

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA PETROLERA**



**CEMENTACIÓN REMEDIAL PARA UN EFECTIVO AISLAMIENTO ZONAL MEDIANTE LA LECHADA FIBRA CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraLiteCRETE PARA EL TRAMO LINER DE 7” EN EL POZO SBL-X7 QUE COADYUVEN A LA REDUCCIÓN DE COSTOS.**

**Proyecto de Grado Para la Obtención del Grado de  
Licenciatura en Ingeniería Petrolera**

**POR: CRISTEL QUISPE ALBERTO**

**TUTOR: ING. WILSON MEDINACELI MENDOZA**

**La Paz – Bolivia**

**2021**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

*El presente proyecto de grado dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.*

*A mi madre Ángela Alberto Alcon, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ella he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.*

*A mis hermanos Tristan y Jezreel por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios porque me dio el don de la perseverancia para alcanzar mi meta.*

*A la Carrera de Ingeniería Petrolera de la Facultad de Ingeniería de la prestigiosa Universidad Mayor de San Andrés, a todo el plantel docente del curso básico y de materias de carrera.*

*A mi Tutor Ing. Wilson Medinaceli Mendoza por confiar en mi, para realizar este proyecto, por haber sido paciente y a mis revisores Ing. Fernando Cuevas Banda, Ing. Marco Antonio Montesinos Montesinos e Ing. Felix Orellana Sanchez por el apoyo incondicional.*

*A mis compañeros de carrera por su amistad y apoyo moral.*

## INDICE GENERAL

INDICE GENERAL .....	i
INDICE DE FIGURAS .....	viii
INDICE DE TABLAS .....	x
SIMBOLOGIA.....	xiii

## CAPITULO I GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.3.1. Identificación del Problema.....	2
1.3.2. Formulación del Problema .....	3
1.4. OBJETIVOS .....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos .....	3
1.5. JUSTIFICACION .....	4
1.5.1. Justificación Técnica.....	4
1.5.2. Justificación Económica .....	4
1.5.3. Justificación Ambiental .....	5
1.6. ALCANCE .....	5
1.6.1. Alcance Temático .....	5
1.6.2. Alcance Geografico .....	6
1.7. CARACTERÍSTICAS DE LA CEMENTACIÓN REMEDIAL.....	7
1.7.1. Técnica de cementación remedial .....	7
1.7.2. Herramientas usadas en cementación remedial.....	8

1.8. TECNOLOGÍAS SCHLUMBERGER .....	8
1.8.1. LiteCRETE.....	8
1.8.2. Fibras CemNET .....	9

## **CAPITULO II - CONCEPTOS GEOLOGICOS DEL CAMPO SABALO**

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO .....	12
2.2. GENERALIDADES GEOLOGIAS DEL POZO SBL-X7 .....	13
2.2.1. Datos generales del Pozo.....	13
2.2.1.1. Pozo Piloto (SBL-7).....	15
2.2.1.2. Pozo Rama Superior (SBL-7D) .....	15
2.3. CONSIDERACIONES GEOLOGICAS DE LAS FORMACIONES DEL CAMPO SABALO.....	16
2.3.1. Estratigrafía .....	16
2.3.2. Descripción de los estratos.....	17

## **CAPITULO III - OPERACIONES DE LA CEMENTACION**

3.1. ASPECTOS GENERALES DE LA CEMENTACIÓN .....	24
3.1.1. Cementación.....	24
3.1.2. Objetivos de la cementación.....	24
3.2. COMPOSICIÓN DEL CEMENTO.....	25
3.2.1. Clasificación de los cementos según su grado API. ....	25
3.3. PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO .....	27
3.3.1. Tiempo de espesamiento .....	27
3.3.2. Densidad de la lechada .....	27
3.3.3. Resistencia a la compresión.....	28
3.3.4. Permeabilidad.....	28
3.4. ADITIVOS PARA LOS CEMENTOS .....	28

3.4.1. Aceleradores.....	29
3.4.1.1. Cloruro de calcio.....	29
3.4.1.2. Cloruro de Sodio.....	30
3.4.2. Retardadores.....	31
3.4.2.1. Lignosulfatos.....	31
3.4.2.2. Ácidos carboxílicos.....	32
3.4.3. Extendedores.....	32
3.4.3.1. Extendedores de Agua.....	33
3.4.3.2. Agregados de baja densidad.....	36
3.4.3.3. Extendedores gaseosos.....	37
3.4.4. Densificantes.....	37
3.4.5. Dispersantes.....	38
3.4.6. Agentes Anti-Sedimentación.....	40
3.4.7. Controladores de Filtrado.....	40
3.4.8. Controladores de Pérdida de Circulación.....	40
3.4.9. Antiespumantes.....	41
3.4.10. Agentes Flexibles.....	41
3.4.11. Trazadores Radioactivos.....	41
3.4.12. Inhibidores de Contaminación del Cemento.....	41
3.5. CEMENTACIÓN PRIMARIA.....	43
3.5.1. Objetivos de las cementaciones primarias.....	43
3.6. CEMENTACIÓN REMEDIAL (SQUEEZE O SECUNDARIA).....	45
3.6.1. Objetivos de la Cementación Remedial.....	46
3.6.2. Características de la cementación remedial.....	47
3.6.2.1. Técnica de cementación remedial.....	47

3.6.3. Aplicabilidad de la Cementación Remedial.....	47
3.6.4. Tipos de Cementación Remedial.....	48
3.6.4.1. Reparación de huecos en el pozo .....	48
3.6.4.2. Reparación de la Cementación Primaria .....	48
3.6.4.3. Reparación de la formación.....	48
3.6.5. Técnicas de reparación .....	49
3.6.5.1. Colocación.....	50
3.6.5.2. Bombeo .....	53
3.6.6. Casos frecuentes donde se aplica cementación remedial.....	55
3.6.6.1. Reparación de fuga en “Casing”.....	55
3.6.6.2. Preparación o sello de canales indeseables en el cemento detrás del “Casing” .....	56
3.6.6.3. Aislamiento de la producción de agua y/o gas .....	57
3.6.6.4. Aislamiento de producción de agua en una misma zona .....	57
3.6.7. Operaciones de cementación remedial .....	58
 <b>CAPITULO IV - CEMENTACION DE TECNOLOGIAS CemNET, DensCRETE, LiteCRETE, ULTRALiteCRETE</b>	
4.1. CEMENTACIÓN TECNOLOGÍA .....	60
4.2. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	60
4.2.1. CemNET .....	61
4.2.2. DensCRETE.....	62
4.2.3. LiteCRETE .....	64
4.2.4. ULTRALiteCRETE.....	65

## **CAPITULO V - FORMULACION DE LA LECHADA REMEDIAL CON LAS TECNOLOGIAS**

5.1. PREPARACIÓN DE LECHADA .....	68
5.1.1. Calculo del volumen de la lechada y el rendimiento .....	68
5.1.2. Determinación del contenido de agua en la lechada. ....	69
5.1.3. Determinación de la densidad .....	70
5.1.4. Pruebas de permeabilidad .....	70
5.1.5. Determinación de las propiedades reologicas .....	70
5.1.5.1. Viscosidad .....	72
5.1.5.2. Viscosidad y contenido de agua de la lechada .....	73
5.1.6. Estructura del diseño de cementación remedial .....	73
5.1.6.1. Tiempo de bombeo .....	75
5.1.6.2. Determinación del tiempo de bombeabilidad .....	80

## **CAPITULO VI - CALCULO Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA LA CEMENTACION REMEDIAL TRAMO LINER DE 7"**

6.1. SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA DEL POZO SABALO X-7 .....	82
6.1.1. Formaciones No Consolidadas .....	83
6.1.2. Formaciones Reactivas .....	83
6.1.3. Corte de Sección Estructural .....	84
6.1.4 Geología del Tramo Liner 7" .....	85
6.1.4.1 Iquiri / Los Monos .....	85
6.1.4.2 Huamampampa .....	86
6.1.5. Configuración Final del Pozo .....	86
6.2. CÁLCULO Y FORMULACIÓN DE LECHADA DE CEMENTO .....	91
6.2.1. Balance de materia para formulación de lechada. ....	91

6.2.2. Balance de materia lechada de cemento de fibras CemNET .....	96
6.2.3. Balance de materia lechada de cemento DensCRETE .....	99
6.2.4. Balance de materia lechada de cemento LiteCRETE .....	101
6.2.5. Balance de materia lechada de cemento UltraLiteCRETE .....	103
6.3. ESTRUCTURA FINAL DE LA CEMENTACIÓN REMEDIAL .....	107
6.3.1. Calculo de la geometría del pozo direccional Sabalo X7 .....	107
6.3.2. Procedimiento a realizar en la cementación remedial .....	109
6.3.3. Volumen de lechada .....	111
6.3.4. Volumen de desplazamiento .....	113
6.3.5. Tiempo de bombeo .....	113
6.3.6. Calculo de las caídas de presión .....	115
6.3.6.1. Calculo de la caída de presión para bache lavador .....	115
6.3.6.2. Calculo de la caída de presión para bache espaciador .....	118
6.3.6.3. Calculo de la caída de presión para lechada principal .....	121
6.3.7. Tiempo de bombeabilidad .....	124
6.3.8. Estado de los niveles de fluidos .....	125
6.3.9. Principales Riesgos y Plan de Contingencias .....	128
6.3.9.1. Contingencias Respecto al Funcionamiento de Equipos y Manejo de Químicos antes/durante y después del Trabajo de Cementación .....	133
6.4. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA CEMENTACIÓN DEL POZO .....	133

## **CAPITULO VII - EVALUACION TECNICA Y ECONOMICA**

7.1. EVALUACIÓN TÉCNICA .....	136
7.1.1. Evaluación técnica por tecnologías .....	137
7.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	141
7.3. Comparación y evaluación económica de la cementación .....	151

## **CAPITULO VIII - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

8.1. CONCLUSIONES.....	157
8.2. RECOMENDACIONES .....	158
BIBLIOGRAFIA .....	159

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: Ubicación del Campo Sábalo.....	7
FIGURA 1.2: Comparación de la Resistencia a la Compresión y de la Permeabilidad de Cementos Fraguados Energizados e LiteCRETE .....	9
FIGURA 1.3: Red Fibrosa .....	11
FIGURA 2.1: Ubicación de los pozos Área San Antonio .....	14
FIGURA 2.2: Columna Estratigráfica, SBL-7.....	23
FIGURA 3.1: Efecto del cloruro de calcio sobre el tiempo de bombeabilidad .....	30
FIGURA 3.2: Efecto del cloruro de sodio sobre el tiempo de bombeabilidad .....	31
FIGURA 3.3: Efecto de lignosulfatos sobre el tiempo de bombeabilidad .....	32
FIGURA 3.4: Resistencia de la bentonita a la compresión.....	34
FIGURA 3.5: Efecto de los dispersantes sobre la reología de lechadas .....	39
FIGURA 3.6 :Comportamiento en la etapa de dispersión .....	39
FIGURA 3.7: Cementación Primaria. ....	44
FIGURA 3.8: Representación de una cementación remedial.....	46
FIGURA 3.9:Esquema de las Técnicas de Cementación Remedial.....	49
FIGURA 3.10: Permeabilidad de Revoque y Rata de Deshidratación de la Lechada .....	51
FIGURA 3.11: Esfuerzos locales y propagación de la fractura .....	52
FIGURA 3.12: Fractura Vertical Generada por Cementación Forzada .....	53
FIGURA 3.13: Bombeo Continuo .....	54
FIGURA 3.14: Variación de Presión con Respecto al Tiempo Durante una Cementación Forzada Mediante Bombeo Intermitente. ....	55
FIGURA 3.15: Reparación de una Fuga de "Casing".....	56

FIGURA 3.16: Detección del Tipo de Problema según Intervalos a Reparar .....	57
FIGURA 4.1: Arreglo de partículas CemCRETE .....	60
FIGURA 4.2: Arreglo de partículas CemCRETE .....	62
FIGURA 4.3: Fuerza de Compresión por el Sistema Uca .....	63
FIGURA 4.4: Cuadro de densidades LiteCRETE .....	64
FIGURA 5.1: Modelos Reológicos .....	71
FIGURA 5.2: Velocidad de corte y esfuerzo de corte .....	73
FIGURA 6.1: Corte de Sección Estructural .....	84
FIGURA 6.2: Configuración Final del Pozo .....	88
FIGURA 6.3: Registro Caliper y Gamma Ray del Liner 7" Ramal Superior .....	89
FIGURA 6.4: Sección Vertical del Pozo SBL-X7 .....	90
FIGURA 6.5: Pozo direccional ramal superior 7" SBL-X7 .....	108
FIGURA 6.6: Estructura Cementación Remedial .....	110
FIGURA 6.7: Estructura Cementación Remedial .....	126
FIGURA 7.1: Costos de Cementación Remedial Fibras CemNET .....	143
FIGURA 7.2: Costos de Cementación Remedial DensCRETE .....	145
FIGURA 7.3: Costos de Cementación Remedial LiteCRETE .....	147
FIGURA 7.4: Costos de Cementación Remedial UltraLITECRETE .....	149
FIGURA 7.5: Resumen General de Costos .....	150
FIGURA 7.6: Diferencia de Costos de Lechadas de Cemento .....	151
FIGURA 7.7: Costos de la cementación convencional y propuesta (DensCRETE) ..	155

