentro del pozo pero ambas ideas fracasaron por la falla de los empaques y los frecuentes derrumbes del pozo. Por el mal resultado del método de exclusión de las aguas intersticiales, por los sistemas de empaque y otros de menor importancia se continuó la investigación hasta llegara concebirse la idea de la cementación.

La cementación de un pozo petrolero consiste básicamente en la unión de la tubería de revestimiento interceptada en un pozo a las paredes del mismo, por medio del suministro de cemento por el espacio anular, desplazando el fluido de perforación que allí se encuentra. El proceso tiene otras múltiples aplicaciones, como en la reparación de pozos, por ejemplo taponamiento de grietas o capas muy permeables que provocan pérdidas de circulación de la inyección, tapones de fondo y abandono, anulación de capas acuíferas, etc.

La operación se clasifica de acuerdo a los objetivos que se desean cumplir, según esto tenemos:

- a. Cementación Primaria
- b. Cementación Forzada
- c. Tapones de Cemento

Para uso exclusivo de este curso nos enfocaremos en la cementación primaria que consiste en posicionar el cemento en el espacio anular, entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero, asegurando un sello completo.

**2.11.1 Cementación primaria.** Consiste en aislar entre sí las formaciones puestas en comunicación durante la perforación, de tal manera que al realizar la cementación exista la adherencia entre *casing*-cemento y cemento-formación perdiendo comunicación las zonas acuíferas, problemáticas, en especial las zonas productoras del resto del terreno. Esto se hace bombeando una lechada de cemento dentro del pozo perforado cubriendo una longitud parcial o total entre la sarta de fondo y el espacio anular.

El proceso al cementar los revestimientos del pozo (conductor, productor, *liners*) durante la perforación se hace a presiones suficientes y controladas para no afectar la estabilidad de la formación o fracturas naturales, de modo que la mezcla del cemento bombeada al interior de la sarta, sea desplazada a través del zapato que lleva al extremo inferior, la cual es realizada por la presión puesta en cabeza de cementación. La mezcla que se desplaza por el zapato y asciende por el espacio anular hasta cubrir la distancia que debe quedar completa de cemento. Es decir, se forma un anillo de cemento que debe cumplir ciertas características para considerar que fue una lechada exitosa:

- No debe ser quebradizo.
- Ser impermeable.
- Tener plasticidad.
- Resistencia mecánica a la compresión.
- Resistencia química.
- Bajo filtrado.

Cuando se trata de sartas muy largas, como pudiesen ser los casos de sartas intermedias o de fondo, la cementación primaria puede hacerse por etapas. Este método permite cubrir el tramo deseado y evitar inconvenientes debido a que mientras más tiempo se esté bombeando cemento la mezcla se torna más consistente y difícil de mover. El cemento y el agua empiezan a reaccionar en el mismo momento en que se mezclan, las características físicas y químicas

que adquiere la mezcla hacen que el tiempo sea en función de estas, por lo que la cementación debe hacerse dentro de ciertos límites de tiempo, antes de que el fraguado inicial empiece a manifestarse. Además, debe tenerse en cuenta la relación profundidad-temperatura, ya que la temperatura del pozo influye sobre el tiempo de fraguado de la mezcla. La fluidez, el peso y el fraguado inicial y final de la mezcla, dependen de la relación cemento-agua. Potenciar especial cuidado del cemento no certifica el éxito de la operación, ya que innumerables causas pueden afectar el rendimiento, entre estas tenemos:

- Tipo y calidad de la inyección utilizada.
- Aditivos agregados a la inyección.
- Espesor y consistencia de la retorta.
- Diámetro y longitud de las cavernas.
- Limpieza del pozo, profundidad y temperatura.
- Centrado del *casing* y limpieza del revestimiento.

**2.11.2 Objetivos de la cementación.** Cuando se perfora un pozo, una tubería de acero (*casing*) es colocada en el hueco para protegerlo y de esta forma evitar que las formaciones se derrumben generando un conducto para futuros trabajos en el pozo, esto se lleva a cabo por medio del diseño de la lechada que se bombea a través de las secciones perforadas, aislando adecuadamente el revestimiento y la formación, dando paso a procesos para la adecuación del pozo con el fin de una óptima producción.

Hoy la industria pasa por momentos plenos de desafíos frente al declive de los yacimientos convencionales y la explotación de los no convencionales que generan mayores dificultades en su explotación y producción se hace necesario que las operaciones de cementación sean planeadas con anticipación para usar favorablemente los aditivos del cemento de acuerdo a la exigencia del yacimiento. A continuación se describen los objetivos primordiales de la cementación:

- A. Dar adherencia y soporte al *casing*.
- B. Restringir el movimiento de fluidos a través de las formaciones para minimizar el proceso corrosivo del *casing*.
- C. Por medio de un fragüe rápido del cemento, prevenir los posibles reventones del pozo.
- D. Proteger el *casing* de los esfuerzos y choques cuando se perfora para profundizar.
- E. Aislar las zonas con pérdidas de circulación o zonas ladronas.
- F. Protege las zonas productivas

- G. Evitar derrumbes de la pared de formaciones no consolidadas.
- H. Evitar movimientos de fluidos entre formaciones; para esto se requiere un completo sello del cemento con el revestimiento y con la formación.
- I. Confinar la presión de inyección durante la acidificación o fracturamiento a la formación que se quiere tratar.
- J. Proteger la tubería de revestimiento de la acción corrosiva de las aguas intersticiales.
- K. Proteger el revestimiento al cañonearlo.
- L. Proporcionar aislamiento entre las zonas del pozo que contienen gas, aceite y agua.

**2.11.3 Generalidades del cemento.** Se denomina cemento a un conglomerado hidráulico que, mezclado con agregados (grava, arena y agua), crea una mezcla maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado concreto.<sup>70</sup>

#### **2.11.3.1 Características de las Formaciones.**

En una operación siempre se deben de tomar en cuenta las características de las formaciones que se encuentran expuestas, ya que en diferentes condiciones de operación pueden obligar a modificar ciertas características de la lechada de cemento. Por ejemplo en formaciones con alta permeabilidad, naturalmente fracturadas o de baja presión pueden provocar una deshidratación en la lechada de cemento que para ciertas condiciones críticas obliga a disminuir el gasto, reducir la densidad o reducir la presión hidrostática por pérdida de presión en la formación. Por otro lado durante una operación, la presión que se alcance deberá ser menor que la presión de fractura de la formación, ya que se podrían tener pérdidas de circulación del fluido. La presión de fractura depende de las propiedades de la formación y es la necesaria para propagar una fractura más allá del pozo y provocar una pérdida de circulación del fluido. Y por lo tanto la correcta predicción del gradiente de presión de fractura es esencial para optimizar el diseño del programa y mientras se realizan trabajos de perforación, así como para la integridad del pozo en una situación de control que dependerá de la resistencia mínima de la formación. En una etapa de planificación se puede estimar este gradiente por medio de datos de correlación de los pozos, teóricamente se puede estimar por medio analítico con los métodos de Mattews & Kelly, Eaton, etc. Además el gradiente de fractura de las formaciones en un campo puede estimarse a partir de:

---

<sup>70</sup> MONTOYA JIMÉNEZ Pedro, GARCÍA MESEGUER Álvaro, MORÁN CABRÉ Francisco. Hormigón Armado 14ª Edición basada en la E.H.E. ajustada al código modelo y al euro-código. Editorial Gustavo Gili, S.A.

El gradiente de lodo cuando se presentan pérdidas de circulación durante la perforación.

La presión de ruptura alcanzada en las cementaciones forzadas.

La presión de ruptura registrada en las estimulaciones.

Las pruebas de admisión (*Leak off*)

**2.11.3.2 Composición del Cemento.** El cemento es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que al entrar en contacto con el agua forman un cuerpo sólido. Esta mezcla de ingredientes se muele, se calcina en hornos horizontales con corriente de aire y se convierte en Clinker, el cual contiene todos los componentes del cemento, excepto el sulfato del calcio, que se le agrega como ingrediente final. Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al alcanzar un equilibrio térmico. De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, es el material idóneo para la cementación de pozos. Hay cuatro fases cristalinas en el Clinker del cemento Portland que se consideran son el material cementante principal, las cuales se hidratan para formar o ayudar a la formación de una estructura rígida.

**Tabla 41** Compuestos químicos de los Cementos Portland

NOMBRE DEL COMPUESTO	FORMULA QUIMICA
A. Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
B. Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
C. Aluminato De Tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
D. Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
E. Yeso Natural	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
F. Oxidos Menores De Ca, Mg, Na, K, Mn, P, Fe	

**Fuente:** Manual Cementación para Ingenieros.

**2.11.3.3 Características de los constituyentes del cemento.**<sup>71</sup> El Silicato Tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) es el mayor constituyente a la resistencia en todas las etapas y particularmente en el curado. (Hasta 28 días). El contenido promedio de Silicato Tricálcico es de 45 a 65% con un máximo de 67% para cementos de fraguado rápido. El Silicato Dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2=\text{C}_2\text{S}$ ) se hidrata muy lentamente y es el constituyente que produce resistencia a largo plazo. El contenido promedio de Silicato Dicálcico es de 25 a 35%. Debido a que es lento para hidratarse no tiene efecto sobre el tiempo de fraguado. Aluminio Tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3=\text{C}_3\text{A}$ ) se hidrata rápidamente y contribuye mucho al calor de hidratación; esta contribución es cercana a 2 cal/gramo de cemento durante 3 días por cada porcentaje del compuesto presente. En menor extensión también contribuye a endurecer y producir aquella porción del cemento que es más rápidamente atacada por aguas sulfatadas. Las especificaciones API permiten un máximo de 15% de C3A para cementos de fraguado rápido, tipo regular, y 3% para cementos de alta resistencia a los sulfatos. El fragüe rápido producido por este compuesto se controla con cantidades apropiadas de yesos que actúa como retardador. Aluminoferrato Tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{C}_4\text{AF}$ ) tiene ligero efecto en las propiedades físicas del cemento. Las especificaciones API exigen que la suma del contenido C4AF más dos veces C3A no pueden exceder de un máximo de 24% para los cementos de alta resistencia a los sulfatos.

El más bajo contenido de C3S del cemento retardado se refleja en una marcada reducción de la actividad química, dando como resultado un más bajo desarrollo de la resistencia hasta los 28 días. Se adquiere considerable resistencia después de 28 días para el cemento de más alto contenido de C2S un reducido contenido de C3A mejora marcadamente la resistencia del cemento al ataque corrosivo del agua sulfatada. Todos los cementos se manufacturan esencialmente de la misma manera a partir de los mismos ingredientes pero en diferentes proporciones. El agua que requiere cada tipo de cemento varía con la fineza de la molienda o con el área superficial. Los cementos de alta resistencia inicial tienen gran área superficial. Los cementos de fraguado lento tienen poca área superficial y los cementos Portland tienen un área superficial ligeramente mayor que la anterior.

---

<sup>71</sup> MARTINEZ S, Frank., VILLEGAS A, Gabriel. Estudio de la resistencia a la tensión y a la intrusión de fluidos de los cementos en pozos de petróleo: Composición de los cementos. Bucaramanga 1979. Pág. 10. Proyecto sometido como requerimiento parcial para optar por el título de ingeniero de petróleos. Universidad Industrial de Santander, facultad de ingeniería de petróleos.

**2.11.3.4 Cemento Portland.** El cemento Portland es una mezcla de materiales con alto contenido de carbonato de calcio, especialmente la caliza, sílice, hierro y arcilla. Que molidos y calcinados al entrar en contacto con agua fragua y se endurece.

De los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos de petróleo, es importante denotar que este cemento es el cemento ordinario que ha sido usado por muchos años para la industria de la construcción, sin embargo para su aplicación en las tuberías de revestimiento para los pozos de petróleo fue necesario variar las especificaciones y propiedades del mismo debido a la necesidad de bombeabilidad a más altas temperaturas y presiones. Existen varias agencias que estudian y hacen las especificaciones para la fabricación de los cementos Portland; las más conocidas en la industria son la ASTM (American Society for Testing Materials), que trata con cementos para uso en construcción y se refieren al TIPO de cementos y el API (American Petroleum Institute), que se ocupa de lo aplicado solo en pozos que se refiere a la CLASE del cemento. Para que un cemento, sea utilizado y desempeñe satisfactoriamente la tarea que se le asigna, debe llenar ciertos requisitos:

1. La lechada del cemento debe ser capaz de colocarse en la posición deseada por medio de equipo de bombeo desde la superficie.
2. Después de colocado, debe adquirir fuerza en un tiempo razonablemente corto, para que el tiempo de espera de fraguado pueda reducirse al mínimo.
3. El cemento debe ser un sello permanente entre la tubería de revestimiento y la formación.
4. Debe tener fuerza suficiente para evitar fallas mecánicas.
5. Debe ser químicamente inerte a cualquier formación al fluido con el que se pueda poner en contacto.
6. Debe ser suficientemente estable para no deteriorarse, descomponerse o de alguna otra forma perder sus cualidades.
7. Debe ser suficientemente impermeable para que los fluidos no se filtren a través de él cuando haya fraguado.<sup>72</sup>

---

<sup>72</sup> M.C, Armando. MERINO, Montiel & Gil Erwin. (2002). ABC de las Cementaciones.