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1: Coordenadas Geográficas .....	6
TABLA 2.1: Datos Generales del Pozo .....	15
TABLA 2.2: Descripción petrofísica, Huamampampa, Icla y Santa Rosa. ....	21
TABLA 3.1: Clasificación API de los cementos. ....	26
TABLA 3.2: Requerimiento de los densificantes .....	38
TABLA 3.3: Efecto de los aditivos comunes sobre las propiedades de las lechadas.....	42
TABLA 6.1: Secuencia Estratigráfica Del Pozo Piloto Ramal Inferior.....	82
TABLA 6.2: Secuencia Estratigráfica Del Ramal Superior Del Pozo.....	83
TABLA 6.3: Aditivos Aplicados Para Formulación de Lechadas de Cemento Fibras CemNET .....	91
TABLA 6.4: Aditivos Aplicados para Formulación de Lechadas de Cemento LiteCRETE. ....	92
TABLA 6.5: Aditivos Aplicados para Formulación de Lechadas de Cemento DensCRETE.....	93
TABLA 6.6: Aditivos Aplicados para Formulación de Lechadas de Cemento UltraLIRETE .....	94
TABLA 6.7: Propiedades Requeridas de Aditivos (Fibras CemNET).....	96
TABLA 6.8: Balance de Materia Cemento de Fibras CemNET .....	97
TABLA 6.9: Propiedades Requeridas de Aditivos (DensCRETE) .....	99
TABLA 6.10: Balance de Materia Cemento DensCRETE .....	99
TABLA 6.11: Propiedades Requeridas de Aditivos (LiteCRETE).....	101
TABLA 6.12: Balance de Materia Cemento LiteCRETE.....	101
TABLA 6.13: Propiedades Requeridas de Aditivos (UltraLiteCRETE) .....	103

TABLA 6.14: Balance de Materia Cemento UltraLiteCRETE .....	104
TABLA 6.15: Tabla de Resultados de Balance de Materia .....	106
TABLA 6.16: Datos del Pozo SBL-7.....	108
TABLA 6.17: Datos Requeridos y (Drill Pipe) Bajados para Cementación Remedial.....	109
TABLA 6.18: Resultados de la Estructura de Cementación Remedial.....	110
TABLA 6.19: Secciones Interiores y Espacio Anular de la Estructura de Cementación .....	111
TABLA 6.20: Calculo de Masa de Aditivos para un Volumen de Lechada .....	112
TABLA 6.21: Resumen Secuencia de Bombeo.....	115
TABLA 6.22 :Propiedades de los Fluidos a Bombear .....	115
TABLA 6.23: Tabla de Cálculos Efectuados para caída de Presión .....	123
TABLA 6.24: Programa Final de Cementación Remedial SBL-X7 .....	127
TABLA 6.25: Análisis de Riesgos.....	129
TABLA 7.1: Resultados formulación de lechada propuesta DensCRETE.....	137
TABLA 7.2: Sacos para Cemento Fibras CemNET .....	138
TABLA 7.3: Sacos para Cemento DensCRETE.....	138
TABLA 7.4: Sacos para Cemento LiteCRETE .....	139
TABLA 7.5: Sacos para Cemento UltraliteCRETE .....	139
TABLA 7.6: Tabla de Estructura de Cementación Remedial.....	140
TABLA 7.7: Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento de Fibras CemNET .....	142
TABLA 7.8: Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento DensCRETE.....	144
TABLA 7.9: Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento LiteCRETE .....	146

TABLA 7.10: Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento	
UltraLITECRETE .....	148
TABLA 7.11: Diferencia de Costos de Lechadas de Cemento .....	150
TABLA 7.12: Control de costos .....	152
TABLA 7.13: Control de costos .....	153
TABLA 7.14: Control de costos .....	154
TABLA 7.15: Costos de la cementación convencional y propuesta (DensCRETE) ..	155

## SIMBOLOGIA

- **API:** (American Petroleum Institute), Instituto Americano de Petróleo.
- **BC:** (Bearden Units Of Consistency), Unidad de Consistencia Bearden.
- **BES:** Bombeo Electro Sumergible.
- **BH:** Bombeo Hidráulico.
- **BHA:** Bottom Hole Assembly: Ensamblaje de Fondo de Pozo.
- **BHCT:** (Bottom Hole Circulating Temperature). Temperatura Circulante de Fondo.
- **BVOB:**(By volumen of blend), por el volumen de la mezcla.
- **BOB:** Cilindro de acero ajustado al viscosímetro de FANN para determinar la reología.
- **CASING:** Tubería de Revestimiento.
- **CBL:** (Cement Bond Log). Registro de Adherencia del Cemento.
- **D:** Diámetro del agujero (in).
- **DC:** (Drill Collar). Porta barrena o Collar de Perforación.
- **Drill Pipe:** Tubería sin costura que se utiliza para dar rotación a la barrena y circular fluido de perforación, con una longitud de 31 pies que se conecta mediante juntas (generalmente caja- pin)
- **EDC:** (Equivalent Density Circulating).Densidad equivalente de circulación (lb/ft<sup>3</sup>).
- **FF:** Factor de flotación (adimensional).
- **FLOAT COLLAR:** Collar flotador, parte del equipo de flotación para cementación.
- **Fluido de Perforación:** Medio circulante, una de sus funciones es llevar el ripio (recortes) pozo arriba hasta la superficie. Aunque el fluido de perforación más común es una mezcla de arcilla, agua y varios aditivos químicos, también es posible usar aire y aceite.
- **Ft:** (pies) Unidad de medida
- **h:** Distancia entre cople y zapata (ft).

- **H:** Profundidad (ft).
- **ID:** (Inside Diameter). Diámetro Interno.
- **KOP:** (Kick - Off Point). Punto de Desvío. Punto inicial de desviación, el cual se comienza una curva de la trayectoria programada, donde la inclinación del pozo se aumenta intencionalmente.
- **°F:** Fahrenheit (Unidad de medida de Temperatura).
- **OVERLAP:** Superposición o exceso de cemento que se tiene en el pozo.
- **P:** Presión superficial (Psi).
- **PACKER:** conjunto de herramientas o herramienta que va en el interior de un pozo para asegurar el liner a la tubería anterior o para asegurar herramientas para el control de un pozo petrolero.
- **Profundidad Medida:** Es la distancia medida a lo largo del pozo desde el punto de referencia de la superficie, hasta la profundidad de interés o hasta el punto donde se encuentra el objetivo.
- **PSI:** Unidad de medida de presión.
- **Ppg:** sigla en ingles, Pound Per Galon. Libras por galón.
- **VP:** Viscosidad Plástica, Es la sigla que determina la viscosidad del cemento. .
- **ROP:** (Rate of Penetration). Tasa de Penetración o Velocidad de Perforación.
- **RPM:** (Revolutions per Minute). Revoluciones por Minuto.
- **SG:**(Specific gravity), gravedad específica.
- **Sx:** (siglas en ingles) sacos de cemento.
- **t:** Tiempo de desplazamiento (min).
- **TIXOTROPÍA:**Un fluido tixotrópico es un fluido que tarda un tiempo finito en alcanzar una viscosidad de equilibrio cuando hay un cambio instantáneo en el ritmo de tensión de corte, muestra una disminución de la viscosidad a lo largo del tiempo a una velocidad de corte constante.
- **TVD:** (True Vertical Depth). Profundidad Vertical Verdadera. Es la profundidad real del pozo proyectado en el plano vertical.

- **UCA:** (Ultrasonic cement analyzer). Analizador de cemento ultrasónico.
- **VDL:** (Variable Density Log). Registro de densidad variable.
- **YP:** (Yield Point). Punto de cedencia.
- **R.H. =RAT HOLE=** Hoyo de pozo
- **O.H.= OPEN HOULT=** Agujero abierto

# CAPITULO I

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCION

La cementación primaria es el proceso por el cual se inyecta una lechada de cementación en un pozo, con el fin de lograr sustentar la estructura del pozo, además de proporcionar aislamiento zonal durante toda la vida productiva de pozo. Las operaciones de producción e inyección desgastan severamente la integridad del cemento y en ciertos casos el pozo puede perderse por completo.

Una cementación primaria inadecuada deficiente o secundaria es causada por diferentes factores, como formaciones fracturadas que producen pérdidas de lechada, una mala centralización del revestidor, el mal diseño de la lechada de cemento o problemas durante las operaciones por paro de equipos; ponen en peligro al pozo además cuestan a la industria cientos de millones de dólares en términos de reparación.

Para remediar estos trabajos de cementación que ocasionan un bajo sello hidráulico con migración de los fluidos reduciendo la vida útil y bajo soporte de la tubería de revestimiento, se seleccionan diversas técnicas y nuevas tecnologías en formulación de lechadas para aliviar diversos problemas que se presentan durante la cementación; empleando la cementación remedial como un proceso que consiste en inyectar cemento mediante la aplicación de presión hidráulica a través de disparos o ranuras en la tubería de revestimiento al espacio anular. Es una medida correctiva a una cementación primaria defectuosa. Este tiene por objeto, alcanzar un sello óptimo entre la tubería de revestimiento y la formación.

Las diferentes tecnologías (FIBRA CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraLiteCRETE) en lechadas de cementación ayudan a reducir riesgos en la cementación durante y después del fraguado en la lechada de cemento, diseñada con dimensiones óptimas en la localización del pozo y se pueden combinar con las porciones de lechada que serán colocadas en las potenciales

zonas de pérdida de circulación, con la ventaja principal de dispersarse fácilmente en la lechada de cemento.

## **1.2. ANTECEDENTES**

En la década de 1990, Schlumberger introdujo diferentes tecnologías de cementos que empleaban fibras de vidrio para prevenir pérdidas de circulación. A medida que una lechada de cemento fluye dentro de una zona de pérdida de circulación durante una operación de cementación primaria las fibras forman una red a modo de puente y limitan la pérdida de lechada del espacio anular a la formación.

En un pozo del condado de Robert, Texas, Brighton Energy LLC, se descubre pérdidas de circulación en la formación Brown Dolomite por lo que interrumpe volúmenes macizos de cemento como tratamiento, solicita asistencia de Schlumberger colocando taponos CemNET la severidad de las pérdidas ocasiona la ruptura del mismo y durante actividades de perforación colocan otro tapón de fibras CemNET que sella la zona con éxito ahorrando aproximadamente 26.000 dólares por día.

El pozo SBL – X7 presenta en el ramal superior una cementación primaria y una cementación correctiva mala, las que no controlaron el aporte de hidrocarburos en la formación Huamampampa.

## **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.3.1. Identificación del Problema**

La mala cementación del liner de 7" del ramal superior en el pozo SBL-X7 pudo ser debido a la formación huamampampa que presenta micro fracturas naturales que genera una migración de gas, ocasionando problemas de canalización de la lechada de cemento; de igual manera, por problemas relacionados a los equipos y operaciones inadecuadas durante el proceso, una mala formulación en volúmenes y proporciones de aditivos utilizados en la lechada de cemento con

inadecuada densidad ocasionando una mala adherencia del cemento al revestidor permitiendo el desplazamiento o aporte de gas-condensado y fluidos invasivos hacia la misma; que resultó en un deficiente aislamiento zonal.

Para mejorar la cementación primaria y correctiva del pozo, se realiza una cementación remedial, la cual consiste en un procedimiento costoso a fin de lograr reparar los daños asegurando un buen aislamiento zonal.

Siendo crucial para el logro de operaciones seguras y rentables, y que, desde el punto de vista económico, el tipo de lechada empleada (aditivos y cemento) representa una buena parte de los costos de cementación, y considerando también los costos de equipos y personal, con un adecuado trabajo de cementación remedial se evitaría a futuro, un incremento en los costos por trabajos adicionales correctivos.

### **1.3.2. Formulación del Problema**

La falta de efectividad de la cementación correctiva al nivel de la formación Huamampampa, ocasiona un inadecuado aislamiento zonal generando un incremento en costos en términos de reparación en el tramo Liner de 7”.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General**

Proponer la cementación remedial para un efectivo aislamiento zonal mediante las diferentes tecnologías las lechadas; Fibra CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraliteCRETE para el tramo liner de 7” en el pozo SBL-X7 que coadyuven a la reducción de costos.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Realizar un diagnóstico geológico estratigráfico del pozo SBL-X7 del campo Sábalo.

- ✓ Analizar el estado de la cementación primaria del pozo, para la adecuada formulación de la lechada de cementación remedial.
- ✓ Elaborar los cálculos para la formulación experimental de lechada de cemento Fibras CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraLiteCRETE para el tramo liner de 7”.
- ✓ Seleccionar la Tecnología adecuada para la cementación remedial en el tramo liner de 7” del pozo SBL-X7
- ✓ Evaluar técnica y económica del proyecto.

## **1.5. JUSTIFICACION**

### **1.5.1. Justificación Técnica**

La adecuada selección de una lechada de cemento para la cementación remedial en el pozo SBL-X7 del campo SABALO en el tramo Liner de 7” perteneciente al ramal superior coadyuvara a un adecuado aislamiento zonal evitando la migración de gas condensado siendo una solución a los problemas que presenta el pozo, considerando por ejemplo la lechada de cementación de Fibras CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraLiteCRETE, la que forma una red fibrosa, genera un revoque de filtración y la lechada circula en forma ascendente por el espacio anular para proveer el aislamiento por zonas y evitar perdida de fluidos adicionales. (Oilfield Review, 2004)

Se prevendrá problemas en operaciones de cementación durante y después del fraguado de la lechada de cemento reduciendo costos en los trabajos de corrección. El presente proyecto abarcará el área de cementación, haciendo énfasis en la etapa de cementación remedial.

### **1.5.2. Justificación Económica**

La optima selección y diseño de tratamientos de pérdida de circulación aplicado en el ramal superior en el pozo SBL-X7 ayuda reducir costos de maquinaria alquilada para la operación, personal requerido, estimación de volumen de

lechada requerido para la operación; es por ello que al implementar esta técnica de cementación remedial con la ejecución de los trabajos correctos coadyuvan al éxito del tratamiento con una adecuada tecnología que proporcione una cobertura de cemento confiable en zonas críticas, para la obturación de micro-fracturas por su fácil manipulación reduciendo costos de desecho asociado por la reducción de retornos de cemento, ahorrando y eliminando los costos excesivos de cemento y las operaciones futuras de cementación correctiva.

### **1.5.3. Justificación Ambiental**

Es de gran importancia la gestión ambiental dentro la industria del petróleo, por lo que se debe contar con una licencia ambiental, establecido de acuerdo al artículo 26 de la ley 1333.

Además de cumplir con las normas ISO 14001:2004 del sistema de gestión ambiental, que especifica los requisitos que el sistema de gestión ambiental que se debe reunir, y está dirigida para cualquier tipo o tamaño de organización.

OHSAS (Occupational Health and Safety Assessment Series) 18001 que establece los requisitos mínimos de las mejores prácticas de gestión de seguridad y salud en el trabajo, destinados a permitir que una organización controle sus riesgos.

## **1.6. ALCANCE**

El alcance del proyecto es el de realizar el mejoramiento de la cementación y la optimización y uso de diferentes tecnologías de cementación adecuados para el pozo SBL X7, y realizar un plan de cementación que nos permita ahorrar tiempo y dinero en futuras perforaciones del campo.

### **1.6.1. Alcance Temático**

El proyecto se encuentra dentro del área de perforación, producción y el mismo pretende realizar una óptima producción de gas en el pozo SBL-X7 con la aplicación, optimización y la utilización de diferentes tecnologías de cementación.

Lograr que la alternativa adecuada en términos técnicos, puedan desarrollarse mediante el plan para afrontar la etapa de evaluación económica.

### 1.6.2. Alcance Geografico

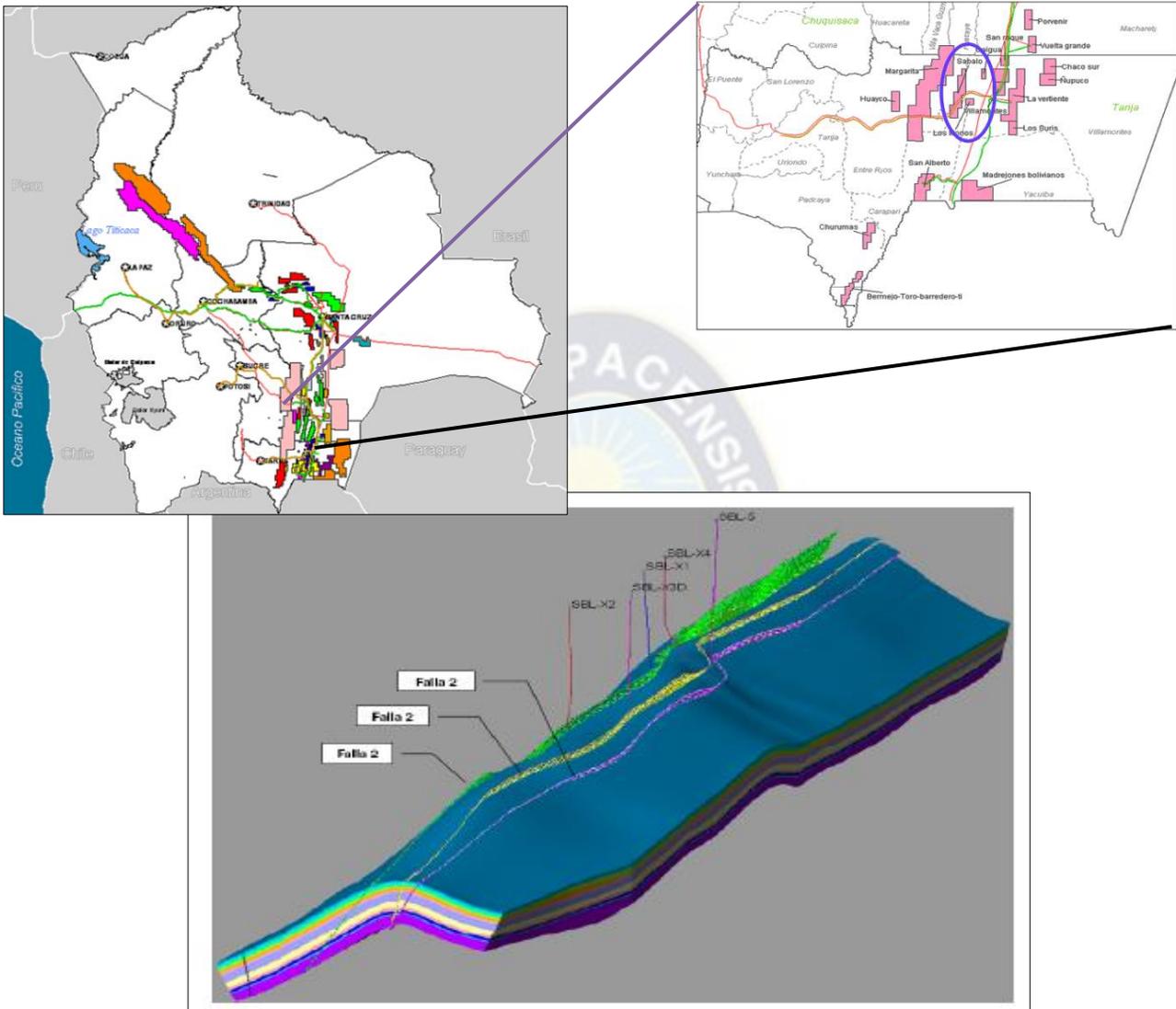
El Pozo Sábalo SBL – 7 está ubicada dentro de las coordenadas geográficas siguientes:

**TABLA 1.1 Coordenadas Geográficas**

Pozo	Sábalo No 7 (SBL – 7)						
Bloque	San Antonio						
Sociedad	<table> <tr> <td>Petrobras Bolivia S.A.</td> <td>35%</td> </tr> <tr> <td>YPFB Andina</td> <td>50%</td> </tr> <tr> <td>TOTALFINAELF</td> <td>15%</td> </tr> </table>	Petrobras Bolivia S.A.	35%	YPFB Andina	50%	TOTALFINAELF	15%
Petrobras Bolivia S.A.	35%						
YPFB Andina	50%						
TOTALFINAELF	15%						
Cuenca	Subandino Sur						
Estructura	Anticlinal de San Antonio						
Campo	Sábalo						
Ubicación geológica	Flanco occidental de la estructura, próxima a zona de culminación planchada en rocas de Fm Tarija Chorro						
Coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator). PSAD56	<table> <tr> <td>X= 430.510,40 m</td> </tr> <tr> <td>Y= 7.637.454,99 m</td> </tr> <tr> <td>Zt= 1.074,00 msnm</td> </tr> <tr> <td>Zr= 1.082,59 msnm</td> </tr> </table>	X= 430.510,40 m	Y= 7.637.454,99 m	Zt= 1.074,00 msnm	Zr= 1.082,59 msnm		
X= 430.510,40 m							
Y= 7.637.454,99 m							
Zt= 1.074,00 msnm							
Zr= 1.082,59 msnm							
Latitud	21° 21'48.25" S						
Longitud	63° 40'12.81" W						

**FUENTE: Informe Pozo SBL – 7**

**FIGURA 1.1 Ubicación del Campo Sábalo**



**FUENTE: Maps Google Earth e Informe Megacampos en Bolivia**

## **1.7. CARACTERÍSTICAS DE LA CEMENTACIÓN REMEDIAL**

### **1.7.1. Técnica de cementación remedial**

La clasificación según la presión de bombeo, en donde normalmente la inyección de la lechada es desarrollada a través de las perforaciones del revestimiento. Existen dos clasificaciones la cementación remedial a baja presión donde la presión de tratamiento de fondo es mantenida por debajo de la presión de

fractura de la formación, y la cementación remedial a alta presión en el que la presión de tratamiento de fondo excede la presión de fractura de la formación.

### **1.7.2. Herramientas usadas en cementación remedial**

La principal función de estas herramientas en el subsuelo para las operaciones de cementación remedial es la de colocar la lechada de cemento de una manera eficiente.

Las herramientas usadas en los trabajos correctivos, son utilizadas en el interior del pozo para lograr la colocación selectiva de la lechada de cemento durante la realización de una cementación remedial “squeeze”; estas se utilizan generalmente para aislar áreas de revestimiento y que son colocadas mecánica o hidráulicamente en diseños retirables y perforables.

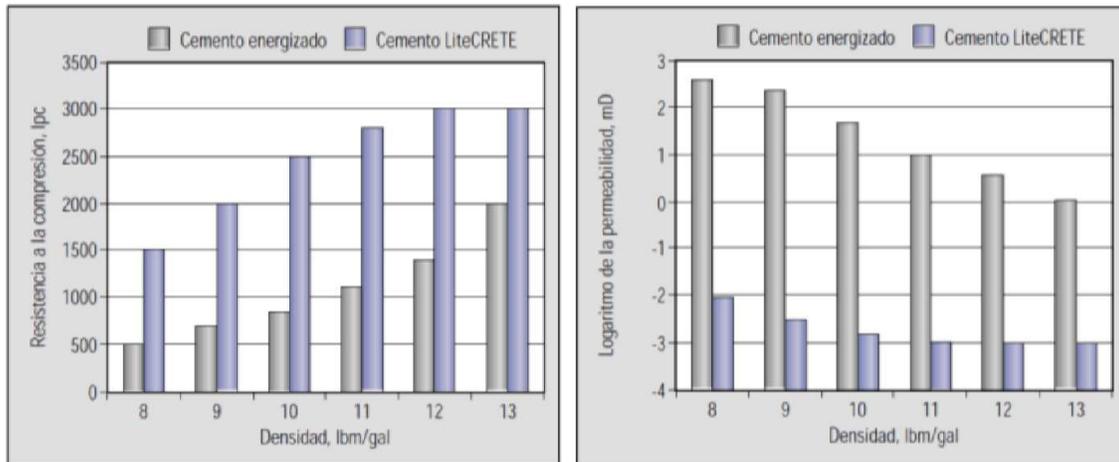
## **1.8. TECNOLOGÍAS SCHLUMBERGER**

Las lechadas CemCRETE, de Schlumberger aditivos y las lechadas de control de migración de gas proporcionan las propiedades necesarias para establecer un buen control del pozo y mitigar problemas de flujos someros de gas, logrando un buen aislamiento zonal y asegurar la integridad del pozo cuidando siempre los aspectos ambientales.

### **1.8.1. LiteCRETE**

La tecnología mejorada LiteCRETE proporciona propiedades físicas comparables a la de una lechada cuya densidad es similar a la de agua, como cementación ligera de alta eficiencia mejora el aislamiento de las formaciones, protegen la tubería de revestimiento de la corrosión; no exceden el bajo gradiente de fractura de la formación, los tapones LiteCRETE son suficientemente fuertes para emplearse como tapones de desviación y cucharas deflectoras; la permeabilidad del cemento fraguado es menor que la de cemento Portland convencional clase G; y la resistencia a la compresión es comparable con la del cemento Portland.

**FIGURA 1.2. Comparación de la resistencia a la compresión y de la Permeabilidad de Cementos Fraguados Energizados y LiteCRETE**



**FUENTE: Paper Oilfield Review Schlumberger; 2001**

Eficaces a temperaturas que varían de 80 a 450 °F (27 a 232 °C); con presión de fondo de pozo de hasta 8000 lpc (55.15 MPa) y las lechadas cuyas densidades varían de 8.2 a 12.5 lbm/gal (0.98 a 1.50 g/cm<sup>3</sup>).

A pesar de sus bajas densidades, estas nuevas lechadas ultraligeras contienen 60% de sólidos y 40% de agua cuando son bombeadas. Una vez fraguados, los cementos ultraligeros LiteCRETE logran la baja permeabilidad y alta resistencia a la compresión.

### 1.8.2. Fibras CemNET

Una novedosa fibra avanzada puede mezclarse con la lechada de cemento formando una red de obturación de alto desempeño en las zonas de pérdidas de circulación. Las fibras del cemento con fibras avanzadas CemNET, desempeñadas con dimensiones optimas en general menos de 12 mm (0.5 pulgadas) de largo y 20 micrones de diámetro son químicamente inertes y resultan compatibles con la mayoría de los sistemas y aditivos de cementación a temperaturas de hasta 232 °C (450 °F). Estas fibras pueden agregarse en la localización del pozo y se pueden combinar con la proporciones de lechada que

serán colocadas en las potenciales zonas de pérdida de circulación. (Daccord G y Bedel, 2003)<sup>1</sup>

Las ventajas principales de las fibras CemNET es su capacidad para dispersarse fácilmente en la lechada de cementación. A diferencia de las fibras convencionales, las fibras cemNET están recubiertas con un surfactante que mantienen las fibras unidas cuando están secas pero que además las ayudan a dispersarse y mezclarse sin dificultad cuando se incorporan a la lechada. Si se agregan en concentraciones óptimas, pero no alteran las propiedades críticas de la lechada o del cemento, tales como tiempo de densificación, propiedades reológicas, pérdida de fluido, contenido de agua libre, resistencia a la tracción, resistencia a la cizalladura y resistencia a la compresión.

Mediante la incorporación de las fibras de avanzada, los operadores pueden evitar problemas tales como topes de cementos bajos, la necesidad de implementar operaciones de cementación remedial, así como pérdidas de cemento y fallas de pozo más serias. Cuando la acción de obturación de las fibras en la lechada de cementación sella las zonas de pérdida de circulación, se pierde menos lechada durante las operaciones de bombeo

Experimentos de laboratorio han demostrado la eficacia de las lechadas cargadas de fibras en el taponamiento de zonas de pérdidas de circulación, incluyendo fracturas simuladas y formaciones de alta permeabilidad.