**2.11.3.5 Cementos de fraguado lento.**<sup>73</sup>. Hasta los principios de 1900 los pozos eran poco profundos comparados con los de hoy en día y las temperaturas y presiones del subsuelo no eran un problema serio para afectar las propiedades de los cementos fluidos. Hoy sin embargo la búsqueda de nuevas reservas ha extendido la perforación a temperaturas superiores de 200 °F y presiones mayores de 5000 psi, a estas condiciones se ha determinado que las propiedades de los cementos fluidos son diferentes su espesamiento y fraguado es acelerado por la acción de presión y temperatura combinados. Para vencer estas acciones extrañas se definió la fabricación de cementos de fraguado lento que pudieran conservar las mismas propiedades en fondo de pozos profundos. Estos cementos pueden ser de dos clases:

- **Cementos de fraguado lento no retardados.** Al analizar el proceso de hidratación de un cemento Portland se puede establecer los tiempos de fraguado de cada uno de los componentes químicos según su facilidad de hidratación: así, al analizar diferentes cementos, a partir de su Clinker original se puede determinar por la proporción de cada uno de los componentes dichos, cual cemento podría fraguar a condiciones similares más lentamente o más rápido. En otras palabras las propiedades que hacen que un cemento fragüe más lentamente se obtienen limitando los componentes de hidratación rápida en la composición en un cemento Portland; así, la relación  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$  se mantiene de tal manera que el  $3CaO.Al_2O_3$  sea cero y el contenido de  $Fe_2O_3$  esté algo en exceso para convertir todo el  $Al_2O_3$  a  $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ .
- **Cementos de fraguado lento retardados.** Las propiedades de fraguado lento de estos cementos se controlan por el uso de aditivos. La adición del retardador se hace generalmente al Clinker del cemento siendo este de proporciones especiales de caliza y arcilla. Generalmente se escoge un Clinker de propiedades e buena resistencia a los sulfatos, ósea que la preparación del cemento retardado se hace a partir de un cemento más o menos de las mismas propiedades de un cemento ASTM tipo II

Los aditivos usados en la fabricación de cementos retardados con excepción de uno o dos compuestos inorgánicos son todos orgánicos.

---

<sup>73</sup> TELMO CAMACHO, Duran. Contribución al estudio de los cementos usados en pozos de petróleo en Colombia: Tipos de cemento usados en la industria del petróleo. Bucaramanga 1960. 353h. Trabajo de grado (ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. División de ciencias físico-químicas. Escuela de ingeniería de petróleos.

El fin de estos aditivos es disminuir la rata a la cual el cemento reacciona con el agua y al mismo tiempo mantener baja la viscosidad en u periodo de varias horas.

**2.11.3.6 Características del cemento.** La ASTM clasifica los cementos en cinco tipos: Tipo I, II, III, IV y V, los cuales son fabricados para uso a condiciones atmosféricas, sin estar sujetos a amplios rangos de presión y temperatura; mientras el API lo hace en ocho clases de cementos para uso en pozos, desde la clase A hasta la H. Los cementos tipo I, II y III corresponden a los cementos clase A, B y C del API; los cementos IV y V no tienen una correspondiente clase API.<sup>74</sup>

La clasificación se muestra en la siguiente tabla<sup>75</sup>:

**Tabla 42** Clasificación API de los Cementos

CLASE DEL CEMENTOS	PROFUNDIDAD MAXIMA	TEMPERATURA ESTATICA MAXIMA	PROPIEDADES ESPECIALES
A o Tipo I	6000 ft	80-170 °F	No se requieren propiedades especiales.
B o Tipo II	6000 ft	80-170 °F	Moderada resistencia a los sulfatos.
C o Tipo III	6000 ft	80-170 °F	Alta resistencia a la compresión temprana, moderada-alta resistencia a los sulfatos.
D	6000 – 12000 ft	170-260 °F	Presión moderada, moderada-alta resistencia a los sulfatos.
E	10000 – 12000 ft	170-290 °F	Alta presión, moderada-alta resistencia a los sulfatos.
F	10000 – 16000 ft	230-320 °F	Alta presión, moderada-alta resistencia a los sulfatos.
G y H	8000 ft	80-200 °F	Disponibles en moderada-alta resistencia a los sulfatos.

**Fuente:** Desarrollo de una herramienta software para el análisis reológico e hidráulico de lechadas de cementación primaria en pozos verticales.

<sup>74</sup> SMITH, Dwight. Cementing. Ed. 2. New York City: Society of Petroleum Engineers Inc. 1990. P 8-9

<sup>75</sup> Ortiz M. Andrés Felipe, Meza R. Mario Fernando. (2013). Desarrollo de una herramienta software para el análisis reológico e hidráulico de lechadas de cementación primaria en pozos verticales. Tesis de Grado, UIS, Bucaramanga. P. 24

**2.11.3.7 Hidratación del cemento.** El agua en el cemento hidratado se encuentra en tres formas. Una que está químicamente combinada, es el agua de hidratación de los compuestos y forma parte de la composición molecular de ellos; otra es el agua que se encuentra en los capilares o poros y la otra es el agua de gel o agua absorbida. En los cementos Pórtland el agua químicamente combinada después de la hidratación completa es aproximadamente un 25% y la superficie específica pasa de 3000 a 2000000 cm<sup>2</sup>/g. el incremento del área superficial por agua combinada es el gel, es una de las razones que permite explicar el incremento de resistencia. El valor máximo para el agua combinada teóricamente es del orden de 28 + 1% del peso del cemento. Este valor se reduce a un 25% al combinarse y el agua del gel representa un 15%. El agua capilar depende de la solución agua-cemento empleada.

La velocidad de hidratación de los constituyentes del cemento aumenta con la temperatura; sin embargo, un tratamiento prolongado o excesivo de temperatura es perjudicial; no conviene pasar de 80°C. Por el contrario la hidratación se retarda con la disminución de la temperatura. La hidratación de los cementos siderúrgicos y de los puzolánicos produce los mismos compuestos que se forman en los cementos Pórtland. La sílice de los puzolanes y las escorias reaccionan con la cal libre y forman silicatos. Las resistencias se alcanzan a edades tardías y a veces superiores a la de los cementos Pórtland para las mismas edades. El proceso de hidratación es un proceso exotérmico, que hace que los cementos al fraguar y endurecer aumenten la temperatura; cada compuesto del cemento al hidratarse libera una determinada cantidad de calor en determinado tiempo (tabla 3). La siguiente tabla nos indica los principales compuestos del cemento y el calor liberado en determinado tiempo.

**Tabla 39.** Calor liberado con el tiempo por los componentes de los cementos

COMPUESTO	CALOR LIBERADO EN CAL/G			
	7 DIAS	28 DIAS	5 MESES	HIDRATADO TOTALMENTO
<b>C<sub>3</sub>S</b>	110	120	120	120
<b>C<sub>2</sub>S</b>	20	45	60	62
<b>C<sub>3</sub>A</b>	185	205	207	207
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	40	50	70	100

**Fuente:** Manual cementación para ingenieros

El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, generado después de una hidratación completa a una temperatura dada. De la

tabla anterior se puede concluir que el C3A es el que más alto calor de hidratación desarrolla por lo cual su contenido se debe controlar en el cemento.

**2.11.3.8 Propiedades Físicas de los Cementos.** Los cementos de clasificación API definen las principales propiedades físicas de los cementos que son:

**Ge:** Gravedad específica: es el peso por unidad de volumen, sin tomar en consideración otros materiales, tales como el aire o el agua; es decir el peso de los granos de cemento específicamente; sus unidades son  $\text{gr/cm}^3$ .

**PV:** Peso volumétrico: es el volumen por unidad de masa. Se toma en consideración el aire contenido entre los granos de cemento; sus unidades son  $\text{gr/cm}^3$ .

**Blaine:** es la fineza de los granos de cemento, e indica el tamaño de los granos del cemento. Su mayor influencia se da sobre el requerimiento de agua para la preparación de la lechada. Sus unidades son  $\text{cm}^2/\text{gr}$ ,  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Representa el área expuesta al contacto con el agua y se determina como una función de permeabilidad al aire.

**Distribución del tamaño de partícula:** indica la eficiencia con la que se llevó a cabo la selección, la molienda y el resto del proceso de fabricación sobre la homogeneización de los materiales crudos molidos.

**Tamaño promedio de partículas:** es el tamaño de grano que ocupa el 50% de un peso determinado de cemento, dentro de la gama de tamaños de grano que integran el cemento.

**Requerimiento de agua normal:** es el agua necesaria para la lechada con cemento solo. Debe dar 11 UB (unidades Bearden) a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

**Requerimiento de agua mínima:** es el agua necesaria para la lechada de cemento. Debe dar 30 UB (unidades Bearden) a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

**Densidad de la lechada:** Es el peso de la mezcla del cemento con agua y está en función de la relación de agua por emplear. Sus unidades son  $\text{gr/cm}^3$

#### **2.11.4 Condiciones en el diseño de una lechada.**

**2.11.4.1 Diseño de la Lechada.** La lechada de cemento es un producto químico de composición compleja. Con los actuales productos químicos que existen en el mercado se puede alterar su comportamiento, ya sea para acelerar o retardar el fraguado, para aumentar o reducir la viscosidad, densidad, etc., todo para un óptimo diseño de la lechada de cemento.

En el diseño de la lechada se debe considerar una planeación previa para poder realizarla y esta contiene los siguientes aspectos:

1. Diámetro del agujero.
2. Diámetro de la tubería de revestimiento.
3. Profundidad total.
4. Cima del cemento.
5. Profundidad de la última tubería de revestimiento cementada.
6. Densidad de la lechada de cemento.
7. Temperatura de fondo.
8. Densidad actual del fluido de perforación.
9. Densidad mínima de lodo permisible o presión de formación.
10. Presión de fractura.
11. Rendimiento de la lechada.
12. Clase de cemento a utilizar.
13. Requerimiento y calidad en el sitio de agua para el mezclado.
14. Aditivos.

**2.11.4.2 Factores que Afectan la Lechada de Cemento.** Las condiciones del pozo, los posibles problemas durante la perforación (pérdida, flujos, etc.) y la temperatura del fondo deben ser considerados en el diseño de una cementación para un pozo petrolero. Los siguientes factores afectan el diseño de la lechada de cemento:

##### **1. Condiciones de presión, temperatura y tiempo de bombeo.**

La presión y la temperatura son dos factores que influyen en el diseño de lechadas. La temperatura influye con mayor proporción, ésta aumenta conforme se incrementa con rapidez la resistencia y la lechada de cemento se deshidrata con mayor velocidad.

Mencionando a los dos factores principales (presión y temperatura), estos afectan el tiempo de bombeo de la lechada de cemento y la compresión que se desarrolla después de fraguar. Considerando las temperaturas circulantes y estáticas de fondo, podemos prevenir el retardo de la lechada de cemento.

La temperatura circulante de fondo es la temperatura a la cual el cemento se encuentra expuesto durante una operación y por consiguiente se debe de considerar cuando realicemos pruebas de espesamiento a alta presión y la alta temperatura de las lechadas de cemento para la correcta selección de aditivos.

Por otra parte la temperatura estática de fondo es importante para el desarrollo de la resistencia compresiva de un sistema de cemento dado. Durante la cementación forzada, el efecto de enfriamiento es menor; por ser menor el fluido del pozo que precede a la lechada. Así una composición para cementación es más bombeable durante una cementación primaria que durante una cementación forzada a la misma profundidad.

El tiempo que toma una lechada de cemento para alcanzar el fondo depende del tamaño de la tubería como del gasto de desplazamiento. Para determinar el tiempo de bombeo de una lechada, se toman como bases las gráficas de gastos de desplazamientos, potencia requerida, volumen de lechada, tamaño del pozo y de la tubería de revestimiento. Los datos de fuerza compresiva están basados en las presiones y temperaturas del pozo e indican el tiempo requerido para que el cemento desarrolle dicha fuerza que debe ser suficiente para soportar la tubería.

Dos horas y media o tres son suficientes para instalar o bombear el cemento con un margen de seguridad. Se debe usar el probador de tiempo de espesamiento, de presión y temperatura con una muestra de cemento donde las condiciones son críticas.<sup>76</sup>

## **2. Viscosidad y contenido de agua en la lechada de cemento**

Las lechadas de cemento con excesiva relación de agua, resultan en fraguados de cementos débiles. Para lograr una mayor eficiencia de desplazamiento del lodo y permitir

---

<sup>76</sup> MARTINEZ S, Frank., VILLEGAS A, Gabriel. Estudio de la resistencia a la tensión y la intrusión de los fluidos de los cementos en pozos perforados con lodos base aceite: Propiedades y características de los cementos en pozos de petróleo. Bucaramanga, 1979.p 13. Proyecto sometido como requisito parcial para optar por el título de ingeniero de petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería de petróleos.

tener una mayor adherencia entre la formación y la tubería, se requiere considerar una viscosidad o consistencia adecuadas.

Esto se hace mezclando la lechada de cemento con una cantidad de agua, para obtener un volumen determinado de lechada a fraguar igual al volumen de lechada sin separación de agua libre. Para lograr una determinada viscosidad de lechada se requiere considerar el tamaño de partículas en la cantidad de agua de mezclado, el área de la superficie y el tipo de aditivos. A esas cantidades de agua se les han dado términos específicos y se definen a continuación:

**Agua Libre:** es la cantidad de agua separada de la lechada, el contenido de agua libre en una muestra de lechada en el campo puede indicar que la lechada no se agitó lo suficiente como para obtener un buen mezclado, o no se usó agua en exceso. Si la lechada se mueve hasta terminar su tiempo bombeable, el exceso de agua dará un producto fraguado permeable, este cemento fraguado será susceptible a la invasión de fluidos; si la lechada se mueve solamente un tiempo corto después de ser mezclada y posteriormente se mantiene estática, formará bolsas de agua libre (puentes de agua) y canalización. Por ello, es de suma importancia usar la cantidad de agua especificada por el API.