En la (figura 1.3) se muestra pruebas de lechada fibras en laboratorio, en donde se modifica una celda de pérdida de fluido API para verificar las lechadas de fibras CemNET (extremo superior) a tope de la celda de prueba actúa como un pistón;

la placa del fondo simula una zona de pérdida. Los orificios circulares de las placas, con un diámetro de 1, 2,4 y 6 mm (0.04, 0.08, 0.16y 0.24 pulgadas), simulan zonas de alta permeabilidad; las placas ranuradas representan fractura

---

<sup>1</sup> Low N, Daccord G y Bedel JP: "Designing Fibered Cement Slurries for Lost Circulation Applications: Case Histories", articular de la SPE 84617, Denver, Colorado, EUA; 2003.

de 1 y 2 mm de ancho (centro). después de las pruebas, las placas con ranuras u orificios son taponados con las lechadas fibrosas (extremo inferior).

La optimización de la selección y el diseño de los tratamientos para perdidas de circulación normalmente ayudan a los operadores a reducir el volumen de lechada de cementación que bombean. La estimación exacta del volumen de lechada requerido para una operación implica menos volúmenes de cemento excedente, lo que a su vez reduce los costos de eliminación del cemento.

**FIGURA 1.3 Red Fibrosa**



**FUENTE: Schlumberger; “Nueva Tecnología de Cementación- Programa de Entrenamiento Acelerado para Supervisores de Pozo”**

## CAPITULO II

### CONCEPTOS GEOLOGICOS DEL CAMPO SABALO

#### 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO

Durante el primer período de la década de los 90 comienza el acercamiento entre los gobiernos de Bolivia y Brasil con la intención de desarrollar en conjunto las posibles reservas gasíferas del Sub andino sur boliviano. Con los antecedentes de la producción en pozos profundos de los reservorios Huamampampa, Icla y Santa Rosa en el Norte de la Argentina se comenzó a diagramar un cronograma de inversiones, estudio de factibilidades, posibles reservas. etc.

Durante el mismo período se comienzan los estudios de factibilidad para la construcción de un gasoducto a través del Pantanal Boliviano y Brasileño de modo de poder llevar el gas producido en el sur de Bolivia hasta el centro de consumo que sería en las afueras de San Pablo en el Brasil.

Las actividades en el Bloque San Antonio iniciaron a partir de 22 de abril de 1996. Como resultado del Contrato de Asociación Petrolífera, firmado por YPFB y PETROBRAS BOLIVIA S.A., que tuvo una posterior modificación (con la Ley No. 1689 del 30 de Abril de 1996), a un Contrato de Conversión al Régimen de Riesgo Compartido para la Exploración, Explotación y Comercialización de Hidrocarburos, efectivo a partir del 29 de julio de 1996, con lo cual ANDINA pasó a obtener un Interés Participado de cincuenta por ciento (50%).<sup>2</sup>

Con los resultados de la interpretación sísmica, se inició la perforación del pozo SBL X-1, con coordenadas UTM X = 433.192,53, Y = 7.648.521,38, el 28 de noviembre de 1998. Este pozo tuvo como objetivo la investigación de las areniscas fracturadas de las formaciones Huamampampa, Icla y Santa Rosa. Los resultados de la perforación y pruebas de formación realizadas mostraron la

---

<sup>2</sup> Petrobras UN-BOL/E&P/SAN: "Plan de desarrollo Campo Sabalo"; 2008

existencia de hidrocarburos en reservorios de las formaciones Huamampampa e Icla. La perforación no atravesó la Formación Santa Rosa. Las Areniscas Huamampampa 1, 2, fueron probadas a pozo abierto en el DST# 1 realizado en junio de 1999, dando como resultado una producción comercial. Así mismo se le ofrece a la compañía Total la entrada en la sociedad como parte de la misma y el 16 de noviembre de 1999 se concluye con la firma de un acuerdo para la operación del bloque, dicho acuerdo pasa a denominarse JOA (Joint Operating Agreement). La Declaratoria de Descubrimiento Comercial fue presentada a YPFB y aceptada con fecha de 5 de Abril de 2000.

El 14 de enero del año 2003 se realiza la inauguración de la Base de Soporte Logístico, llamada Vicet Ponce de Leon. En abril del 2003 se realiza la inauguración de las dos fases de la Planta de Gas de San Antonio (PGSAN).

Esta documentación tiene como objetivo principal la presentación a YPFB del Plan de Desarrollo del Campo Sábalo, según lo establecido en la Ley de Hidrocarburos N° 3058 y en el Contrato de Operaciones del campo, como Operadora de la asociación del bloque San Antonio y que tiene como asociadas las empresas ANDINA y TOTAL.

## **2.2. GENERALIDADES GEOLOGIAS DEL POZO SBL-X7**

### **2.2.1. Datos generales del Pozo**

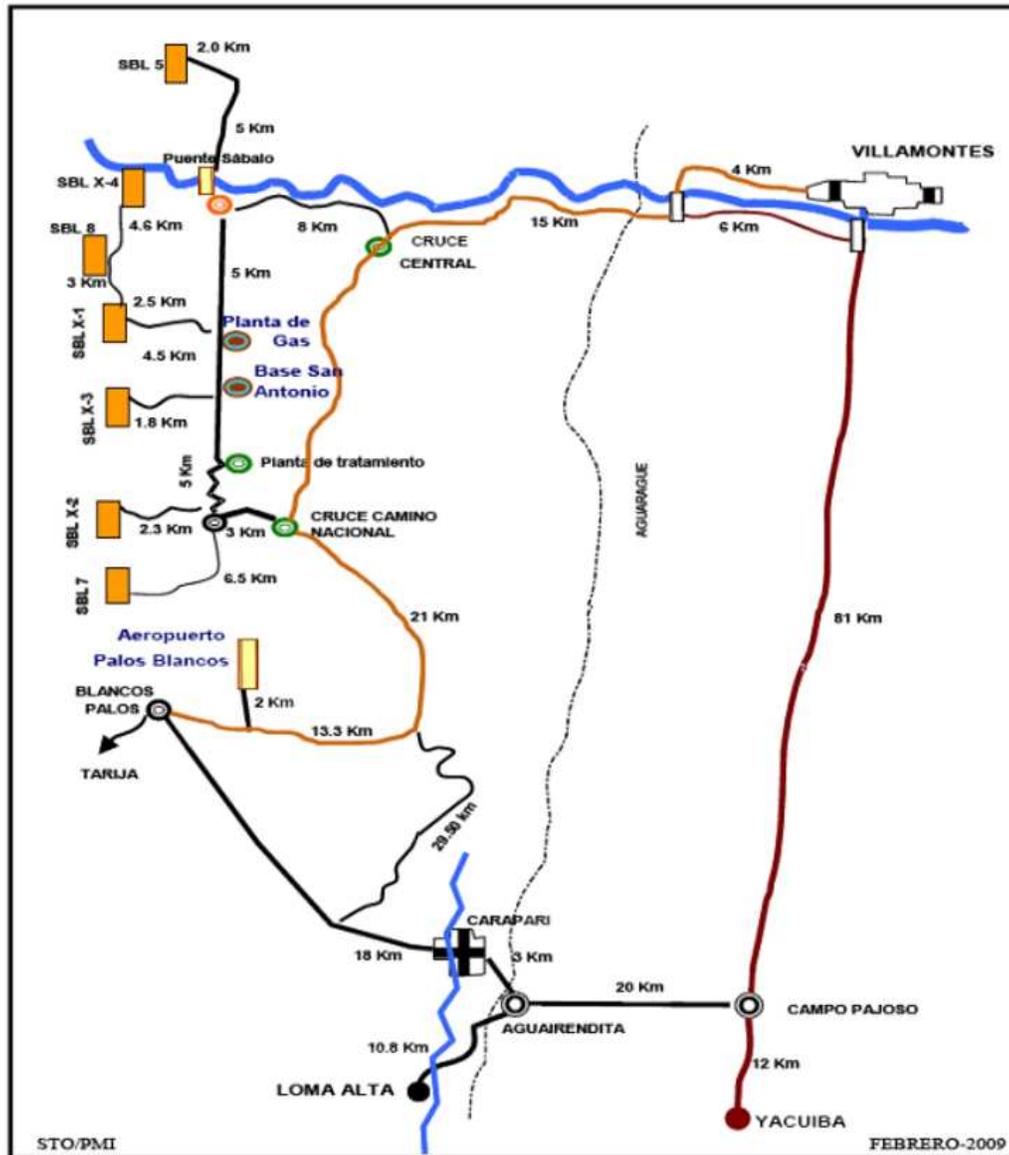
El bloque San Antonio se encuentra morfológicamente en el Sub Andino Sur y ubicado en la Provincia Gran Chaco del Departamento de Tarija, aproximadamente a 40 kilómetros al oeste de la ciudad de Villa Montes.

Está situado en el área tradicional de exploración y explotación de petróleo y gas, tiene una extensión original de 13,78 parcelas.

Regionalmente la serranía de San Antonio es parte de la faja plegada y fallada superficial de edad Cenozoica, la cual modeló sobre una cuenca Paleozoica, el

gran saliente topográfico Boliviano. La estructura del Campo de Sábalo es muy nueva, probablemente, no más antigua que 3-2 M.a. (Pioceno).

**FIGURA 2.1 Ubicación de los pozos Área San Antonio**



**Fuente: Informe Geológico, Campo SABALO – Petrobras 2009**

Varios eventos geológicos estuvieron presentes en el área. Desde el Cámbrico, la región Occidental del territorio Boliviano tuvo muchas fases de subsidencia y sedimentación.

El pozo Sabalo-7 está situado en el extremo sur del campo en la serranía de San Antonio a una altitud de 1,074m.

### 2.2.1.1. Pozo Piloto (SBL-7)

Es dirigido en dirección vertical en el Bloque Medio para las Fms. Humampampa e Icla (reservorios H0, H1, H2, H3, H4 e I2). Luego dirigido en dirección 15° en el Bloque Inferior para las Fms. Icla y Santa Rosa (reservorios I2 y SR1) hasta alcanzar un ángulo vertical máximo de 62°.

### 2.2.1.2. Pozo Rama Superior (SBL-7D)

Es dirigido en dirección horizontal 15° o 195° en el Bloque Medio para los reservorios H2, H3 y H4 de la formación Huamampampa, hasta alcanzar un ángulo vertical máximo de 90°. La dirección de 15° o 195° se definirá en función de la posición estructural en que se encuentre a la Fm. Huamampampa.

A continuación se precisan algunos datos generales del pozo:

**TABLA 2.1 Datos Generales del Pozo**

<b>POZO</b>	<b>Sabalo No 7 y 7D (SBL-7 Y SBL-7D)</b>	
Sociedad	Petrobras Bolivia S.A. (operador)	53%
	YPFB Andina	50%
	TOTALFINAELF	15%
Ubicación Sísmica	El pozo se ubica a 105 m al N 15°E del SP 1136 de la línea sísmica 36BR0121	
Coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator). PSAD 56	X=430.510,40 m	
	Y=7.637.454,99 m	
	Zt=1.074,00 msnm	
	Zr=1.082,59 msnm	
Latitud	21°21'48.25" S	
Longitud	63°40'12.81" W	

Prof. Programada (SBL-7)	5.148,00 m MD
	5.037,00 m TVD
	-3963,00 mss
Prof. Programada (SBL-7D)	4.629,00 m MD
	4.037,00 m TVD
	-2.963,00 mss
Prof. Final Alcanzada (SBL-7)	5.380,00 m MD
	5.147,40 m TVD
	-4.064,80 mss
Prof. Final Alcanzada (SBL-7D)	5.060,00 m MD
	4.377,26 m TVD
	-3963,00 mss

**Fuente: Elaboración propia en base a datos de Informe Final del pozo SBLX7.**

### **2.3. CONSIDERACIONES GEOLOGICAS DE LAS FORMACIONES DEL CAMPO SABALO.**

#### **2.3.1. Estratigrafía**

La secuencia estratigráfica investigada por las diferentes perforaciones en el campo Sabalo comprende sedimentos de las formaciones del Terciario al Silurico Superior y del Terciario al Devonico, cuenta con los siguientes niveles:

- Nivel estructural inferior: Comprende las unidades del Silurico y el Devonico Medio (formaciones Kirusillas, Tarabuco, Santa Rosa, Icla, Huamampampa y la seccion basal de la Formacion Los Monos). Esta limitada por niveles de despegue localizados en la Formacion Kirusillas y en la seccion basal de la Formacion Los Monos. El espesor general de este nivel estructural es de alrededor de 2500-3000 m.
- Nivel estructural intermedio: Está compuesto por la parte media de la Formacion Los Monos. Se encuentra limitado por niveles de despegue

ubicados cerca de la base y el techo de la Formación Los Monos. El espesor general de este nivel estructural es de alrededor de 600 a 800 m en las zonas no deformadas, y puede llegar a alcanzar los 3000 m de espesor en los núcleos anticlinales de algunas estructuras.

- Nivel estructural superior: Comprende todas las unidades desarrolladas por encima del nivel de despegue localizado en la sección superior de la Formación Los Monos. En los ejes sinclinales, el espesor de este nivel estructural puede superar los 7000 m de espesor.

Los Bloques Superior, Medio e Inferior fueron conocidos por el pozo SBL-X1, todos productivos de gas y condensado. Los pozos SBL-X2, SBL-X3 y SBL-X4 solamente perforaron el Bloque Medio, todos en actual producción. El pozo SBL-5 ubicado al Norte de los 4 anteriores investigó un bloque profundo no conocido aun en el Campo en el que se encontró presiones de formación superiores a las originales del Campo.

### **2.3.2. Descripción de los estratos**

#### **a) Formación Escarpment**

Esta formación representa el inicio del ciclo del grupo Mandiyuti, superponiéndose con discordancia tenue a los sedimentos del grupo Machareti. Alcanza un espesor máximo de 900 metros en la parte Sur de la cuenca. Litológicamente está constituida por unas sucesiones de bancos gruesos de areniscas café amarillentas a café rojizas, mal seleccionadas y pobremente estratigráficas. (YPFB)

A menudo se podría hallar también sendos cuerpos arcillosos y/o limolíticos de coloración rojiza que en determinados lugares de la cuenca, zonas Sudeste y Sur de Santa Cruz, llegan a constituir el mayor porcentaje de la formación.