**Agua Mínima:** los valores de agua de mezclas máximas y mínimas representan un rango y no son fijos, por ello no se consideran para las pruebas de laboratorio. El agua especificada de acuerdo a los procedimientos de pruebas según el SPEC 10 del API se refiere al agua óptima y es la cantidad usada para todas las pruebas estándar API.

**Agua Óptima:** es la cantidad de agua que da a la lechada las mejores propiedades para su aplicación particular. El SPEC 10 establece que el agua normal, nombre con el que también se le conoce al agua óptima de una lechada de cemento.

### 3. Tiempo de contacto

El tiempo de contacto específico depende principalmente del tiempo de trabajo, de las condiciones del pozo y del volumen de cemento que va a ser bombeado. Cuando las condiciones de colocación de la lechada son críticas, deben hacerse pruebas en el laboratorio con el probador de tiempo de contacto a presión y temperatura, este aparato aplica presión y temperatura a la lechada, una medición continua de la consistencia es reportada en una gráfica y el límite de bombeabilidad es alcanzado cuando la torsión en el batidor de la tasa de lechada alcanza 100 UB.

#### **4. Fuerza compresiva del cemento**

La resistencia a la compresión se incrementa con la densidad de la lechada. La fuerza compresiva es la base para las esperas del fraguado del cemento, en la decisión del tiempo de espera de fraguado es importante considerar lo siguiente:

- Conocer que tan fuerte debe estar el cemento antes de que la perforación pueda continuar.
- Entender las características del desarrollo de la fuerza compresiva de los cementos en uso común.

Para soportar la tubería de revestimiento no son siempre requeridas grandes fuerzas del cemento, durante la perforación, el incrementar la densidad de la lechada disminuye el tiempo requerido para desarrollar una adecuada fuerza compresiva. Con la densificación se incrementa la fuerza y el calor de hidratación del cemento. Seleccionando el cemento apropiado y aplicando buenas prácticas de cementación, los tiempos de espera de fraguado del cemento pueden ser reducidos considerablemente.

#### **5. Composición del agua requerida**

Los requerimientos del agua de mezclado pueden variar, dependiendo principalmente de la clase de cemento y densidad de la lechada. Muchos trabajos de cementación utilizan agua de la misma localización. Si el agua necesita ser transportada a la localización donde hay escasez o mal suministro, se debe calcular el volumen exacto, ya que esto es importante para asegurar el adecuado suministro de agua. Los requerimientos de volumen pueden ser considerables si la densidad es baja. El agua dulce (contenido de sólidos menor a las 500 ppm) de preferencia, pero cualquier agua potable es buena para el cemento.

Los componentes orgánicos tales como inhibidores de corrosión, bactericidas, agentes contra pérdida de fluido retardan el fraguado del mismo. Muy pocas aguas causan un fraguado instantáneo; el agua de mar (30,000 a 43,000 ppm de contenido de sólidos) es una de ellas pero el tiempo de fraguado debe ser verificado. Los carbonatos y los bicarbonatos tienen un efecto impredecible sobre el tiempo de fraguado; así, debe ser evitada el agua con alto contenido de los componentes mencionados (mayor de 2,000 ppm).

La calidad del agua de mezclado es un importante parámetro para la planeación de la cementación. La hidratación y el curado de la lechada de cemento pueden reaccionar diferente con la variación de la cantidad de sales, calcio, o magnesio en el agua de mezclado.

Es recomendable que el laboratorio piloto desarrolle pruebas con una muestra actual de agua y de cemento para obtener una buena estimación del tiempo de bombeo y resistencia a la compresión. El laboratorio realizará más pruebas cuando haya condiciones de alta temperatura en pozos profundos que requieran una cantidad considerable de tiempo para el mezclado del cemento y su desplazamiento.

#### **6. Comportamiento del Fluido de Perforación.**

La eliminación efectiva de los fluidos de perforación durante el desplazamiento de la lechada es un problema, ya que la contaminación y dilución por lodo puede dañar los sistemas de cementación, así como también ciertos productos químicos en el lodo y enjarre.

Cuando en una operación se requiere colocar un tapón de cemento, es necesario considerar una posible contaminación de este, ya que existe una debilidad del cemento cuando es perforado debido al bajo volumen de cemento utilizado durante la operación.

#### **7. Densidad de la lechada**

La densidad es generalmente considerada como la propiedad más importante y comúnmente medida. Ésta se relaciona directamente sólo con la presión hidrostática de la lechada de cemento. Ésta deberá ser tal que impida problemas de pérdidas de circulación y fracturamiento de las formaciones. La densidad del cemento es un importante criterio de diseño. La densidad de la lechada siempre deberá ser suficiente para mantener el control del pozo (excepto para cementaciones forzadas), existen varias maneras para controlar la densidad.

En operaciones de campo, la densidad de la lechada de cemento es determinada por una balanza de lodos, pero en la actualidad hay dispositivos integrados a las mezcladoras o al sistema de mezclado que esté en uso, para ir observando la densidad de la mezcla electrónicamente y siendo registrada en una terminal de computadora para su control.

#### **8. Pérdida de circulación**

La pérdida de circulación se puede identificar en la superficie cuando se obtiene gasto menor en el flujo que sale del espacio anular con respecto al gasto que se tiene en el bombeo dentro del pozo, ésta se define como la pérdida del fluido de perforación o de cemento desde el pozo hacia las formaciones superficiales.

La pérdida de circulación se puede obtener cuando existen formaciones muy permeables como estratos de grava, ostreros, calizas cavernosas, o cuando hay una formación fracturada o formada por un rebase del límite de la presión de fractura.

En la selección de materiales y equipo para controlar la pérdida de circulación se deben tomar en cuenta dos consideraciones importantes; una, el tamaño de las partículas a manejar deben ser de tamaño adecuado para que el equipo de bombeo pueda manejar y dos, el espacio poroso ser menor que el de estas partículas, ya que de lo contrario no sellaría ni obturaría las aberturas de la formación, y la efectividad de estos materiales debe de ser no solamente para laboratorios sino que también de resultados de campo.

#### **9. Calor de reacción**

El calor de reacción o calor de hidratación, está influenciado por la composición química del cemento, aditivos y por las condiciones del pozo, en el cual se tiene cierta temperatura de formación, cuando es muy alta, la reacción del calor es muy rápida, es decir se genera una reacción exotérmica que libera una cantidad considerable de calor, y todo estará en función de la cantidad de materia que se contenga en el medio.

La reducción de la presión hidrostática en el espacio anular durante un proceso de hidratación del cemento resulta una canalización en el pozo, con lo cual es necesario rotar la tubería para reducir la probabilidad de generar una canalización.

Un fluido tixotrópico (lechada) al quedar en reposo, tienden a formar geles y adherirse a las paredes del pozo, además la presión que se ejerce en la columna de lechada, durante el proceso de hidratación, tiende a reducir hasta alcanzar la presión equivalente al de una columna de agua equivalente de longitud similar.

#### **10. Comportamiento de la permeabilidad de la lechada**

La mayoría de las lechadas tienen una permeabilidad mucho menor que la de las formaciones a las que se encuentra sometida. Con base en esto el API ha especificado un sistema de medición de esta propiedad de las lechadas de cemento, mediante un permeámetro. A pesar de que al diseñar una lechada de cemento se le da muy poca importancia a la permeabilidad que tenga el cemento al fraguar, los disturbios del cemento en el proceso de fraguado por infiltración de gas pueden ocasionar comunicación para los fluidos de baja viscosidad

#### **11. Control de filtrado**

Mediante un buen control de filtrado se puede prevenir la restricción del flujo, ya que la pérdida de filtrado en una formación permeable causará un aumento en la viscosidad de la

lechada y una rápida depositación del enjarre del filtrado, la pérdida de filtrado estará sin control, y las lechadas de cemento quizás fallen para transmitir una alta presión hidrostática uniforme antes del fraguado inicial.

Por consiguiente debemos considerar los factores que intervienen en las causas de pérdida de filtrado de las lechadas de cemento, las cuales son el tiempo, presión, permeabilidad y temperatura. El filtrado es forzado a salir del cemento, aumentando la densidad y la viscosidad de la lechada y por lo tanto reduce el tiempo de bombeo e incrementa la fricción. Sin embargo la pérdida de filtrado se puede controlar con aditivos.

**2.11.4.3 Adherencia del cemento a la tubería.<sup>77</sup>** La resistencia de la adherencia mecánica, hidráulica y de gas está directamente afectada por el acabado de la tubería en la superficie donde se adhiere el cemento. En la parte donde sea crítica la adherencia tubería/cemento se aplica a la parte exterior de la tubería una capa de arena resinosa para mejorar la pega como también la migración del gas. En acabados de tuberías equivalentes, las superficies mojadas con aceite dan la peor adherencia. En conjunto mientras más rugosa y seca sea la superficie mejor será la pega.

Otros factores que influyen en la adherencia en la interface revestimiento/cemento son la dirección en la cual se aplican la presión y el tiempo que la presión es soportada en la interface de pega.

Durante el fraguado del cemento, el calor de hidratación puede producir un efecto similar al de una sobre presión interna en el revestimiento y causar expansión de la tubería.

Normalmente el calor empieza a aumentar dentro del revestimiento cuando el cemento se hidrata y toma su fragüe inicial.

Después del fragüe del cemento su temperatura disminuye haciendo que la tubería se contraiga. Esta contracción y expansión da un esfuerzo adicional en el revestimiento y en la capa de cemento que puede disminuir la resistencia de la adherencia mecánica e hidráulica.

El daño más grande a la adherencia puede ocurrir si se cierra el revestimiento mientras la temperatura crece en el revestimiento.

---

<sup>77</sup> MARTINEZ S, Frank., VILLEGAS A, Gabriel. Estudio de la resistencia a la tensión y a la intrusión de fluidos de los cementos en pozos de petróleo: Adherencia y registros. Bucaramanga 1979. Pág. 26-29. Proyecto sometido como requerimiento parcial para optar por el título de ingeniero de petróleos. Universidad Industrial de Santander, facultad de ingeniería de petróleos.

La falla de la adherencia hidráulica es función del tiempo, propiedades del cemento, presión aplicada y viscosidad del medio que hace presión.

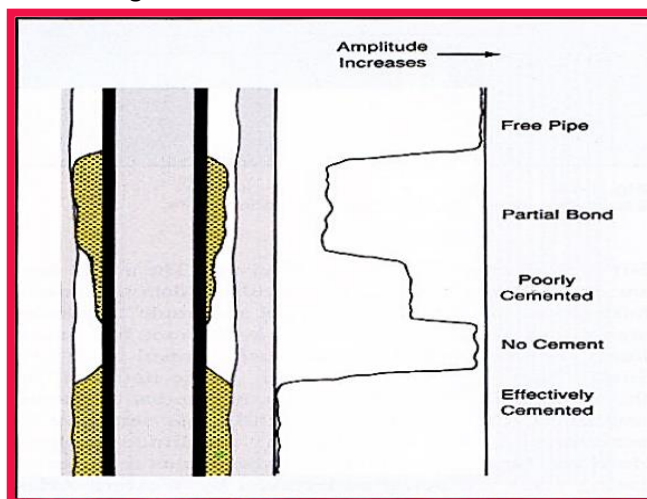
**2.11.4.4 Adherencia del cemento a la formación.**<sup>78</sup> La pega entre el cemento y la formación es lo que normalmente determina si habrá comunicación de gas o fluido en el anular o no. El cemento se pega mejor contra la formación limpia que contra una que contenga una capa de torta o lodo. Una buena adherencia hidráulica a la formación depende del contacto íntimo entre el cemento y la formación.

Una capa lodo gruesa en la interface cemento/formación reduce grandemente la adherencia hidráulica. La mayor resistencia a la adherencia puede esperarse en las formaciones más permeables si la torta de lodo tiene un espesor uniforme. La resistencia a la adherencia que se tiene en una formación seca, o en una formación sin torta de lodo puede aproximarse o exceder la resistencia de la formación.

**2.11.4.5 Registro CBL como método para localizar el cemento detrás de la tubería.**<sup>79</sup> El registro acústico o CBL (registro de adherencia al cemento) es el más ampliamente usado para ayudar a localizar el cemento detrás de la tubería.

Funciona con un principio acústico: se trasmite una señal o vibración, se recibe esa señal y se registra su tiempo de llegada como también su amplitud para determinar las condiciones de adherencia puesto que el revestimiento y la formación, cuando están acústicamente acoplados tienen tiempos de llegada y amplitudes característicos.

**Figura 86** Esquema del Registro de Adherencia

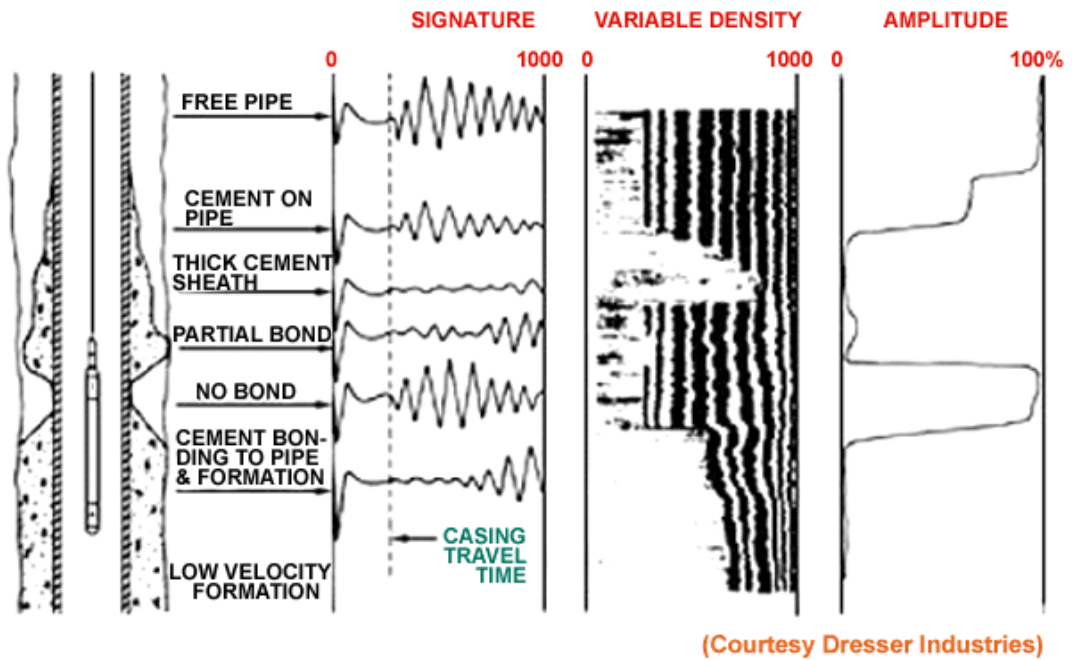


**Fuente:** Tomado de<sup>80</sup> Universidad Nacional de Colombia

<sup>78</sup> Ibit., p. 29-30

<sup>79</sup> Ibit., p. 31-34

### Cement Bond Log-Signature & Variable Density Comparison



Fuente: Lizneg<sup>81</sup>

Si la tubería está libre y no está sostenida firmemente con el cemento, vibrará creando una señal fuerte. Si el cemento está firmemente pegado a la pared del hueco y la tubería, la señal muestra que no hay vibración en la tubería y esta señal será entonces una característica a la formación detrás de la tubería. Si existe torta de lodo entre el cemento y la formación se recibe una señal muy pequeña de la formación. Si el revestimiento está apoyado contra la pared del hueco de tal forma que el cemento no rodee completamente la tubería y hay además una canalización del cemento, están presentes ambas señales, de la tubería y de la formación, puesto que la tubería está parcialmente libre de un lado y la formación está parcialmente acoplada en el otro.

<sup>80</sup> Universidad nacional de ingeniería facultad de ingeniería de petróleo, gas natural y petroquímica. Técnicas y mejoras en las mediciones de los registros de sectorización de adherencia de cemento. [En línea].

<[http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/405/1/espinoza\\_oj.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/405/1/espinoza_oj.pdf)> [citado 28 de febrero de 2014]

<sup>81</sup> Lizneg [en línea] <<http://www.lizneg.net/2012/01/registro-cbl.html>> [citado 28 de febrero de 2014]

Si se quiere que el registro acústico sea un éxito, se debe dar un tiempo suficiente para que el cemento desarrolle su resistencia antes de tomar un registro. El tiempo recomendado es de 24 a 36 horas.

**2.11.4.6 Aditivos para la lechada.** En la cementación de pozos, los severos gradientes geotérmicos y las altas presiones afectan a menudo la cementación que es realizada con una baja presión de poro, fluidos corrosivos y una baja presión de la formación. Por consiguiente, este alto rango de condiciones solo ha sido posible a través de desarrollar aditivos para cementos.

Los aditivos modifican el comportamiento de la lechada de cemento que permite bombearla desde la superficie hasta llegar al espacio anular, desarrollando una fuerza compresiva rápida, que mantendrá la vida útil del pozo. Hoy en día existen disponibles cerca de 100 aditivos para la cementación de pozos, los cuales pueden ser líquidos o sólidos. Los aditivos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

**Aceleradores:**

Reducen el tiempo de fraguado e incrementa la fuerza compresiva particularmente a temperaturas de formación debajo de 37°C para profundidades someras donde las formaciones tienen un gradiente geotérmico bajo y requieren de un aceleramiento para reducir el tiempo de fraguado. Los aceleradores usados en la industria son:

**Cloruro de Calcio (CaCl<sub>2</sub>):** acelera el fraguado e incrementa la fuerza compresiva, y es referido como "acelerador total". Al mezclarse el agua con el cloruro de calcio se incrementa la temperatura.

**Cloruro de Sodio (NaCl):** El cloruro de sodio (sal común), puede ser usado en las lechadas de cemento como un acelerador o un retardador, dependiendo si:

Concentración < 10% actúa como acelerador, 15% < concentración < 20% el efecto es neutro, y si la concentración > 20% y a bajas temperaturas retardador.

El agua de mar presenta una concentración entre el 2% y 3% (20,000 ppm y 30,000 ppm), al utilizarse como agua de mezcla podría causar una ligera aceleración en el tiempo de fraguado. La concentración óptima para máxima aceleración es de 3-5% por peso de agua de mezcla. En cementos que contienen bentonita, la sal actuaría como un acelerador de la fuerza, sin afectar las propiedades del tiempo de fraguado del sistema.

Silicato de Sodio: es utilizado para acelerar el tiempo de fraguado de lechadas de cemento que contienen retardador Carboximetil-hidroxietil celulosa (CMHEC).

Cementos con dispersantes y agua reducida: Las lechadas de cemento pueden ser aceleradas por densificación, esto se hace por adición de reductores de fricción y disminuyendo la cantidad de agua en la mezcla.

**Extendedores:** Se utilizan para reducir el peso de lechadas cuando se incrementa con la columna hidrostática en el pozo, ya que muchas formaciones no soportarían columnas grandes de cemento de alta densidad. Por lo tanto los materiales de mayor uso son:

♠ **Bentonita:**

Es uno de los primeros aditivos usados en cementos para disminuir el peso de la lechada o incrementar el volumen de la misma. Puede ser utilizada en cualquier cemento API. En altos porcentajes de bentonita en el cemento, reduce la fuerza compresiva y tiempo de fraguado, la bentonita y el agua también disminuyen la resistencia al ataque químico de las aguas de formación.

♠ **Tierra Diatomácea:**

Es utilizada en la fabricación de cementos de peso ligero. Esta tierra trabaja igual que la bentonita, pero es mucho más costosa, cuando es usada en altos porcentajes, no incrementa la viscosidad de la lechada como lo hace la bentonita.

♠ **Gilsonita:**

Es inerte en las lechadas de cemento, actúa como reductor de peso y como agente de control de pérdida de circulación, es especialmente útil para reducir la densidad. No absorbe agua bajo presión, por lo tanto tiene un avance de fuerza mucho mayor que cualquier otro fraguado del mismo peso de lechada conteniendo otro aditivo para disminuir el peso o para controlar la pérdida de circulación, no cambia significativamente el tiempo de bombeo en la mayoría de las clases de cemento API.

♠ **Perlita Dilatada:** Es un material de bajo peso por volumen, las partículas de perlita dilatada contienen poros abiertos, cerrados y matriz, la densidad final del cemento dependerá de cuantos poros permanecen cerrados y de cuanta cantidad de agua es inmovilizada en los poros abiertos.

♠ **Nitrógeno:** es utilizado para ayudar a reducir la presión hidrostática del fondo del pozo durante las operaciones de cementación, introduciéndolo en el flujo del lodo de perforación delante de la lechada de cemento, o con el pozo lleno con lodo y

circulando, e interrumpido al introducir un bache de nitrógeno antes de la cementación.

**Densificantes:** Cuando se requiere de lechadas de alta densidad en presiones altas frecuentemente en pozos profundos, el aditivo debe de tener las siguientes características:

1. Una gravedad específica en el rango de 4.5 – 5.0
2. Un requerimiento de agua
3. No reducir la Fuerza del cemento (significativamente)
4. Tener muy poco efecto sobre el tiempo de bombeo del cemento.
5. Exhibir un rango uniforme de tamaño de partículas de bache a bache.
6. Ser químicamente compatible con otros aditivos.
7. No interferir en la toma de registros geofísicos del pozo.

**Retardantes:** Buscan alargar el tiempo de espesamiento y retardar la fijación. El factor que gobierna el uso de retardantes es la temperatura del pozo, pues esta incrementa la velocidad de la reacción química entre el cemento y el agua, reduciendo el tiempo de espesamiento. El retardante probablemente altera la velocidad de reacción a causa de algún tipo de proceso de adsorción sensible a la concentración del absorbente, la temperatura y en menor magnitud la presión. En general un incremento de temperatura da como resultado una menor adsorción, mientras que a temperatura constante un incremento en concentración favorece la adsorción. Los retardantes más usados son lignosulfonato de calcio, mezclas orgánicas, carboxi metil hidroxietil celulosa (CMHEX), borax, cloruro de sodio (altas concentraciones) y la mayoría de agentes para controlar pérdidas de filtrado.

**Control de pérdida de circulación:** Una pérdida de circulación se define como la pérdida de fluido a través de fracturas inducidas por el fluido de perforación o de la lechada de cemento usada en la perforación o terminación de un pozo. Lo anterior no debe confundirse con la disminución del volumen debido al filtrado o con el volumen requerido para llenar de nuevo el pozo de fluido. Por lo general existen dos pasos para combatir la pérdida de circulación, mediante la reducción de la densidad de la lechada, o añadiendo un material obturante, y otra técnica es añadir nitrógeno al sistema de lodo. Los aditivos para el control de filtrado se usan para:

- Prevenir la deshidratación prematura o pérdida de agua enfrente de zonas porosas, particularmente en la cementación de tuberías de revestimiento.

- Proteger zonas sensibles
- Mejorar cementaciones forzadas

Los dos materiales más utilizados en el control de pérdida de filtrado son los polímeros orgánicos (celulosa) y los reductores de fricción. Para controlar la pérdida de filtrado se utilizan dispersantes o reductores de fricción por dispersión y encajonamiento de las partículas de cemento densificando así la lechada, esto es especialmente efectivo cuando la relación agua-cemento es reducida.

**Antiespumantes:** Ayudan a reducir el entrapamiento de aire durante la preparación de la lechada, ya que el cemento tiende a entrapar una gran cantidad de aire, propiciando un erróneo control de la densidad; asimismo, algunos productos químicos ayudan a mantener el aire dentro de la mezcla y dificulta el trabajo de las bombas de alta presión con que se maneja esta para ser bombeada al pozo. Los más usados son: éteres de poliglicoles y siliconas.

**Reductores de fricción o dispersantes de cemento:** Se agregan al cemento para mejorar las propiedades de flujo y reducen la fricción entre granos, y entre estos con las paredes, es decir reducen la viscosidad de la lechada de cemento, son de baja viscosidad y pueden ser bombeadas en flujo turbulento a presiones bajas, minimizando la potencia requerida de las bombas y disminuyendo la oportunidad de pérdida de circulación y deshidratación prematura. Los dispersantes comúnmente son polímeros, agentes de pérdida de fluido en cemento gel, y sal (cloruro de sodio). Estos son usados a temperaturas bajas, debido a que retardan ligeramente el cemento.

**Polímeros (dispersantes):** Se fabrican en forma de polvo, producen una inusual utilidad en las propiedades de los sistemas en el cemento. Lo que hacen es reducir la viscosidad aparente, no causan una separación de agua libre excesiva o asentamientos de partículas de cemento, son compatibles con todos los tipos de sistemas de cemento excepto con aquellas que contienen concentraciones altas de sal; son incompatibles con la sal.

**Cloruro de sodio:** Actúa como un agente pesante, puede también actuar como un adelgazador (dispersante) en muchas composiciones para cementación, es especialmente efectivo para reducir la viscosidad aparente de las lechadas que contienen bentonita, tierra diatomacea o pozzolan.

## **Aditivos especiales para cemento.**

**Descontaminante de lodo:** Son utilizados para minimizar los efectos de retardamiento del cemento de varios lodos de perforación, cuando una lechada de cemento venga a ser contaminada por el fluido de perforación, estos neutralizan ciertos tratamientos químicos de lodo, se utilizan en trabajos de retaponamientos de pozos abiertos y en tuberías de revestimiento, para cementaciones forzadas.

**Fluoruro de Sílice:** Ayuda a prevenir la pérdida de fuerza compresiva, los cementos pierden de su fuerza compresiva a partir de 110°C, y es acompañada por un incremento en permeabilidad, es causada por el silicato de calcio en el fraguado del cemento.

**Trazadores radioactivos:** Son mezclados a la lechada como marcas que pueden ser detectadas por dispositivos de registro, para determinar la localización de cimbras de cemento, la localización y disposición de cemento forzado. Generalmente los isótopos usados abajo del pozo, tienen un rango de vida media de 8 a 84 días.

**Tintes (o tinturas) para cemento:** Son usados para identificar un cemento de una clasificación específica de la API o un aditivo mezclado en una composición de cemento, cuando son utilizados en el fondo del pozo, la dilución y la contaminación con lodo puede opacar y confundir los colores haciéndolos inefectivos.

**Hidrazina:** Es usado para tratar la columna de lodo cerca del cemento para minimizar problemas de corrosión en la porción sin cementar del pozo, es un limpiador compuesto de oxígeno por lo cual debe ser manejada con extrema precaución. Para determinar el volumen teórico, se debe incrementar un 20%, por ser un producto costoso, el cálculo debe ser exacto.

**Cemento con fibras:** Son materiales sintéticos fibrosos añadidos para reducir los efectos que transmiten esfuerzos al cemento y así mejoran la resistencia al impacto y al rompimiento, generalmente se añade yeso para un fraguado rápido para evitar pérdidas de circulación, mejorar las propiedades tixotrópicas.