Las concentraciones de epidoto, clorita, piroxeno y anatasa, son mayores que en la formación anterior. La turmalina, titanita, zircón y apatita y zoolita también

están presentes en concentraciones variables.

### **b) Formación Taiguati**

Se ha constituido como la unidad más fosífera del Sistema Carbonífero en el Subandino Sur del País.

El primer registro que se conoce, corresponde a Cathcart, Geólogo de la Standart Oil Co que en 1928 descubrió el primer yacimiento fosilífero de la formación Taiguati en lo que él denominó Quebrada N°4, y que hoy se conoce como el brazo central de la Quebrada Piempa, ubicada en la Serranía Charagua, 7Km al sur del Río Parapeti.

La Formación Taiguati empieza con “clay grits” rojizos intercalados con algunos niveles de limolitas también rojizas. La unidad fosífera tiene 24 m de espesor y se encuentra a 12 m de la base; se trata de unas arenas calcáreas rosáceas blanquecinas de granos medios, bien laminados y estratificados en niveles dosimétricos. Por encima se desarrolla una secuencia arenosa con algunos lentes conglomeraditos. Subrayando a esta última litología, se observa una intercalación de “clay grits” rojizos y areniscas blanquecinas amarillentas.

### **c) Formación Chorro**

Se tiene un espesor hasta de 500 m y representa la variación lateral de la formación Tarija. Está constituida por areniscas color café rojizo o rosado pálido de grano fino hasta medio. Los minerales pesados presentes son: turmalina, zicón, rutilo, magnetita, ilmenita y en poca cantidad diópsido.

Las areniscas de ésta formación, presentan en la estratificación laminar deformación de sedimentos no consolidados formando pliegues isoclinales y rebatidos en forma caprichosa. También muestran elementos de rellenos de canales, en pequeña escala. Por estas consideraciones su ambiente de depósito se considera subáctico con alguna influencia continental. (YPFB)

Esta formación carece de fósiles y palinomorfos y su edad está considerada, por su posición en secuencia, igual al Tarija (namuriana a westfaliana).

#### **d) Formación Tarija**

Esta unidad con un espesor máximo de 500m está desarrollada en los extremos Sur Norte de la cuenca, cambiando lateralmente a la Formación Chorro en la parte central. Está constituida esencialmente por diamictitas gris oscuras a gris verdosas. En las intercalaciones arenosas algunas veces se observa estratificación grabada con clastos grabando hacia las diamictitas superiores. (YPFB).

Por otra parte la existencia de lentes arenosos de buena selección, que en muchos campos son excelentes reservorios de petróleo, sugiere ligeros interesados de sedimentación de mayor energía cercana a la costa.

Esta formación se caracteriza por la presencia de trazas de minerales pesados predominando los opacos (magnetita, ilmenita).

La edad de esta formación es identificada como misisipiana alta pensilvanica baja (namuriana-westfaliana) sobre la base de un abundante contenido de palinomorfos (zona de Florinites).

#### **e) Formación Itacuami**

Lutitas, limolitas que pueden cambiar lateralmente a areniscas, color gris a rojo oscuro con un espesor de 130m.

#### **f) Formación Tupambi**

Esta formación, con un espesor que fluctúa entre 100 y 450 metros, suprayace al Devónico cuando falta la formación Itacua. En estos lugares la parte inferior está constituida por sedimentos continentales arenosos y conglomerádicos de alta energía que forman rellenos de valles.

Estas areniscas son de color lila blanquecino, de grano fino, buena selección y bien estratificadas. Análisis palinológicos asignan a esta formación edad misisipiana (viseana).

#### **g) Formación Itacua**

Bancos de areniscas, diamictitas y arcillitas con evidencias de re sedimentación, color gris oscuro a verdoso con niveles pelíticos, con un espesor de 200m.

#### **h) Formación Iquiri**

Se considera como Formación Iquiri, a la facies arenosa superior del Devónico de la Faja Subandina del Sur, que apoya en forma concordante sobre las sedimentitas de la Formación Los Monos y que se halla por su techo en contacto discordante con las sedimentitas del Carbónico. Litológicamente se halla constituida por paquetes de areniscas, gris claras y de tonos verdosos, de grano fino bien seleccionado, limpias, estratificadas en capas delgadas y gruesas, las que se encuentran interestratificadas con horizontes de lutitas gris oscuras. Algunos niveles arenosos de esta unidad son productores de petróleo en los campos de Camiri y Tatarenda. El espesor promedio de esta unidad es de 400 m.

#### **i) Formación Los Monos**

Esta serie consiste en esquistos micáceos carbonosos, deleznales, generalmente de colores oscuros, con capas delgadas de areniscas cuarcíticas en sus pisos superiores. Los esquistos siempre se hallan fuertemente contorsionados, dislocados y perturbados, algunas veces metamorfosados. Con tal motivo los fósiles que por sí se hallan raramente, muestran mala conservación. La potencia verdadera de los esquistos de Los Monos en el espacio Subandino es desconocida, pues su límite inferior no está expuesto. Los afloramientos del Devónico alcanzan su máxima extensión en el cañón del río Grande donde afloran 1200 m de esquistos micáceos y de areniscas. (Pero no se

sabe si los pisos inferiores pertenecen al mismo horizonte que en la quebrada de Los Monos o a series más antiguas). En el núcleo del anticlinal de Camiri, los esquistos de Los Monos fueron reconocidos en el cañón del río Parapetí en 400 m de espesor.

### j) Formación Huamanpampa

Areniscas agrupadas en tres potentes bancos con características textoestructurales diferentes a las de la Formación Pojo. Estas areniscas son de coloración gris clara a verdosa; de grano fino a muy fino, subredondeado y de regular a buena selección, presentando matriz arcillosa abundante y cemento silíceo. Son duras y compactas, por sectores poco micáceas y se presentan estratificadas en capas de 0.30 a 1.20 m de espesor, masivas y agrupadas en bancos potentes que alcanzan los 50 a 60 m de espesor limitados por cuellos pelíticos constituidos por lutitas y limolitas grises cuyos espesores varían entre 30 y 50 m. El pase formacional con las unidades litoestratigráficas supra e infrayacentes es claro y tajante. La palinología que caracteriza a esta formación está dada por la zonación de Emphanisporites.

**TABLA 2.2 Descripción petrofísica, Huamampampa, Icla y Santa Rosa.**

FM	DESCRIPCION LITOLOGICA	RESERVORIO	NET GROSS (m)	NET PLAY (m)	POROSIDAD (%)	SAT. AGUA (%)	VSH (%)	
HUAMAMPAMPA	Los reservorios de esta formación están constituidos por areniscas cuarzíticas, compactas muy duras de grano muy fino, escaso medio color gris blanquecino, en partes micáceas intercaladas con niveles de lutitas y limonitas, los niveles de arenisca presentan una porosidad y permeabilidad pobre, la misma que es incrementada en forma secundaria debido a la	H1	de 22 a 100	de 2.8 a 17.7	4.64	39.00	0.20	
		H2A	120 a 185	84 a 127	4.30	0.21	0.13	
		H2B						
		H3		de 53 a 68	4.00	0.22		
		H4						

	microfracturación, que presentan en las crestas de los anticlinales.						
<b>ICLA</b>	Secuencia pelítica, constituida por limolitas y lutitas gris oscuras a claras. Intercalan bancos de areniscas gris claras a gris oliva muy duras, micromicáceas, porosidad pobre.	I2	125 a 160	de 62 a 82		0.27	15.5 a 26
<b>SANTA ROSA</b>	Esta unidad presenta preponderantemente arenosa con delgadas intercalaciones de limolitas, lutitas de colores marrón grisáceo, gris verdoso y gris oscuro, micáceas. Las areniscas varían de gris clara a gris blanquesina de tipo cuarzitico, grano fino a muy fino, dura micácea.	SR1					
		SR2					
		SR3					
		SR4					

**FUENTE: Informe Geológico – YPFB Andina, 2011**

### **k) Formación Icla**

El complejo de las Lutitas Icla (300 - 400m.) se divide según Steinmann en dos partes. La superior conteniendo nódulos de caliza de donde proviene la gran cantidad de los fósiles investigados y que se denominan Capas con Conularias puesto que se ha encontrado mucha cantidad de conularias. En el límite superior hacia las Areniscas Huamampampa se encuentra un banco de menos espesor de calizas margosas que contienen gran cantidad de restos de crinoideos. La base de las lutitas Icla está formada por caliza arenosa - gris rojiza oscura, capas de donde provienen fósiles.

### **l) Formación Santa Rosa**

Las Areniscas Basales Santa Rosa están expuestas en un espesor de unos 120 m en los profundos cañones que forman el Río Icla y el Río Huacasamayo. En la región de Icla no se puede ver la base de esta formación. La parte inferior de las

areniscas se presenta estratificada en bancos gruesos y se compone de granos de cuarzo de tamaño mediano y fino de colores claros. Estratificación entrecruzada es corriente en ciertos horizontes. Hacia arriba esta arenisca pasa a una arenisca arcillosa de colores más oscuros gris verdusco, estratificada en láminas de colores delgados. Las areniscas no son fosilíferas.

**FIGURA 2.2 Columna Estratigráfica, SBL-7.**

AGE		GROUP	FORMATION	LITHOLOGY	
TERTIARY	PLIO. ?	UPPER CHACO	EMBOROZU		
	MIOCENE		GUANDACAY		
	LATE OLIG.	L. CHACO	TARIQUIA		
			YECUA PETACA		
CRETACEOUS	EARLY	TACURU	ICHOA CASTELLON TAPECUA		
TRIAS.	EARLY		BASALTO ENTRERIOS IPAGUAZU		
PERMIAN	LATE		VITIAGUA		
	EARLY		GANGAPI		
CARBONIFEROUS	LATE	MUNDI-YUTI	SAN TELMO ESCARPMENT		
			TAIQUATI CHORRO		
	EARLY	MACHARETI	TARIJA ITACUAMI TUPAMBI ITACUA (Salpuri)		
			IQUIRI		
			DEVONIAN	LATE	LOS MONOS
			EARLY	HUAMAMPAMPA ICLA SANTA ROSA	
SILURIAN	LATE		GUAYABILLAS (Tarabuco) KIRUSILLAS		
	EARLY		CANGARI		
ORDOVICIAN	LATE		SAN BENITO		
	EARLY		SELLA / ANALDO CIENEGUILLAS ESCAVACHI		
PRECAMBRIAN	LATE		SAMA/TOROHUAYCO/CAMAC SAN CRISTOBAL + BASEMENT		

FUENTE: Ministerio de Hidrocarburos y Energía, Campos gasíferos y petrolíferos de Bolivia, La Paz 2011

## CAPITULO III

### OPERACIONES DE LA CEMENTACION

#### 3.1. ASPECTOS GENERALES DE LA CEMENTACIÓN

##### 3.1.1. Cementación

La cementación de un pozo es un proceso que consiste en mezclar cemento y agua con ciertos aditivos, para formar una lechada que es bombeada al pozo a través de la sarta de revestimiento y colocarlo en el espacio anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor.

El volumen a bombear es predeterminado para alcanzar las zonas críticas (alrededor del fondo de la zapata, espacio anular, formación permeable, hoyo desnudo, etc.). Luego se deja fraguar y endurecer, formando una barrera permanente al movimiento de fluidos detrás del revestidor.

##### 3.1.2. Objetivos de la cementación

La función principal de la cementación es de aislar las zonas expuestas en el borde del pozo que contiene los fluidos y separarlas, formando un sello hidráulico, que se forma entre las formaciones y el revestidor, con el fin de evitar la migración de los fluidos entre sí.

- Soportar la tubería de revestimiento, adhiriendo el cemento a la formación formando un sello hidráulico impermeable.
- Proteger al revestidor del proceso de corrosión, producidas por las aguas subterráneas.
- Prevenir surgencias (Blow Out) de las formaciones expuestas.
- Evitar la migración de fluidos entre diferentes zonas.
- Controlar la pérdida de circulación.
- Soportar el peso del revestidor y todo el peso del equipo.

- Sellar zonas de fluidos no deseables.

### **3.2. COMPOSICIÓN DEL CEMENTO**

El cemento Portland, ha sido el principal constituyente para cementar la mayoría de los pozos petroleros, obtuvo su nombre de la similitud con una piedra de constitución parecida que se encontró en la isla de Portland, cerca de las costas de Inglaterra.

Es un producto de calcinación y sus principales constituyentes son: caliza, barro, esquistos, escoria, bauxita y diversos materiales que contienen hierro. En la manufactura del cemento Portland, se mezcla las cantidades apropiadas de materiales y se calientan en un horno hasta aproximadamente 1350°C; después de someterlo a esta temperatura el material se convierte en escoria; esta se muele y se convierte en cemento Portland. La composición química del cemento varia, pero en general, está compuesta de diferentes porcentajes de materiales como el silicato tricalcico, aluminato tricalcico, el silicato dicalcico, ferro-aluminato tetra-calcico, yeso y magnesio.

#### **3.2.1. Clasificación de los cementos según su grado API.**

Los cementos tienen ciertas características físicas y químicas y en base al uso que se les puede dar en cuanto a rango de profundidad, presiones y temperaturas a soportar, etc. La API define 9 diferentes clases de cemento (desde Ahasta H) dependiendo de la proporción de los cuatro componentes químicos fundamentales (C3, C3S, C3A, C4AF; siendo Ca=calcio, Si=silicato, A=aluminato, y F=fluoruro).

Existen diversos tipos de cemento, por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos, pero se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

- **De origen arcilloso:** obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.