### 3 IMPLEMENTACIÓN DEL AULA VIRTUAL

#### 3.1 Etapa De Inicio.

En esta etapa se realizó la planificación de los contenidos de cada uno de los temas de la asignatura; esto abarca: recursos, actividades y estrategias de aprendizaje y evaluación. Por tanto se desarrolló el siguiente formato para diseño de experiencias en línea teniendo en cuenta las funcionalidades que nos ofrece la plataforma MOODLE; a continuación el formato para la asignatura:

 		<b>Formato para el Diseño de Experiencias en línea</b> <b>Facultad de Físico-Químicas</b> <b>Escuela de Petróleos</b>
Nombre de la asignatura:	LODOS Y CEMENTOS	
Nombre del Docente:	JOHN A. LEÓN PABÓN	
E-mail:	john.leon@natfrac.com	
URL aula virtual		

PROPÓSITO DE LA ASIGNATURA		
<p>Estudiar y determinar experimentalmente las propiedades físicas y químicas de los fluidos de perforación y cementos donde se aprenda a observar y analizar los síntomas y efectos de los contaminantes sobre las propiedades y utilizar los aditivos para remediarlos.</p>		
<b>Unidad o Tema</b>	<b>FLUIDOS DE PERFORACIÓN.</b>	
<b>Competencia(s) a desarrollar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conoce las funciones del lodo para garantizar una perforación exitosa.</li> <li>• Mide las propiedades del fluido de perforación y diagnostica su composición óptima de la operación en desarrollo.</li> <li>• Selecciona el tipo de lodo adecuado para atravesar las formaciones rocosas mejorando los tiempos y costos operacionales.</li> </ul>	
Recursos (Descripción de los recursos que se suministrarán a los estudiantes para el desarrollo de las actividades presenciales o para el trabajo independiente)		
Nombre del recurso	Tipo (video, documento, animación...)	
Fluidos de Perforación	Documento.pdf	
Lodos de perforación y sus funciones	Documento.pdf	
Composición fases y tipos de lodos	Documento.pdf	
Descripción del equipo	Documento.pdf	
Libro con generalidades y video tutorial prácticas de laboratorio.	Libro formato moodle	
Taller Fluidos de Perforación	Documento.pdf	

<b>Estrategias y Actividades</b> <b>(Descripción de estrategias a utilizar y actividades a realizar para el logro del propósito y el desarrollo de la(s) competencia(s))</b>			
<b>Estrategias</b>	<b>Descripción de actividades (definición y lineamientos para su realización)</b>	<b>Tipo (correspondiente en Moodle)</b>	<b>Valoración/calificación (Descripción de la forma cómo se valorará la actividad y qué tipo de calificación tendrá)</b>
Aprendizaje basado en la investigación.	Realizar la lectura reflexiva "Fluidos de Perforación"		
Apoyo Descriptivo.	Elaborar un cuadro comparativo de los tipos de lodos y su respectiva composición.	Actividad: Tarea	<p>Se valorará teniendo en cuenta: puntualidad en la entrega, organización y los criterios usados para comparar los tipos de lodos y su composición.</p> <p>La calificación cuantitativa será por medio de un quiz, en el aula virtual, que solamente puede ser presentado si y solo si el estudiante subió la tarea en los tiempos previstos para su realización.</p> <p>El quiz tendrá una calificación de máximo 5.0 que equivale al 50% de la nota de la actividad, el otro 50% estará ligado a la nota obtenida por la elaboración del cuadro comparativo.</p>
Taller de práctica de conceptos.	Solución de ejercicios propuestos en el Taller Fluidos de perforación.	Actividad Evidencia.	La valoración de esta actividad será de acuerdo a la precisión de las respuestas a los ejercicios propuestos.

<b>Compromisos de los participantes</b>	
<b>Actividades del profesor</b>	<b>Actividades de los estudiantes</b>
Actualización del contenido: Subir artículos y lecturas complementarias al aula virtual.	Revisar la plataforma periódicamente con ánimo de aportar para la construcción de su conocimiento mediante la lectura.
Establecer la dinámica del trabajo; el tiempo, y el porcentaje de cada actividad sobre la nota final.	Elaborar las actividades oportunamente.
Publicar las calificaciones y solución del examen sujeto a revisión si el estudiante así lo demanda-retroalimentación.	Revisar las calificaciones y replantearse como mejorar en el desarrollo de las actividades.
Generar un espacio abierto a la comunicación con el estudiante.	Usar la plataforma de manera respetuosa y adecuada en la interacción alumno-alumno y docente-alumno.
<b>Unidad o Tema</b>	<b>REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.</b>
<b>Competencia(s) a desarrollar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establece las diferencias conceptuales entre fluidos newtonianos y los no newtonianos en pro de comprender mejor su modelización matemática.</li> <li>• Conoce los factores que moldean el perfil de velocidad de los fluidos en el canal de flujo, para realizar un análisis de su comportamiento.</li> <li>• Identifica las propiedades físicas del lodo y conoce como al hacer cambios en ellas reacciona el fluido en su comportamiento interno y con la formación.</li> </ul>
<b>Recursos</b> <b>(Descripción de los recursos que se suministrarán a los estudiantes para el desarrollo de las actividades presenciales o para el trabajo independiente)</b>	
<b>Nombre del recurso</b>	<b>Tipo (video, documento, animación...)</b>
Reología de los fluidos de Perforación	Documento.pdf
Actividad Escritura de textos “influencia de la temperatura”	Actividad evidencia moodle
Taller reología de los fluidos de perforación	Examen evidencia moodle

<b>Estrategias y Actividades</b> <b>(Descripción de estrategias a utilizar y actividades a realizar para el logro del propósito y el desarrollo de la(s) competencia(s))</b>			
<b>Estrategias</b>	<b>Descripción de actividades (definición y lineamientos para su realización)</b>	<b>Tipo (correspondiente en Moodle)</b>	<b>Valoración/calificación (Descripción de la forma cómo se valorará la actividad y qué tipo de calificación tendrá)</b>
Aprendizaje basado en la investigación.	Realizar la lectura del documento “Reología de los fluidos de Perforación”		
Escritura de textos.	Elaborar un documento con extensión mínima de 1 hoja, máxima de 3 hojas; sobre la influencia de la temperatura en los lodos de perforación.	Actividad: Tarea	<p>Se valorará teniendo en cuenta: puntualidad en la entrega, organización y los criterios usados para expresar como afecta la temperatura los lodos de perforación.</p> <p>La calificación cuantitativa será por medio de un quiz, en el aula virtual, que solamente puede ser presentado si y solo si el estudiante subió la tarea en los tiempos previstos para su realización.</p> <p>El quiz tendrá una calificación de máximo 5.0 que equivale al 50% de la nota de la actividad, el otro 50% estará ligado a la nota obtenida por la elaboración del texto.</p>
Taller de práctica de conceptos.	Solución de ejercicios propuestos en el Taller reología de los fluidos de perforación.	Actividad Evidencia.	La valoración de esta actividad será de acuerdo a la precisión de las respuestas a los ejercicios propuestos.

<b>Compromisos de los participantes</b>	
<b>Actividades del profesor</b>	<b>Actividades de los estudiantes</b>
Actualización del contenido: Subir artículos y lecturas complementarias al aula virtual.	Revisar la plataforma periódicamente con ánimo de aportar para la construcción de su conocimiento mediante la lectura.
Establecer la dinámica del trabajo; el tiempo, y el porcentaje de cada actividad sobre la nota final.	Elaborar las actividades oportunamente.
Publicar las calificaciones y solución del examen sujeto a revisión si el estudiante así lo demanda-retroalimentación.	Revisar las calificaciones y replantearse como mejorar en el desarrollo de las actividades.
Generar un espacio abierto a la comunicación con el estudiante.	Usar la plataforma de manera respetuosa y adecuada en la interacción alumno-alumno y docente-alumno.
<b>Unidad o Tema</b>	<b>QUÍMICA DE LAS ARCILLAS</b>
<b>Competencia(s) a desarrollar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconoce los conceptos básicos de la química de las arcillas en el proceso de perforación de un pozo.</li> <li>• Identifica las dificultades asociadas a las formaciones de lutitas.</li> <li>• Comprende los mecanismos de hinchamiento de las arcillas.</li> </ul>
<b>Recursos</b> (Descripción de los recursos que se suministrarán a los estudiantes para el desarrollo de las actividades presenciales o para el trabajo independiente)	
<b>Nombre del recurso</b>	<b>Tipo (video, documento, animación...)</b>
Archivo PDF "Química de las arcillas"	Documento.pdf
Archivo PDF "Taller Química de las arcillas"	Documento en medio electrónico
<b>Estrategias y Actividades</b> (Descripción de estrategias a utilizar y actividades a realizar para el logro del propósito y el desarrollo de la(s) competencia(s))	

<b>Estrategias</b>	<b>Descripción de actividades (definición y lineamientos para su realización)</b>	<b>Tipo (correspondiente en Moodle)</b>	<b>Valoración/calificación (Descripción de la forma cómo se valorará la actividad y qué tipo de calificación tendrá)</b>
Aprendizaje basado en la investigación.	Lectura reflexiva “Química de las Arcillas”.	Recurso Archivo	
Estudio de Casos	Elaborar un ensayo que describa un suceso real de la perforación, también puede ser simulado complejo de las formaciones arcillosas (lutitas) máximo de 5 hojas; basado en un paper o una tesis de grado, que refleje sus capacidades y criterio en la solución de problemas. Exponga su opinión.	Actividad: Tarea	Se valorará teniendo en cuenta la puntualidad en la entrega, organización y relevancia de la información contenida, además de su pensamiento crítico en la solución de problemas relacionado con las formaciones arcillosas.
<b>Compromisos de los participantes</b>			
<b>Actividades del profesor</b>		<b>Actividades de los estudiantes</b>	
Actualización del contenido: Subir artículos y lecturas complementarias al aula virtual.		Revisar la plataforma periódicamente con ánimo pronto de aportar para la construcción de su conocimiento mediante la lectura.	
Establecer la dinámica del trabajo; el tiempo, y el porcentaje de cada actividad sobre la nota final.		Elaborar las actividades oportunamente.	
<b>Unidad o Tema</b>	<b>PROPIEDADES FÍSICAS DEL LODO DE PERFORACIÓN.</b>		
<b>Competencias a desarrollar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entiende las variables que ayudan a construir las ecuaciones para determinar cuáles y en qué momento tienen mayor trascendencia en los modelos matemáticos.</li> <li>• Comprende las diferencias entre los modelos reológicos para determinar cuál es el más apropiado y utilizarlo en la descripción de la relación del esfuerzo de corte con la deformación de la materia</li> <li>• Conoce las funciones y características principales de los equipos de separación de sólidos más comunes para estar familiarizado con la operación en campo y prevenir problemas asociados a pérdidas de propiedades del lodo.</li> </ul>		

<b>Recursos</b> (Descripción de los recursos que se suministrarán a los estudiantes para el desarrollo de las actividades presenciales o para el trabajo independiente)			
Nombre del recurso		Tipo (video, documento, animación...)	
Archivo PDF "Propiedades de flujo y densidad de los lodos"		Documento en medio electrónico.	
Archivo PDF taller individual		Documento en medio electrónico	
Archivo video de equipos de control de sólidos		Video	
<b>Estrategias y Actividades</b> (Descripción de estrategias a utilizar y actividades a realizar para el logro del propósito y el desarrollo de la(s) competencia(s))			
Estrategias	Descripción de actividades (definición y lineamientos para su realización)	Tipo (correspondiente en Moodle)	Valoración/calificación (Descripción de la forma cómo se valorará la actividad y qué tipo de calificación tendrá)
Aprendizaje basado en la investigación.	Lectura reflexiva "Propiedades físicas de los lodos de perforación".	Recurso Archivo	
Aprendizaje didáctico	Elaborar un mapa conceptual de las propiedades físicas del fluido.	Actividad: Tarea	Se valorará teniendo en cuenta: puntualidad en la entrega, la organización del mapa conceptual, y las definiciones y factores incluidos en el mismo. La calificación cuantitativa será por medio de un quiz, en el aula virtual, que solamente puede ser presentado si y solo si el estudiante subió la tarea en los tiempos previstos para su realización. El quiz tendrá una calificación de máximo 5.0 que equivale al 50% de la nota de la actividad, el otro 50% estará ligado a la nota obtenida por la elaboración del mapa conceptual.
Aprendizaje cooperativo.	Desarrollo de taller propuesto	Recurso: Archivo, Actividad Tarea o	La actividad se valorará con un 30% del parcial, se

	“Propiedades de flujo y densidad de los lodos” en grupos de máximo 3 personas.	Evidencia.	calificará teniendo en cuenta la precisión de las respuestas fundamentadas en los conceptos previos y de propiedades físicas del fluido.
<b>Compromisos de los participantes</b>			
<b>Actividades del profesor</b>		<b>Actividades de los estudiantes</b>	
Proporcionar el material base necesario para comprender el tema de manera oportuna.		Revisar la plataforma periódicamente con ánimo pronto de aportar para la construcción de su conocimiento mediante la lectura y comprensión de los temas propuestos.	
Establecer la dinámica del trabajo; el tiempo, y el porcentaje de cada actividad sobre la nota final.		Elaborar las actividades oportunamente.	
Publicar las calificaciones a tiempo y llevar control de asistencia.		Revisar las calificaciones y replantearse como mejorar en el desarrollo de las actividades.	
Generar un espacio abierto a la comunicación con el estudiante.		Usar la plataforma de manera respetuosa y adecuada en la interacción alumno-alumno y docente-alumno.	
<b>Unidad o Tema</b>	<b>PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS</b>		
<b>Competencia(s) a desarrollar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conoce los objetivos de la cementación con la finalidad de dar una apropiada terminación primaria al pozo y garantizar así adecuadas características de estabilidad y sello del hoyo recubierto.</li> <li>• Identifica la clasificación API para los cementos.</li> <li>• Caracteriza el cemento, sus propiedades, condiciones de diseño y factores que lo afectan.</li> </ul>		
<b>Recursos</b> (Descripción de los recursos que se suministrarán a los estudiantes para el desarrollo de las actividades presenciales o para el trabajo independiente)			
<b>Nombre del recurso</b>	<b>Tipo (video, documento, animación...)</b>		
Propiedades de los cementos	Documento.doc		
Cementación primaria en una etapa	Animación		
Cementación primaria en dos etapas	Animación		
Presentación propiedades de los cementos	Documento.ppt		
Ejercicios resueltos	Documento.pdf		
<b>Estrategias y Actividades</b> (Descripción de estrategias a utilizar y actividades a realizar para el logro del propósito y el desarrollo de la(s) competencia(s))			

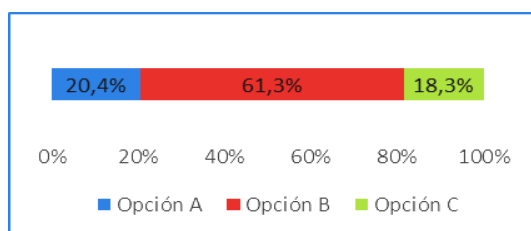
<b>Estrategias</b>	<b>Descripción de actividades (definición y lineamientos para su realización)</b>	<b>Tipo (correspondiente en Moodle)</b>	<b>Valoración/calificación (Descripción de la forma cómo se valorará la actividad y qué tipo de calificación tendrá)</b>
Aprendizaje basado en la investigación.	Lectura reflexiva "Propiedades de los cementos".	Recurso Archivo	
Aprendizaje Descriptivo.	Elabora un cuadro sinóptico de los principales objetivos de la cementación dando una breve descripción o explicación de cada uno.	Actividad: Tarea	La actividad se valorará teniendo en cuenta la coherencia de los objetivos con la descripción de cada uno. La calificación cuantitativa será por medio de un quiz, que se realizara en la aplicación, la nota se generará y cargará automáticamente en la plataforma (el valor cuantitativo del cuadro sinóptico es de máximo 2.5, es decir, el quiz y el cuadro sinóptico equivalen cada uno al 50% de la nota.
Aprendizaje basado en problemas	Revisar los ejercicios propuestos acerca de las condiciones y diseño de una lechada de cemento.	Recurso: archivo	
<b>Compromisos de los participantes</b>			
<b>Actividades del profesor</b>		<b>Actividades de los estudiantes</b>	
Actualización del contenido: Subir artículos y lecturas complementarias al aula virtual.		Revisar la plataforma periódicamente con ánimo pronto de aportar para la construcción de su conocimiento mediante la lectura.	
Establecer la dinámica del trabajo; el tiempo, y el porcentaje de cada actividad sobre la nota final.		Elaborar las actividades oportunamente.	
Publicar las calificaciones y solución del examen sujeto a revisión si el estudiante así lo demanda-retroalimentación.		Revisar las calificaciones y replantearse como mejorar en el desarrollo de las actividades.	
Generar un espacio abierto a la comunicación con el estudiante.		Usar la plataforma de manera respetuosa y adecuada en la interacción alumno-alumno y docente-alumno.	

### 3.2 Etapa De Diseño.

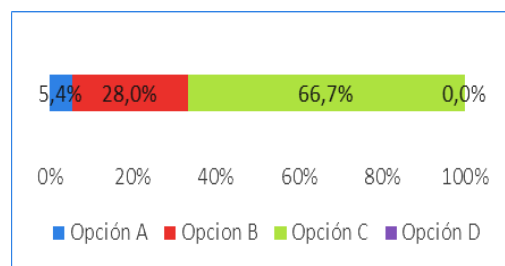
Se realiza una encuesta a los estudiantes de todos los grupos de lodos para conocer algunas particularidades como su conocimiento en entornos multimedia y disposición temporal para trabajar en ellas. Aquí se presenta la tabulación de los resultados.

Para el siguiente tipo de preguntas elija una A B C o D según estén más acorde con su criterio.

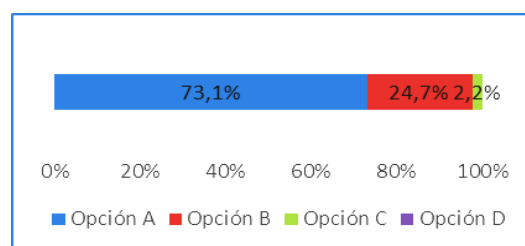
- 1) ¿Qué tan familiarizado se encuentra con plataformas virtuales?
- a) Muy Poco
  - b) Poco
  - c) Mucho



- 2) Si tiene usted una herramienta multimedia en la web enfocada en lodos y cementos usted la emplearía para:
- a) consultar sobre temas teóricos de la asignatura
  - b) consultar manuales prácticos del laboratorio de lodos y cementos
  - c) consultar manuales teórico prácticos
  - d) ninguna de las anteriores

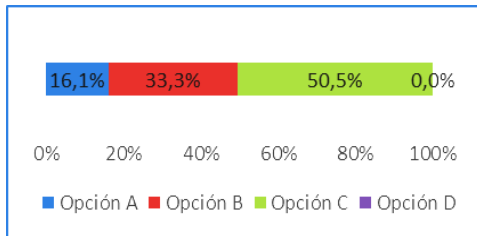


- 3) Si tiene usted una herramienta multimedia en la web enfocada en lodos y cementos usted cuanto tiempo (adicional-semanal) emplearía en consultar en este instrumento:
- a) entre 2 y 4 horas
  - b) entre 5 y 7 horas
  - c) más de 8 horas
  - d) no la utilizaría.

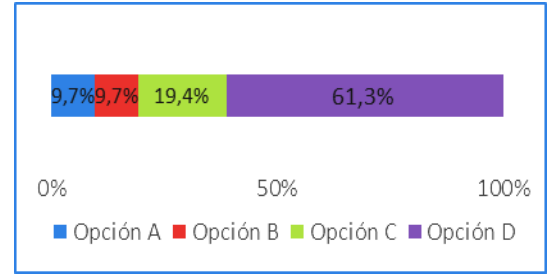


- 4) Si tiene usted una herramienta multimedia en la web enfocada en lodos y cementos le parecería bueno que:

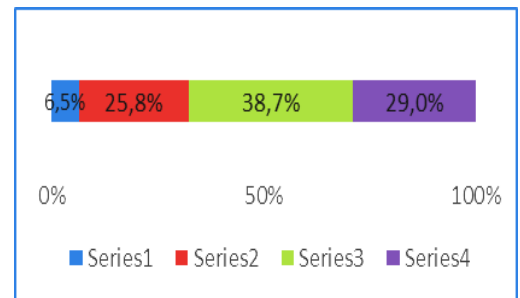
- a) Los quices, talleres y tareas se realizaran en la plataforma moodle de lodos y cementos
- b) Los quices, talleres y trabajo se sigan haciendo de la forma tradicional
- c) Que los quices, talleres y trabajos se hagan en forma dual. (Algunos en la plataforma y otros para presentar en físico de forma tradicional.)



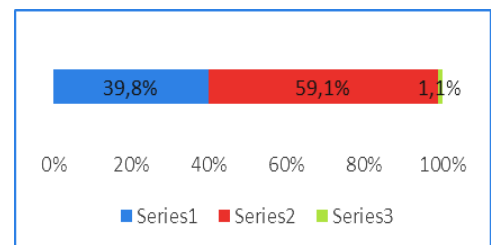
- 5) En su criterio como ingeniero, ¿Qué le parece más importante al diseñar e implementar un curso virtual de fortalecimiento del proceso aprendizaje enseñanza de lodos y cementos?
- a) El contenido teórico de la asignatura
  - b) La forma de presentar el contenido en la plataforma virtual
  - c) Las diferentes formas de interactuar en la plataforma como lo son los foros de discusión
  - d) Todas las anteriores.



- 6) Considera que está aprendiendo (respecto a su potencial de aprendizaje):
- a) Mucho menos de lo que podría
  - b) Menos de lo que podría
  - c) Lo que puedo
  - d) Excelentemente

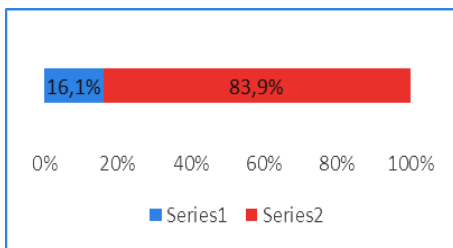


- 7) ¿A qué o a quien atribuyes principalmente lo anterior?
- a) A la universidad
  - b) A mí mismo
  - c) A mis padres
  - d) A mis amigos



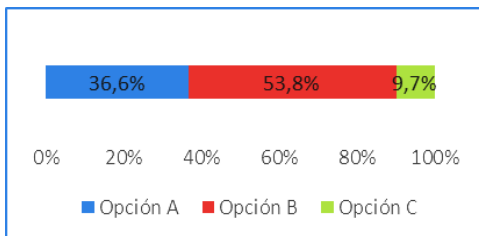
8) Le parece a usted que el contenido teórico que se presenta en las clases de lodos y cementos es:

- a) Trivial y de poca importancia para desarrollar las prácticas de laboratorio.
- b) Indispensable para el correcto desarrollo de las prácticas de laboratorio. colocar más opciones.



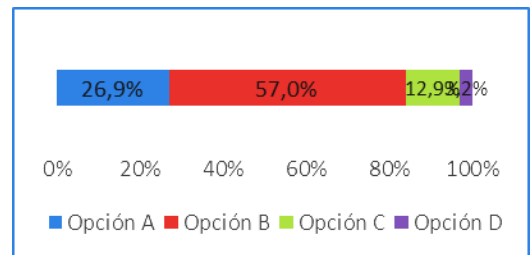
9) Le parece a usted que el contenido teórico que se presenta en las clases de lodos y cementos es:

- a) Poco interactivo en camino de preparar las prácticas de laboratorio.
- b) Adecuado como preparación a las prácticas de laboratorio.
- c) Excelente como preparación previa para los laboratorios



10) Cree usted que las prácticas de laboratorio son:

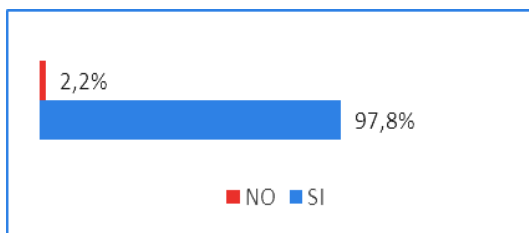
- a) Adecuadas respecto a las competencias que debe tener un ingeniero petrolero que quiera trabajar como Ingeniero de lodos.
- b) Adecuadas para que un ingeniero petrolero conozca las características básicas de los lodos y cementos.
- c) Inadecuadas en las competencias requeridas para optar en un futuro trabajo como ingeniero en cabeza de la preparación de los lodos y cementos típicos de operaciones en campo.
- d) Desactualizadas con las prácticas actuales en la industria.



**Para el siguiente tipo de preguntas elija solo SI o NO según estén más acorde con su criterio.**

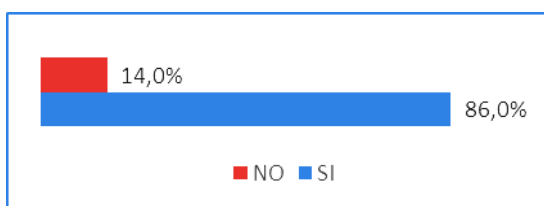
11) ¿Le gustaría que en una herramienta virtual como moodle enfocada en lodos y cementos tuviese una sección dedicada a las nuevas tendencias de los fluidos de perforación y los cementos de última generación?

- SI
- NO



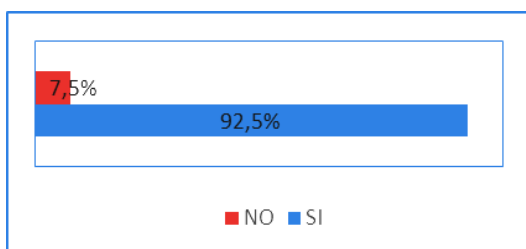
12) ¿Le gustaría que los parciales fuesen Teórico-Prácticos?

- SI
- NO



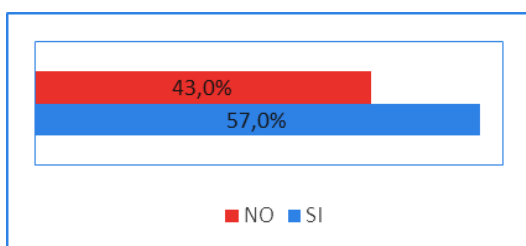
13) ¿Fortalecer la practica con un medio magnético (video) antes de la realización de la misma le ayudaría?

- SI
- NO



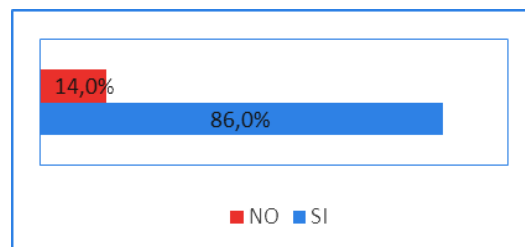
14) ¿Considera que es escaso el material que se brinda al estudiante para el estudio de las prácticas y conocimiento de la asignatura?