- **De origen puzolánico:** la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

**TABLA 3.1 Clasificación API de los cementos.**

CLASES API	AGUA DE MEZCLA	DENSIDAD LECHADA WT. PPG	PROFUNDIDAD EN FT	TEMP. BHST °F
A(Portland)	5,2	15,6	0-6000	80-170
B(Portland)	5,2	15,6	0-6000	80-170
C(Alta Temprana)	6,3	14,8	0-6000	80-170
D(Retardada)	4,3	16,4	6000-10000	170-230
E(Retardada)	4,3	16,4	6000-10000	170-230
F(Retardada)	4,3	16,4	10000-16000	230-320
G(California Basico)	5,0	15,8	0-8000	80-200
H("GulfCoast Basico)	4,3	16,4	0-8000	80-200

**FUENTE: Paper "Cementación Primaria" Schlumberger.**

Otras variantes comunes del cemento, bajo las especificaciones de API, incluyen:

- **Mezcla Pozolan de cemento** – 50% Portland, 50% Pozolan (ceniza volcánica de fondo) y 2%Bentonita
- **Cal de cemento** – Mezcla de cemento Portland y cal. Utilizado para trabajos remediales.
- **Diesel de cemento** – "Forzada Gunk". Mezcla de cemento básico con base aceite utilizado para sellar zonas de perdida. Se asentara en caso de haber presencia de agua.

- **Polvo de Sílice** – a temperaturas superiores a los 230°F, el cemento primero se reforzara y después se debilitara debido a la subsiguiente formación de Silicato de Calcio Hidratado (C2SH).

Al adicionar 30-40% de polvo de sílice al cemento, se forma CSH en preferencia al C2SH extendiendo de esta manera la velocidad de temperatura de la mezcla.

### **3.3. PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO**

Las propiedades de la lechada son las siguientes:

#### **3.3.1. Tiempo de espesamiento**

Es el tiempo que la lechada de cemento permanecerá bombeable bajo condiciones de pozo. También se define como el tiempo requerido para que la lechada de cemento alcance 100 unidades Bearden de consistencia (Bc). El tiempo de espesamiento debe ser mayor que el tiempo que va a durar el trabajo de cementación, para evitar cementación en la superficie de la tubería, en la cabeza de cementación y/o dentro del revestidor. Por lo tanto, este tiempo se debe estimar como el tiempo total del trabajo de cementación más un factor de seguridad de una a dos horas.

#### **3.3.2. Densidad de la lechada**

La densidad de la lechada de cemento debe ser tal que permita mantener el control sobre el pozo.

Se pueden obtener densidades elevadas disminuyendo el volumen de agua en la mezcla o agregando materiales de gravedad específica alta. Las densidades bajas se requieren algunas veces para reducir el riesgo de fractura de la formación, lo cual puede ser producida por una excesiva presión hidrostática de la columna de cemento.

### **3.3.3. Resistencia a la compresión**

Se refiere a la fuerza que puede soportar un cubo de cemento de cierta superficie antes de romperse. Cuando el cemento tiene un valor de resistencia a la compresión de 500 psi, es considerado adecuado para muchos trabajos.

### **3.3.4. Permeabilidad**

Se refiere a la capacidad de un medio poroso para permitir el flujo de fluidos o gases. La unidad de medición es normalmente el milidarcy, mD.

## **3.4. ADITIVOS PARA LOS CEMENTOS**

Los aditivos tienen como función adaptar los diferentes cementos petroleros a las condiciones específicas de trabajo. Pueden ser sólidos o líquidos. Sus funciones son:

- Modificar la densidad.
- Acelerar o retardar el tiempo de fraguado.
- Controlar la pérdida de fluidos.
- Reducir la viscosidad de la lechada.
- Aumentar la resistencia frente a fluidos corrosivos.
- Formación de puentes para el control de pérdidas de circulación.

Los aditivos pueden ser entregados en la locación de perforación en estado granular o líquido y pueden ser mezclados con el cemento en polvo o ser añadidos al agua de mezcla antes de que la lechada de cemento sea mezclada. La cantidad de aditivos usados comúnmente es expresada en términos de porcentaje en peso del cemento en polvo (tomado como base que cada saco de cemento pesa 94 lb). Muchos aditivos afectan más de una propiedad y por tanto deben ser cuidadosamente usados. El cemento con aditivos es un cemento al que se han modificado sus propiedades introduciendo elementos añadidos para mejorar su plasticidad, dureza, resistencia y fraguado.

El agua deberá ser clara y libre de materia orgánica. Álcalis, sales, sedimentos, etc. El contenido de pequeños porcentajes de cloruro de sodio o de calcio o de magnesio, reducirá el tiempo de fragüe de cualquier cemento para pozos de petróleo.

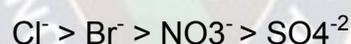
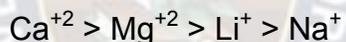
### 3.4.1. Aceleradores

Son aquellos aditivos que se agregan a la lechada de cemento con el objetivo de acortar el tiempo de espesamiento y aceleran el proceso de endurecimiento.

Por lo general son agregados al cemento en temperaturas entre 32°F y 110°F. Son fabricados a partir de cementos A, G y H. Entre los más usados están:

- Sales inorgánicas como: cloruro de calcio (hasta 2%) 60°F, cloruro de sodio (1-5%) > 10%.
- En otras ocasiones se utilizan: carbonatos, silicatos y aluminatos.

Eficiencia de aceleración según Edwards y Angstadt:

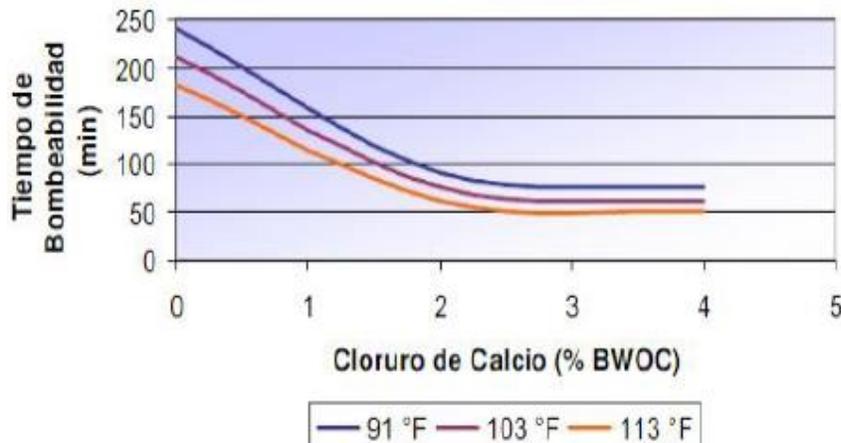


#### 3.4.1.1. Cloruro de calcio

Es el más eficiente y económico de todos los aceleradores, y puede utilizarse en todas las clases de cementos API. Normalmente usado en concentraciones que van de 1 a 4% BWOC.

Concentraciones excesivas aumentan la viscosidad de la lechada y se pierde el control del tiempo de bombeabilidad.

**FIGURA 3.1 Efecto del cloruro de calcio sobre el tiempo de bombeabilidad**



**FUENTE: (Contreras, 2011)**

#### **3.4.1.2. Cloruro de Sodio**

Es menos efectivo que el Cloruro de Calcio, modifica el Tiempo de Bombeabilidad de diferente forma dependiendo de la concentración:

- Hasta 10% BWOW: actúa como acelerador
- Entre 10% y 15% BWOW: es esencialmente neutral
- Por encima de 15% BWOW: causa retardo

#### **Ventajas**

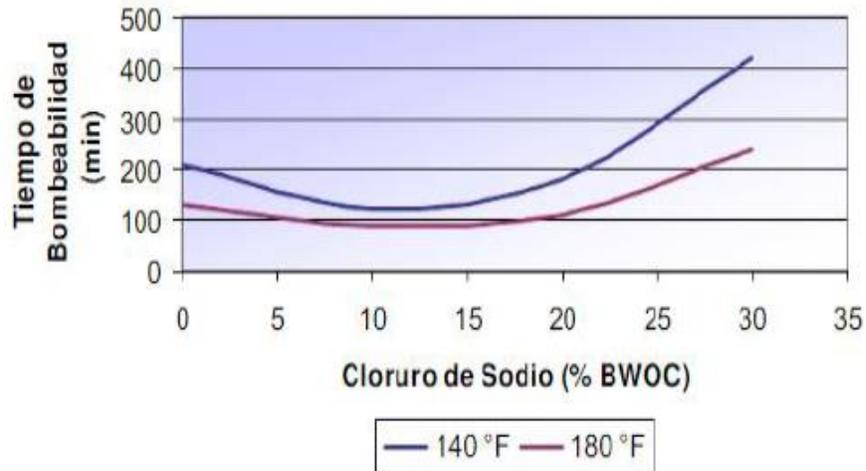
- Favorece la Adherencia del cemento a formaciones lutíticas
- Minimiza el daño en zonas sensibles al agua dulce
- Produce ligera expansión.
- Actúa como dispersante en las lechadas reduciendo su viscosidad.

#### **Desventajas**

- Puede causar algo de espuma durante su mezclado.
- No debe emplearse en lechadas que contengan FT-4.

- Tiene problemas de compatibilidad con la mayoría de los reductores de filtrado pero puede utilizarse con FC-22, FC-52L y SGS-500L.

**FIGURA 3.2 Efecto del cloruro de sodio sobre el tiempo de bombeabilidad**



**FUENTE: (Contreras, 2011)**

### 3.4.2. Retardadores

Son material orgánico de alto peso molecular prolongan el tiempo de bombeabilidad y retardan el fraguado de la lechada de cemento entre ellos se pueden encontrar:

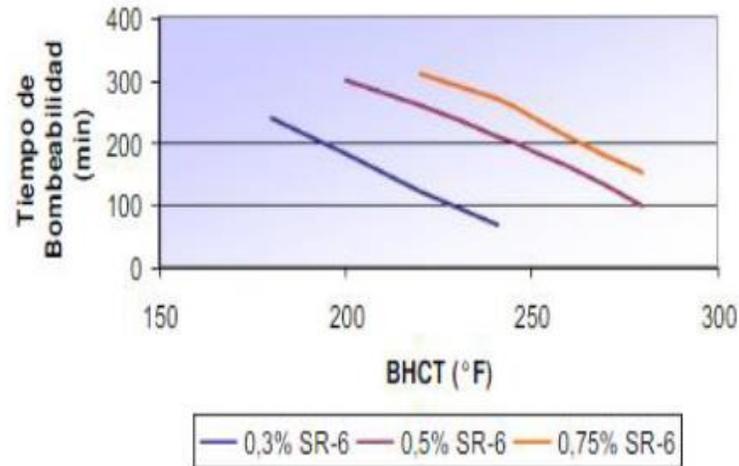
- Lignosulfonato de Sodio y Calcio (0.1-1%)
- Agua Saturada con Sal (15-17 Lbs/sc)
- Lignosulfonato de Calcio (0.1-1.05)
- CMHEC (Carboximetil Hidroxietil Celulosa)
- Sal (Cloruro de Sodio)>10%

#### 3.4.2.1. Lignosulfatos

Son usados en concentraciones que van de 0.1% a 1.5% BWOC. Son efectivos en temperaturas hasta 300°F (BHCT).

Este rango puede ser extendido hasta temperaturas de hasta 400°F con extendedores adecuados (SR-7), tienen una acción dispersante.

**FIGURA 3.3 Efecto de lignosulfatos sobre el tiempo de bombeabilidad**



**FUENTE: (Contreras, 2011)**

#### 3.4.2.2. Ácidos carboxílicos

Los más usuales son sales de Ácido Cítrico, Glucónico y Glucoheptónico, pueden aplicarse hasta 400°F. Se utilizan de 0.1 a 0.5% BWOC.

Tienen una leve acción dispersante. Actúan complejando el  $\text{Ca}^{++}$  y adsorbiéndose sobre los sitios activos de hidratación.

#### 3.4.3. Extendedores

Son materiales que reducen la densidad de las lechadas de cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen por producto fraguado. Los extendedores se usan para reducir la densidad de la lechada en lugares donde la hidrostática generada por la lechada excede la resistencia a la fractura de ciertas formaciones. Al reducir la densidad del cemento la generación de la resistencia a la compresión inmediata también se reduce y el tiempo de bombeabilidad se incrementa. Los aditivos reductores de densidad más comunes son:

- Bentonita ( 2 – 16%)
- Atapulguita (0.5- 4%)
- Hidrocarburos Naturales: Gilsonita, Carbón (1-50 Lbs/scs)
- Silicato de Sodio (1-7.5 Lbs/scs)

#### **3.4.3.1. Extendedores de Agua**

Materiales reactivos, que son principalmente viscosificantes del agua que permiten agregar un exceso de agua para alcanzar el peso deseado.

- **Bentonita (85%Smectita)**

La hidratación de las arcillas aumenta su volumen original produciendo altas viscosidades, resistencia de gel y capacidad de soportar sólidos en suspensión. En la medida que se incrementa el porcentaje de bentonita la densidad de la lechada baja e incrementa el rendimiento, pero cae la resistencia y se incrementa la permeabilidad.