- SI
- NO



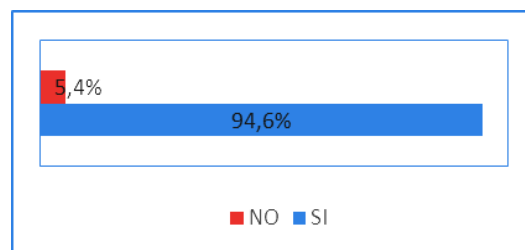
15) ¿Cree es primordial la evaluación para la asignatura Lodos y Cementos?

- SI
- NO



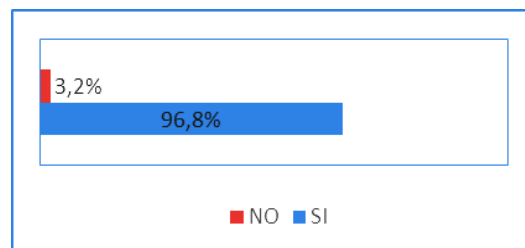
16) ¿le gusta el trabajo en equipo en el Laboratorio?

- SI
- NO



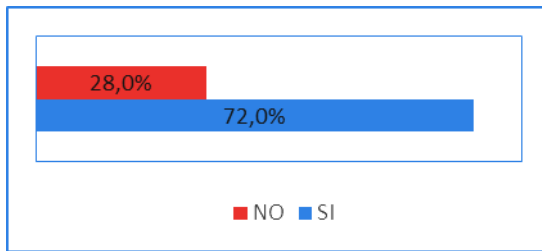
17) ¿Tiene o tuvo buena relación con sus compañeros?

- SI
- NO



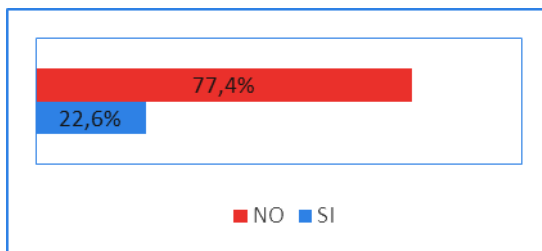
18) ¿Le gustaría que las actividades propuestas en un curso virtual de lodos y cementos (quices y talleres) hagan parte de un porcentaje de las evaluaciones?

- SI
- NO



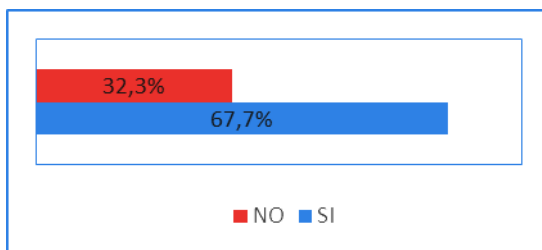
19) ¿Nota desinterés y desmotivación por parte del docente al impartir el conocimiento?

- SI
- NO



20) ¿Si usted fuese el docente de la asignatura haría quices antes de cada práctica?

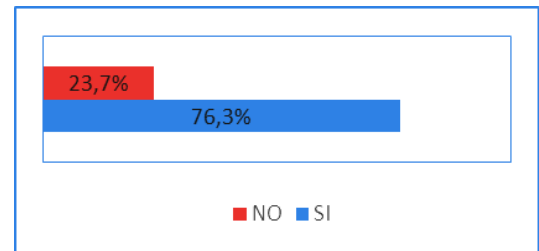
- SI
- NO



21) ¿Si usted fuese el docente de la asignatura dejaría trabajos investigativos?

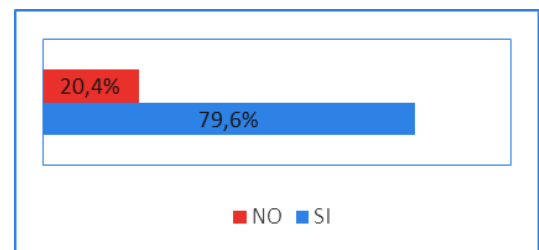
- SI

- NO



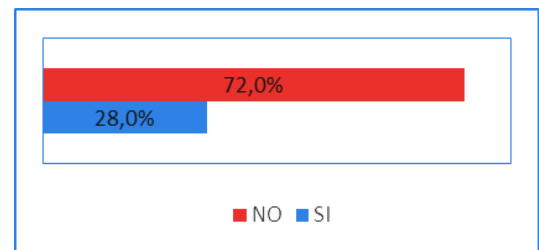
22) ¿Si usted fuese el docente de la asignatura haría parciales?

- SI
- NO



23) ¿Si usted fuese el docente de la asignatura pondría ensayos?

- SI
- NO



A partir de esto se consultan documentos técnicos para la industria y material pedagógico en la Universidad Industrial de Santander con el fin de visualizar cuales deberían ser las competencias principales para los ingenieros inclinados en un ámbito laboral de lodos de perforación. (Esto se expone en el capítulo 1 Sección 1.6.3). Se realizan los formatos, con los cuales se identificaron los recursos y actividades que ayudarían a incentivar el desarrollo de tales competencias, se continuó con la adecuación y/o diseño de cada uno de ellos para los temas de la asignatura; estos fueron: presentaciones, talleres, lecturas complementarias, ejercicios, solucionarios, videos de las prácticas en el laboratorio. A continuación algunos pantallazos de las presentaciones elaboradas:

**Figura 87** Introducción a los Fluidos de Perforación



**Figura 88** Equipos Utilizados en una Cementación Primaria



Es de resaltar que para los quices y exámenes teóricos, la calificación obtenida podrá ser conocida de manera inmediata por el estudiante una vez haya culminado el tiempo límite para responder la actividad. Por otro lado, los exámenes prácticos no se implementaron directamente en el aula debido a que estos no cuenta con única respuesta y la mejor forma de calificarlos es en el laboratorio de lodos y cementos. Cabe añadir que en el calificador del curso se agregaron los ítems necesarios para las actividades y evaluaciones fuera de línea con el fin de usarlo para el promedio y porcentajes de evaluación de la asignatura.

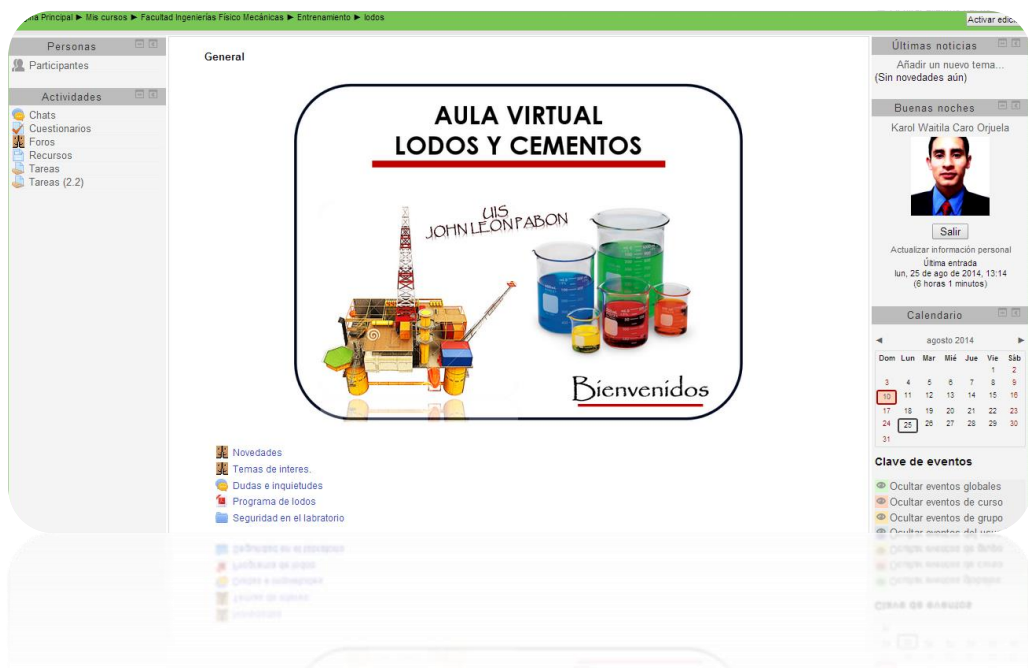
### **3.3 Etapa De Implementación.**

Una vez realizado la descripción de las diferentes pruebas en el laboratorio, la elaboración del formato, ejercicios, presentaciones, quices, talleres y demás recurso y actividades, se comenzó el montaje en la plataforma Moodle antes recibiendo asesoría en CEDEDUIS sobre el manejo de la misma. Como resultado de lo anteriormente mencionado, se muestra a continuación el espacio virtual creado.

Los contenidos del curso se montaron de acuerdo los formatos diseñados, dando como resultado secciones divididas por los temas del curso y estando en primera línea el tema

general en el cual se puede tener acceso a: un video motivador como preámbulo para el curso, el programa de la asignatura, los foros correspondientes a novedades del curso que tiene como finalidad brindar un espacio para las últimas noticias del curso; el foro de preguntas y respuestas usado en el caso de dudas y el foro social o cafetería destinado para el espacio social del curso, algunas URL externas y algunos libros de consulta. Asimismo se evidencia en la zonas laterales los bloques de izquierda a derechas: Personas, Actividades, Ajustes, últimas noticias, Entrar/salir, Calendario y Mensajes.

**Figura 89** Imagen de la Pantalla de Inicio del Curso



En cuanto a las temáticas de la asignatura, se encuentran divididas por temas. Cada uno de estos contiene recursos y actividades. A continuación se ilustra cómo se presentan los temas:

**Figura 90** Distribución de Temas en el Curso. Reología de los Fluidos de Perforación

▼ Fluidos de perforación.

- 1. Funciones de los Lodos.pdf
- 2. Composición, Fases y Tipos de Lodos.pdf
- 3. Descripción del Equipo.pdf
- 4. Análisis Químico del Agua.pdf

▼ Vídeos de las prácticas en el laboratorio de lodos y fluidos

▼ Laboratorio 1 Análisis Químico del Agua

Laboratorio 1 Análisis Químico del Agua.pdf

**Actividades**

*Debes hacer la lectura reflexiva " Fluidos de perforación"*

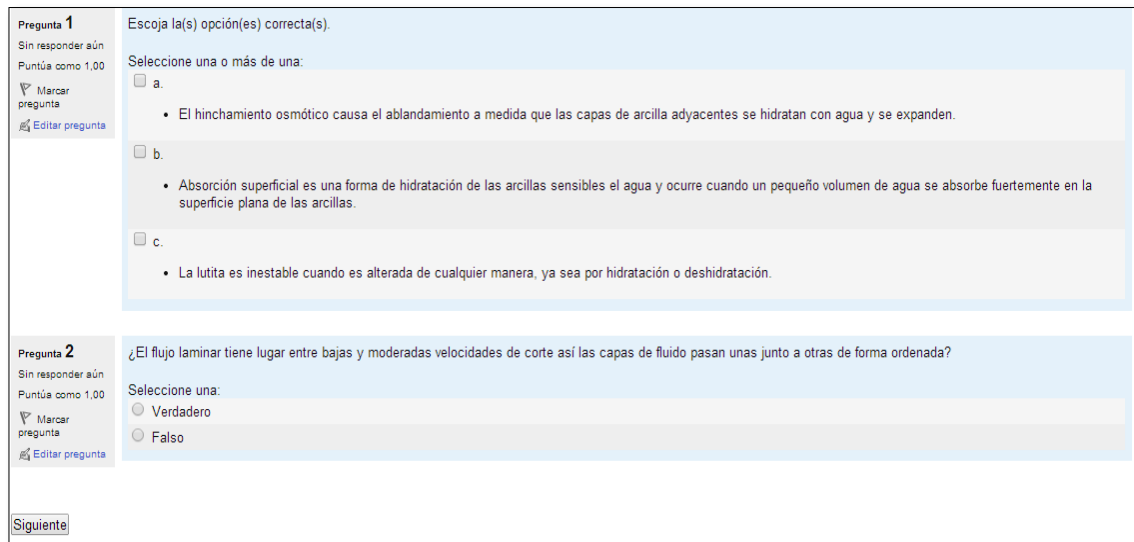
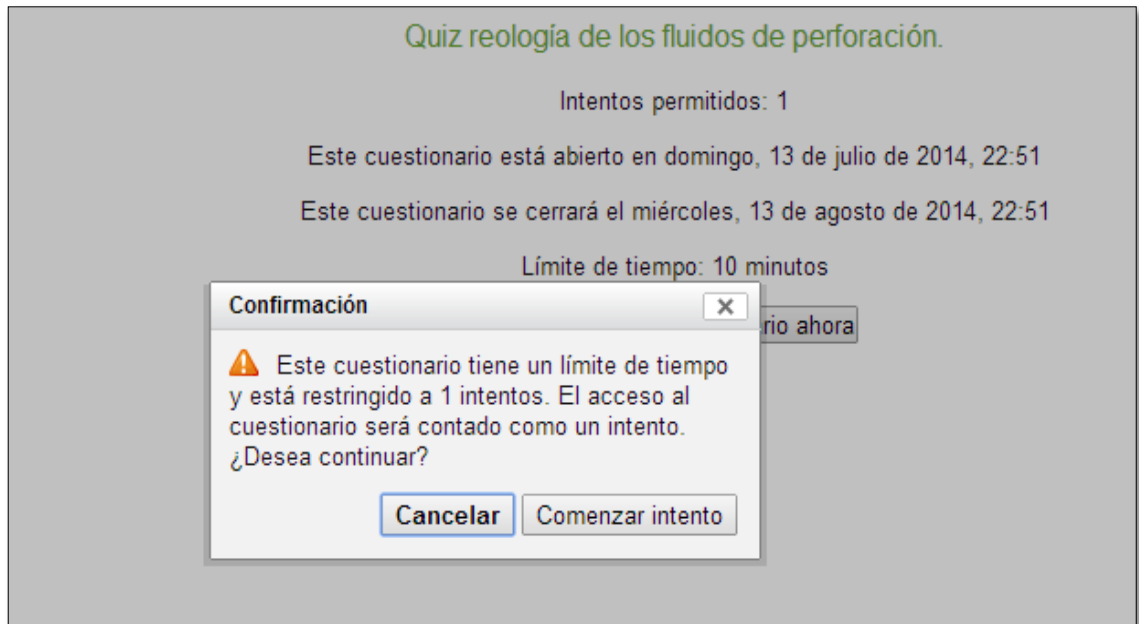
- Cuadro comparativo Tipos de lodo
- Q1
- Quiz Fluidos de perforación.
- Taller Fluidos de Perforación

Ir a... 2. PROPIEDADES FISICAS DEL LODO DE PERFORACIÓN ►

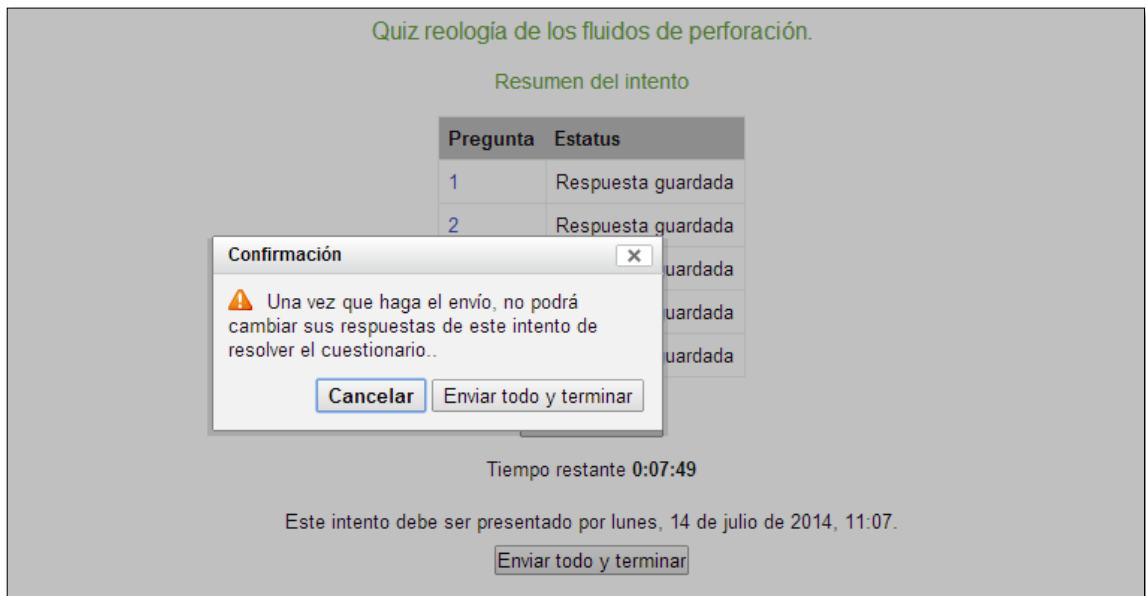
Moodle Docs para esta página  
Usted se ha identificado como Karol Waitila Caro Oriuela (Salir)

Con respecto a la exámenes y quices, se presenta un ejemplo, el cual muestra el tipo de modelo que se sigue para los todos los exámenes teóricos del curso (Previos y exámenes cortos), antes de iniciar un quiz o un examen, todos ellos pasaran por un proceso de confirmación, ya que solo se le permitirá a cada alumno la realización de estas actividades una única vez dentro del tiempo que está activa dicha actividad y también tiene un tiempo límite para realizarla; al cabo de este tiempo las respuestas que se hayan generado se guardaran automáticamente y se enviarán como la evidencia de la actividad.

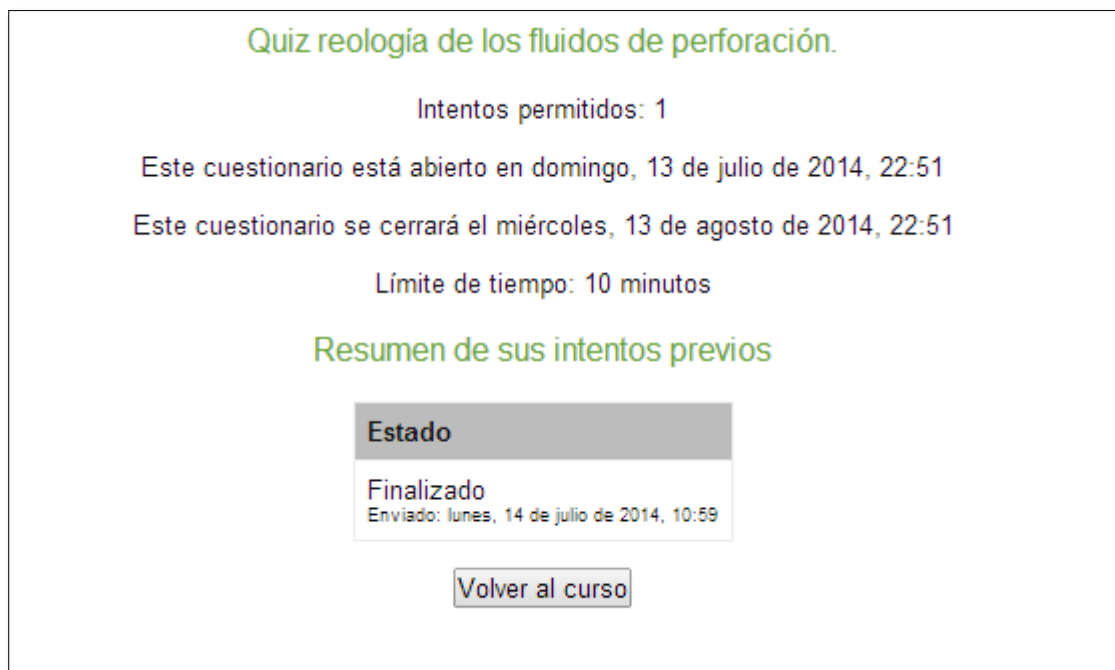
**Figura 91** Confirmación de acceso al quiz



**Figura 92** Modelo de Quiz Teórico en la Sección: Reología de los Fluidos de Perforación



**Figura 93** Confirmación del Envío de Actividad



**Figura 94** Visualización del Estado de la Actividad

En cuanto a las calificaciones, los estudiantes podrán consultar sus respectivas notas una vez el tiempo de cierre del cuestionario para todos los participantes se haya terminado. Igualmente podrán consultar todas las notas que haya obtenido y conocer su nota final.

#### 4 CONCLUSIONES

- Los contenidos expuestos en la plataforma virtual para lodos y cementos tendrán la tendencia a ser fácilmente configurables de acuerdo a las demandas actuales y futuras para los estudiantes de ingeniería de petróleos y las mismas exigencia que delimite la escuela de ingeniería de petróleos de la Universidad Industrial de Santander gracias a la filosofía de presentación y adecuación de contenidos en Moodle.
- El espacio virtual implementado pone a disposición de profesores y alumnos diversos recursos y actividades encaminados a estimular el desarrollo de competencias en ambos bandos ya que se diseña de tal forma que el alumno tenga mayor material de más fácil acceso y el profesor tenga más tiempo para concentrarse en promover el desarrollo de competencias propias de la asignatura en los alumnos.
- El acompañamiento en los procesos de aprendizaje, enseñanza y evaluación con herramientas tecnológicas en la asignatura presencial de lodos y cementos, aporta valor agregado a dichos procesos educativos.
- Los contenidos presentados sobre las principales pruebas para los lodos y cementos así como el material teórico que es la base del conocimiento para comprender los procesos relacionados a los lodos en los pozos petroleros y el comportamiento del cemento en las operaciones son un recurso de consulta para aquellos estudiantes que pretenden ampliar su conocimiento acerca de este material.
- Como resultado de la recopilación de información, se elaboraron, diseñaron y adecuaron las diferentes presentaciones, talleres y exámenes que son presentados a los alumnos a los largo del desarrollo del curso en el aula virtual que fomenta en el estudiante la lectura, la puntualidad, la responsabilidad, la creatividad, el pensamiento crítico, la síntesis de contenidos y muchas otras competencias generales propias para la asignatura.

- En este espacio virtual se pretende impulsar la ruptura del paradigma en el cual el docente es trasmisor de información y el alumno un receptor pasivo de la misma, pues depende casi por completo de cada uno de los usuarios, por lo tanto la motivación es el factor más influyente en el crecimiento y mejoramiento de la capacidad de adquirir conocimiento.
  
- El desarrollo y diseño de ejercicios para cada una de los capítulos presentados en el aula virtual facilita a los estudiantes encontrar en un mismo lugar variados problemas de diferentes fuentes para resolver y a su vez tener la solución de algunos, permitiendo así poner en práctica los conceptos vistos y obteniendo también realimentación para favorecer el aprendizaje en medida que tiene la intención reforzar sus fortalezas y superar sus deficiencias.
  
- El aula virtual para todos y cementos implementada en Moodle da soporte a la asignatura teórica y tiene ventaja en caso de presentarse inconvenientes o interrupciones que puedan llegar a presentarse en la institución ya que permite el desarrollo de la asignatura sin mayores traumatismos ofreciendo conexión a los recursos y actividades desde puntos y dispositivo conectado a internet con requerimientos mínimos para soportar navegación en páginas web y visualización de contenidos multimedia.

## 5 RECOMENDACIONES

- Es importante que el docente esté actualizando continuamente la plataforma (Quices, Tareas, Parciales). Esto estimula los estudiantes y genera nuevos retos en ellos.
- Recomendamos incluir en la Temática de la Asignatura, temas específicos de fluidos para perforación en Shales, Plataformas Mar Adentro.
- Se necesita especial interés del docente para desarrollar en los estudiantes las competencias necesarias, mucho compromiso y dedicación, además de espacios de acercamiento docente-estudiante.
- Instruir a los estudiantes en el uso de la plataforma.

## BIBLIOGRAFÍA

- BAKER HUGHES. Fluidos. Manual de ingeniería. Guía de referencia 750-500 Rev. B agosto de 1998.
- BAROID A HALLIBURTON COMPANY, 1998. Manual de Fluidos Baroid, Houston, Texas.
- BROWNING, W.C., "Lignosulfonate Stabilized Emulsions in Oil Well Drilling Fluids." J. Petrol. Technol. (June, 1955). pp. 915. Citado por: H.C.H. Darley. GRAY. R. George. Composition and properties of drilling and completion fluids. Drilling fluids components. 5 edition. Gulf Professional Publishing. Houston TX 1988 P 580
- BEDOYA M. María Isabel y CARDONA L. Natalia. Estudio comparativo de modelos reológicos para lodos de perforación. Medellín, 2009. Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de procesos y Energía.
- BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge E. y OSPINO ROJAS Rafael E. Reestructuración Teórico-Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico). Tesis de Grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Químicas, 1988.
- ECAPETROL Escuela de Capacitación Petrolera. Química de Lodos.
- HERNANDEZ PARRA, Martin, LADRON DE GUEVARA Álvaro. Manual de laboratorio de lodos: Contaminación con sal. Bucaramanga, 1979. 171 H. Trabajo de grado (ingeniero de petróleo). Universidad Industrial de Santander. División de ciencias físico-químicas. Facultad de ingeniería de petróleo.
- H.C.H. Darley. GRAY. R. George. Composition and properties of drilling and completion fluids. Drilling fluids components. 5 edition. Gulf Professional Publishing. Houston TX 1988 P 580
- MARTINEZ S, Frank., VILLEGAS A, Gabriel. Estudio de la resistencia a la tensión y a la intrusión de fluidos de los cementos en pozos de petróleo: Adherencia y registros. Bucaramanga 1979. Pág. 26-29. Proyecto sometido como requerimiento parcial para optar por el título de ingeniero de petróleo. Universidad Industrial de Santander, facultad de ingeniería de petróleo.

- MONTOYA JIMÉNEZ Pedro, GARCÍA MESEGUER Álvaro, MORÁN CABRÉ Francisco. Hormigón Armado 14ª Edición basada en la E.H.E. ajustada al código modelo y al euro-código. Editorial Gustavo Gili, S.A.
- MUÑOZ NAVARRO Samuel Fernando. Tecnología Avanzada de Fluidos de Perforación. Trabajo de Grado para optar título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Químicas, 1992.
- M.C, Armando. MERINO, Montiel & Gil Erwin. (2002). ABC de las Cementaciones.
- M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.
- Ortiz M. Andrés Felipe, Meza R. Mario Fernando. (2013). Desarrollo de una herramienta software para el análisis reológico e hidráulico de lechadas de cementación primaria en pozos verticales. Tesis de Grado, UIS, Bucaramanga.
- RODRIGUEZ, Eliserio. Reestructuración Teórico-Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico-Químicas.
- SMITH, Dwight. Cementing. Ed. 2. New York City: Society of Petroleum Engineers Inc. 1990.
- TELMO CAMACHO, Duran. Contribución al estudio de los cementos usados en pozos de petróleo en Colombia: Tipos de cemento usados en la industria del petróleo. Bucaramanga 1960. 353h. Trabajo de grado (ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. División de ciencias físico-químicas. Escuela de ingeniería de petróleos.
- TORRES Alejandro, LUGO Raúl, ZAMORA Juan M. y GUTIÉRREZ Javier. Análisis térmico de un tubo absorbedor compuesto. México. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.