#### **Ventajas**

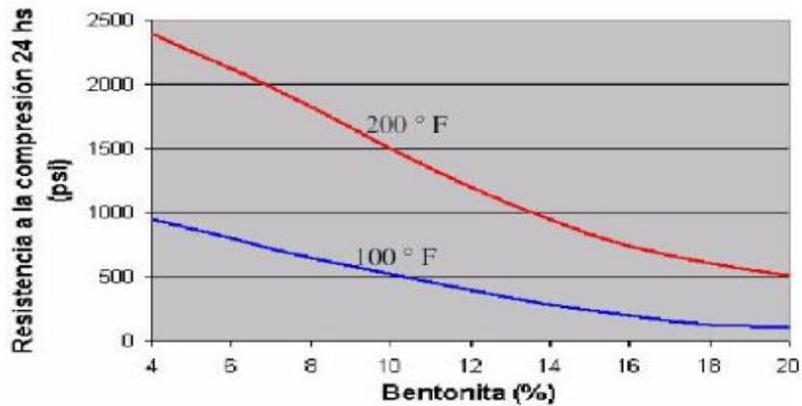
- Mezcla: En planta en seco o prehidratada
- Reología: Mantiene buenas propiedades aún a bajas densidades
- Agua salada: Puede usarse pero pierde eficiencia
- Eficiencia: Aumenta cuando se prehidrata previamente (4 a 1).
- Costo: reducido

#### **Desventajas**

- Resistencia: Cae substancialmente con la densidad
- Permeabilidad: Aumenta con la disminución de densidad, luego es menos resistente a sulfatos y otros corrosivos de formación.
- Contaminantes: El K+ en el agua de mezcla inhibe la hidratación

- Requerimiento de agua: Por cada 1% de bentonita agregada es necesario adicionar 5.3% de agua (a partir de la R a/c).

**FIGURA 3.4 Resistencia de la bentonita a la compresión**



**FUENTE: (Contreras, 2011)**

- **Silicato de sodio**

El silicato de sodio reacciona con el calcio del cemento para formar un gel de silicato de calcio que provee suficiente viscosidad para permitir que se usen grandes cantidades de agua de mezcla sin excesiva agua libre separada.

### **Ventajas**

- Mezcla: En planta -metasilicato(sol.) o en agua de mezcla -silicato (liq.)
- Reología: Mantiene buenas propiedades aún a bajas densidades
- Agua salada: Puede usarse sin inconvenientes
- Cantidades: Se requiere poca cantidad, esto simplifica el almacenamiento y manipuleo (uso offshore).
- Costo: Reducido

### **Desventajas**

- Acelera: Acorta la bombeabilidad.

- Acción química: Quita eficiencia a otros aditivos como red. de filtrado, retardadores, etc.

- **Puzolanas**

Son materiales silíceos o siliceo-aluminosos con mínimas o nulas propiedades cementicias, cuando son agregadas a la lechada en forma finamente dividida (mayor superficie específica), se combina con el  $(OH)_2Ca$  que libera el cemento en su proceso de hidratación formando un componente cementicio.

### **Ventajas**

- Mezcla: En planta o las cementeras suelen entregar cemento puzolánico.
- Reología: Similar a las lechadas con bentonita.
- Resistencia: Tiene mayor que un extendedor tradicional por la actividad de las puzolanas.
- Permeabilidad: muy baja, sin excesiva agua tiene menos de 0.001 mD, esto ayuda a resistir sulfatos y otros agentes corrosivos

### **Desventajas**

- Costo: Suele ser muy elevado.

- **Microcemento**

Su composición es similar al cemento normal pero su granulometría es 10 veces más fina, por lo tanto el área superficial es extremadamente alta (6500 a 9000 m<sup>2</sup>/Kg) lo que incrementa el requerimiento de agua, pueden obtenerse lechadas con densidades de 12.5 a 11 ppg con 100 a 180 % de agua. Se logra un rápido desarrollo de la resistencia a la compresión.

### 3.4.3.2. Agregados de baja densidad

Materiales inertes de baja densidad los cuales, como su nombre lo dice, tienen densidades inferiores a las normales para el cemento lo que ocasiona que la densidad de la lechada en general disminuya cuando estos son agregados a la mezcla.

- **Perlita expandida**

Es un vidrio volcánico partido, que se expande al calentarse. La perlita expandida así producida tiene una densidad bulk de 0.124 Kg/l lo cual permite formular lechadas con densidades tan bajas como 12.0 Lb/gal (1.44 gr/Cm<sup>3</sup>).

Una pequeña cantidad de bentonita (2 a 4% BWOC) debe ser adicionada para prevenir la segregación de partículas de la lechada.

#### **Ventajas**

- Mezcla: Se realiza en seco, se complica a altas concentraciones.
- Temperatura: Es recomendado para cementar pozos termales o inyección de vapor, es un buen aislante térmico.

#### **Desventajas**

- Baja resistencia: A 3000 psi la densidad de la perlita expandida es de 2.4Kg/Lt

- **Gilsonita**

Se obtiene en depósitos naturales de asfaltita mineral. Es un sólido negro y angular, con un amplio rango de tamaño de partículas (hasta 0.6 cm) y por esto es utilizado también como material para pérdida de circulación.

Es inerte en las lechadas de cemento y se mezcla con el cemento produciendo un aumento de volumen de lechada y una disminución del peso, tiene una

densidad de 1.07 Kg/lts y pueden obtenerse lechadas de hasta 12 ppg (1.44Kg/lt).

### **Ventajas**

- Mezcla: Se realiza en seco, se complica a altas concentraciones.
- Costo: Razonablemente económico

### **Desventajas**

- Baja resistencia: No soporta elevadas presiones, luego la densidad final de la lechada es superior a la programada.
- Temperatura: Hasta 300°F
- Otros aditivos: Requiere de la adición de bentonita para mantenerla en mezcla.

#### **3.4.3.3. Extendedores gaseosos**

Se utilizan para hacer lechadas espumosas con densidades muy bajas (menores a 6.0 libras por galón) y con alta resistencia a la compresión.

#### **3.4.4. Densificantes**

La función principal es incrementar el peso de la lechada y disminuir el rendimiento de la misma.

Se usan tres materiales principales: Barita, Hematita e Ilmenita. Esos deben cumplir ciertos requisitos como poseer una gravedad específica mayor a la del cemento, su fineza debe compararse a la del cemento para no incurrir en decantación o aumentar la viscosidad de la lechada, deben tener bajo requerimiento de agua, y deben ser inertes y compatibles con otros aditivos.

Los escenarios en los cuales se requiere un aditivo densificante son, por ejemplo, cuando es necesario aumentar la densidad de la lechada para igualar el peso del lodo y así, mediante altas presiones hidrostáticas, controlar casos de

presiones de poro incrementadas, pozos inestables y formaciones plásticamente deformables.

**TABLA 3.2 Requerimiento de los densificantes**

	<b>Gravedad específica</b>	<b>Volumen absoluto (gal/lb)</b>	<b>Color</b>	<b>Requerimiento de agua adicional (gal/lb)</b>
<b>Ilmenita</b>	4.45	0.027	Negro	0.00
<b>Hematita</b>	5.02	0.024	Rojo	0.0023
<b>Barita</b>	4.33	0.027	Blanco	0.024

**FUENTE: Elaboración propia en función a (Contreras, 2011)**

### **3.4.5. Dispersantes**

Estos aditivos, también conocidos como súper plastificantes o inductores de turbulencia, actúan sobre las cargas eléctricas de las partículas, que representan el 70% en concentración en la suspensión agua/sólidos presente en una lechada de cemento, con el fin de obtener una reología deseada. Estos aditivos tienen un efecto sobre el punto cedente y la viscosidad de la lechada. El primero varía inversamente a la concentración de dispersante y el segundo disminuye cuando aumenta la concentración del aditivo en cuestión.

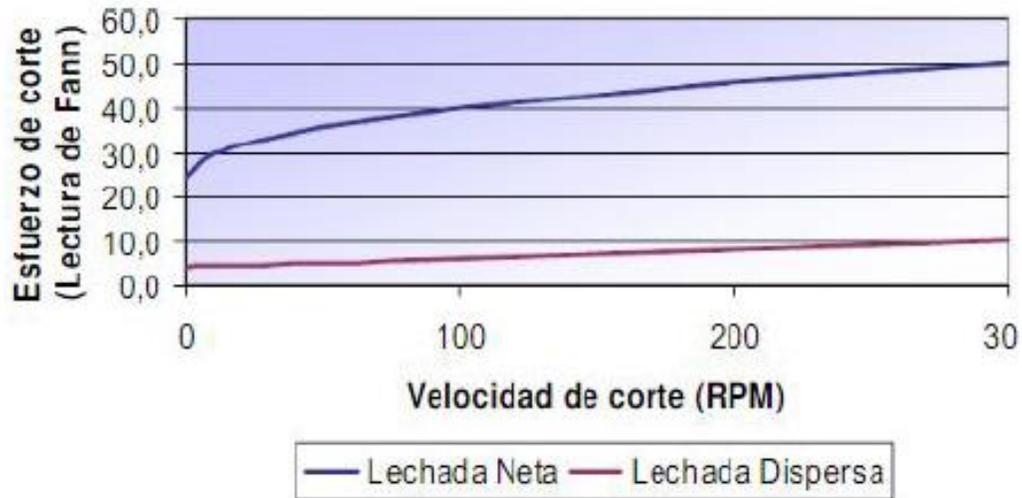
Los compuestos usados como agentes dispersantes son sulfonatos como la polimelanina, polinapiealeno y el poliestireno; polisacáridos como el polisacárido hidroxilado; y químicos no poliméricos tales como los ácidos hidroxicarboxílicos.

En las etapas tempranas de la hidratación del cemento se forma una estructura gelatinosa de C-S-H que otorga cargas negativas a la superficie de las partículas. Los iones  $\text{Ca}^{+2}$  en solución competirán por esos grupos cargados negativamente formando:

- Puentes entre dos granos (aumento de viscosidad)

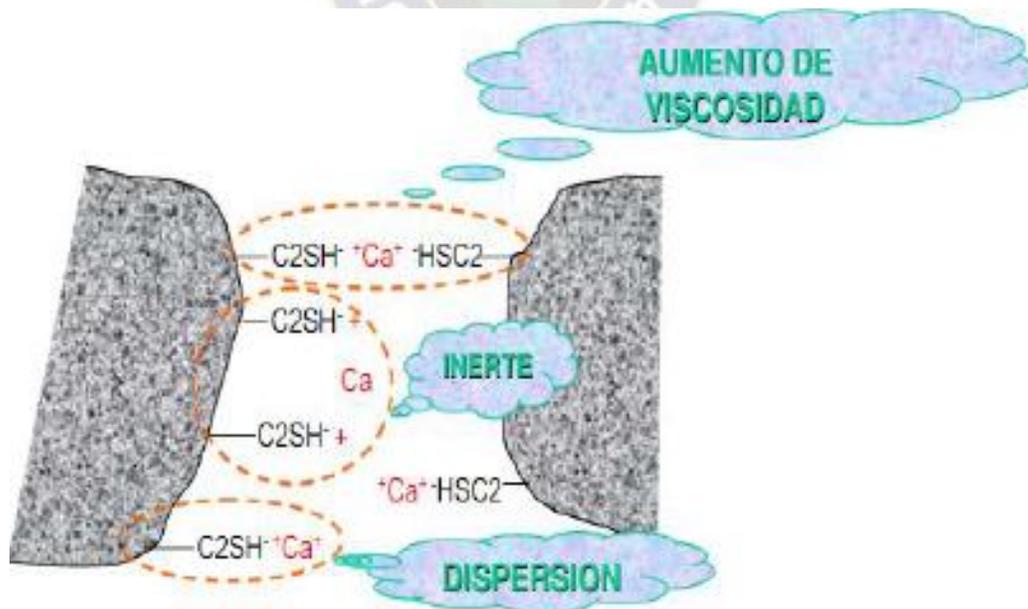
- Uniendo dos grupos en el mismo grano (Inerte)
- Uniéndose a un sitio lo cual dejará una carga remanente positiva (dispersión)

**FIGURA 3.5 Efecto de los dispersantes sobre la reología de lechadas**



FUENTE: (Contreras, 2011)

**FIGURA 3.6 Comportamiento en la etapa de dispersión**



FUENTE: (Contreras, 2011)

### **3.4.6. Agentes Anti-Sedimentación**

Son los encargados de contrarrestar los efectos secundarios del uso de dispersantes en las lechadas de cemento, los cuales son la sedimentación (debido a la acción electrostática del dispersante, las partículas se repelen entre si haciendo que se muevan y caigan por gravedad hasta depositarse en el fondo) y la presencia de agua libre (el agua se separa de las partículas sólidas que flotan en ella y se acomoda por gravedad en la parte superior).

El mecanismo de acción de estos aditivos es incrementando el punto cedente en la lechada, pero sin afectar la bombeabilidad de la misma; de esta manera se mantiene homogénea y se pueden evitar los problemas anteriormente mencionados. Los compuestos usados para este fin son la Bentonita, los Polímeros Hidrosolubles, los Silicatos y las Sales Metálicas ( $\text{NiCl}_2$ /  $\text{MgCl}_2$ ).

### **3.4.7. Controladores de Filtrado**

Evitan la pérdida de filtrado manteniendo estables las propiedades y reología de la lechada. Cuando una lechada de cemento es colocada a través de una zona permeable, se genera una filtración de la fase acuosa de la mezcla hacia la formación dejando las partículas sólidas de la lechada en la cara de la formación. Si este proceso no se controla, propiedades como la densidad, tiempo de espesamiento, y otras características reológicas se ven afectadas dificultando o imposibilitando la operación.

Los agentes controladores de filtrado minimizan el filtrado de la fase acuosa mediante la reducción de la permeabilidad de la costra de cemento o incrementando la viscosidad de la fase acuosa.

### **3.4.8. Controladores de Pérdida de Circulación**

Estos aditivos crean puentes sobre fracturas, huecos o espacios débiles para evitar la pérdida de circulación en formaciones porosas, cavernosas y

fracturadas. Se pueden utilizar obturadores como materiales granulados inertes (gilsonita o kolite) o recortes de celofán.

#### **3.4.9. Antiespumantes**

El uso de distintos aditivos puede generar espuma en la lechada de cemento, esto puede provocar gelificación de la lechada, problemas al leer la densidad de la misma, y dificultades para la mezcla y bombeo por cavitación y pérdida de succión en las bombas. Es por esto que se usan aditivos antiespumantes sólidos o líquidos los cuales cambian la tensión superficial y/o alteran la dispersabilidad de los sólidos evitando la generación de la espuma. Se pueden utilizar éteres poliglicoles o siliconas.

#### **3.4.10. Agentes Flexibles**

Se agregan a la lechada con el fin de incrementar la resistencia del cemento a los esfuerzos de flexión relacionados con la perforación, collares, entre otros. Se puede utilizar nylon o caucho molido. En algunas ocasiones el uso de látex brinda esta característica también.

#### **3.4.11. Trazadores Radioactivos**

Estos aditivos permiten localizar determinada lechada detrás del revestidor, con el fin de determinar el nivel de llenado o tope del cemento. Los trazadores más comúnmente usados son el yodo 131, en estado líquido, y el iridio 102, en estado sólido.

#### **3.4.12. Inhibidores de Contaminación del Cemento**

Para minimizar el efecto contaminante de ciertos componentes químicos presentes en el lodo, tales como almidón o celulosa, se utilizan inhibidores como para-formaldehído o mezclas de para-formaldehído y cromato de sodio.

**TABLA 3.3 Efecto de los aditivos comunes sobre las propiedades de las lechadas.**

		Aceleradores	Bentonita	Puzolanas	Hematita	Retardadores	Dispersantes	Reductor de Filtrado	Perdida de circulación	Arenas	Sal (10-20%)	Silica Fluor	Agua de mar
Requerimiento de agua	Aumenta		+	+				+	+			+	
	Disminuye						+						
Densidad	Aumenta				+					+	+		+
	Disminuye		+	+			+		+			+	
Viscosidad	Aumenta		+	+	+			+				+	
	Disminuye	+				+	+			+	+		
Tiempo de bombeabilidad	Aumenta	+											+
	Disminuye		+			+	+	+					
Filtrado	Aumenta												
	Disminuye	+	+				+	+					
Resistencia Temprana	Aumenta	+					+				+	+	+
	Disminuye		+	+	+	+		+		+			
Resistencia Final	Aumenta			+			+					+	
	Disminuye		+										
Durabilidad	Aumenta			+			+					+	
	Disminuye		+										
Tipos de trabajo donde son mayormente usados	Casing Cond.	+					+		+		+		+
	Guia	+		+			+		+		+		+
	Intermedia		+	+			+		+		+		+
	Casing Producc.		+	+	+	+	+	+	+			+	
	Liner				+	+	+	+				+	
	Squeeze					+	+	+					
	Tapones						+			+			
Efecto menor													
Efecto mayor													

FUENTE: Elaboración propia en base a los datos de Contreras

### **3.5. CEMENTACIÓN PRIMARIA**

La cementación primaria es un trabajo que consiste en colocar cemento en el espacio anular cañería hueco, asegurando un sello completo y permanente (Fig.3.7).

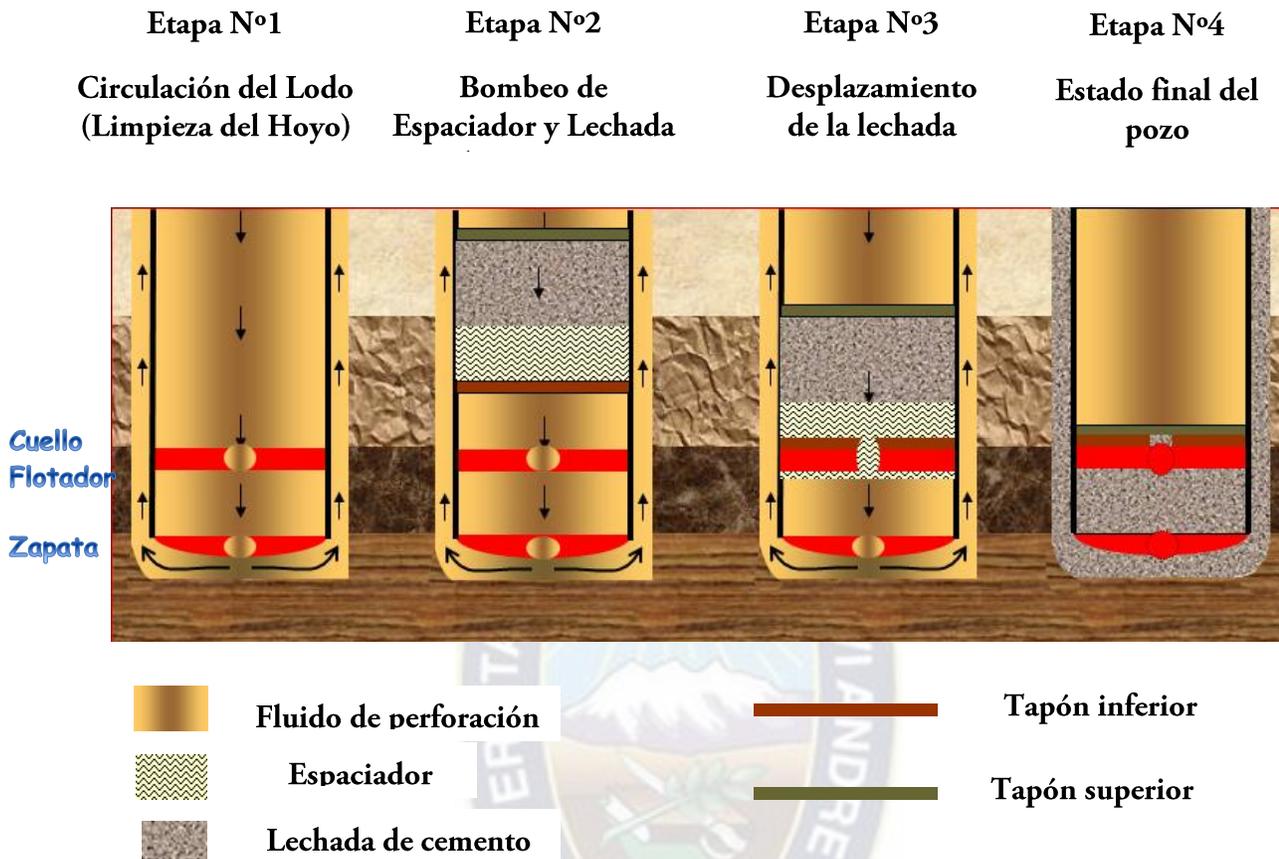
Después de la colocación, el cemento endurece formando un sello hidráulico en el pozo, previniendo la migración de los fluidos de la formación al anular. Por lo tanto la cementación primaria es una de las etapas más críticas durante la perforación y completación de un pozo. Este procedimiento puede ser planeado y ejecutado cuidadosamente, porque hay solo una oportunidad para completar el trabajo satisfactoriamente.

Además de proporcionar aislamiento zonal, el poner revestimiento de cemento debería anclar y soportar la tubería de revestimiento y proteger contra corrosión por los fluidos de las formaciones.

#### **3.5.1. Objetivos de las cementaciones primarias**

1. Proporcionar aislamiento entre las zonas del pozo que contiene gas, petróleo y agua.
2. Soportar el peso de la propia tubería de revestimiento.
3. Reducir el proceso corrosivo de la tubería de revestimiento con los fluidos del pozo y con los fluidos inyectados de estimulación.
4. Evitar derrumbes de la pared de formaciones no consolidadas.
5. Sellar zonas de pérdida de circulación.
6. Proteger la tubería contra impactos originados por la perforación subsecuente.
7. Restringir movimiento de fluidos.

**FIGURA 3.7 Cementación Primaria.**



**FUENTE: SALAS Roberto - Cementación de Pozos**

El reto principal es obtener sellos hidráulicos efectivos en las zonas de interés que tienen fluidos a presión. Para lograrlo es indispensable mejorar el desplazamiento del lodo de perforación del tramo de espacio anular que se va a cementar consiguiendo así una buena adherencia sobre la cara de la formación y de la tubería de revestimiento, sin canalizaciones en la capa de cemento y con un llenado completo.

Se ha vuelto práctica común que para cumplir con el segundo y tercer objetivos, el cemento debe desarrollar un esfuerzo compresivo mínimo de 500 PSI dentro de las primeras 8 horas. Este valor es producto de la práctica.

- **Tubería De Revestimiento Tramo Productor (Casing De Producción)**

Este es el último elemento en el pozo, aísla las diferentes zonas por encima y dentro de la zona de producción, soporta todas las cargas anticipadas durante la operación de prueba y producción a lo largo de la vida del pozo.

El casing (tubería de revestimiento) de producción, es normalmente corrido y cementado a través de la zona de interés para permitir la comunicación con la formación de interés, sea para la producción de los fluidos del reservorio o inyección de fluidos.

A veces es puesto por encima de la zona de interés y se realiza una completación a hueco abierto.

Una excelente cementación primaria de la tubería de producción es esencial, las lechadas de cemento deben ser diseñadas para mantener la zona de producción bajo control para proporcionar una adecuada presión hidrostática.

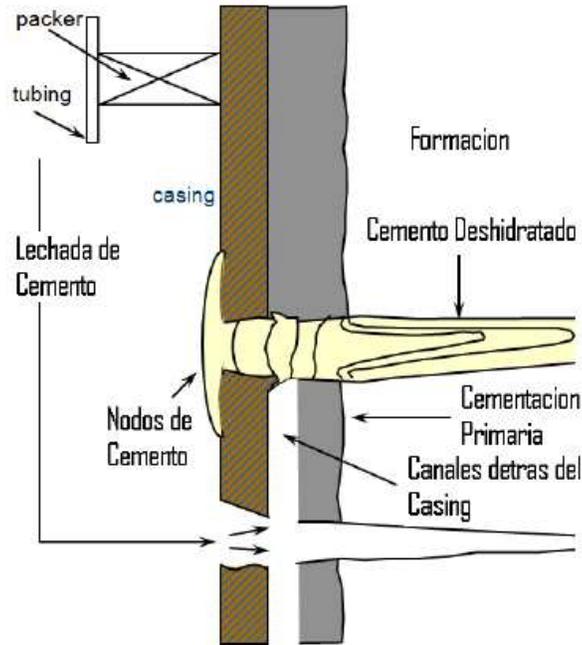
Para minimizar el riesgo de errores en la secuencia en la corrida de tuberías, no debería usar dos tipos de juntas de tubería de revestimiento en una cadena dada. Comúnmente las combinaciones usadas incluye 10 3/4 plg y 9 5/8 plg, 7 5/8 plg y 7 plg.

### **3.6. CEMENTACIÓN REMEDIAL (SQUEEZE O SECUNDARIA)**

La cementación forzada (cementación remedial o cementación squeeze), es un proceso que consiste en la inyección de cemento a presión a través de disparos o ranuras en la tubería de revestimiento al espacio anular. Es una medida correctiva a una cementación primaria defectuosa. Este tiene por objeto, alcanzar un sello óptimo entre el la tubería de revestimiento y la formación.

Esta cementación remedial principalmente sirve para aislar la producción de hidrocarburos de aquellas formaciones que producen otros fluidos (figura 3.8).

**FIGURA 3.8 Representación de una cementación remedial.**



**FUENTE: Well Cementing, ERICK B, NELSON.**

### **3.6.1. Objetivos de la Cementación Remedial**

- Mejorará el sello hidráulico entre dos zonas que manejan fluidos.
- Corregir la cementación primaria en la boca de una tubería corta, o en la zapata de una tubería cementada, que manifieste ausencia de cemento en la Prueba de Goteo.
- Eliminar la intrusión de agua al intervalo productor
- Reducir la relación gas-aceite.
- Sellar un intervalo explotado o producido.
- Sellar parcialmente un intervalo seleccionado incorrectamente.
- Corregir una canalización en la cementación primaria.
- Corregir una anomalía en la tubería de revestimiento.

(*Prueba de Goteo.*-Esta prueba consiste en la aplicación al agujero descubierto, inmediatamente después de perforar la zapata, de una presión hidráulica equivalente a la carga hidrostática, que ejercerá el fluido de control con el que se

perforara la siguiente etapa. Esto se realiza durante 15 o 30 minutos, sin abatimiento de la presión aplicada).

### **3.6.2. Características de la cementación remedial**

#### **3.6.2.1. Técnica de cementación remedial**

La clasificación según la presión de bombeo, en donde normalmente la inyección de la lechada es desarrollada a través de las perforaciones del revestimiento. Existen dos clasificaciones la cementación remedial a baja presión donde la presión de tratamiento de fondo es mantenida por debajo de la presión de fractura de la formación, y la cementación remedial a alta presión en el que la presión de tratamiento de fondo excede la presión de fractura de la formación.

#### **3.6.3. Aplicabilidad de la Cementación Remedial**

La aplicación de la cementación remedial ha incrementado considerablemente, a causa de tener mejor entendimiento de la mecánica de fractura de la roca y de las propiedades de filtrado de las lechadas de cemento. Las cementaciones remediales tienen utilidad en los siguientes casos

- 1) Controlar alto GOR, aislando la zona productora de gas, se conserva la energía del yacimiento.
- 2) Controlar excesiva producción de agua o gas, estos fluidos pueden ser aislados de la arena productora para disminuir la relación agua-petróleo o gas-petróleo, evitando futuras conificaciones.
- 3) Reparar fallas o roturas en la tubería de revestimiento: el cemento puede ser forzado a través de los huecos generados por la corrosión en el "Casing"
- 4) Sellar zonas ladronas o zonas de pérdida de circulación.
- 5) Proteger contra la migración de fluido dentro de una zona productora

6) Aislar zonas permanentes, generalmente en pozos donde existen varias zonas potencialmente productoras, de modo que la producción de zonas puede ser aleatoria

7) Prevenir la migración de fluidos de zonas o pozos abandonados, aplicado a pozos a ser abandonados, sellar o taponar zonas productoras depletadas o completadas a hueco abierto.

### **3.6.4. Tipos de Cementación Remedial**

#### **3.6.4.1. Reparación de huecos en el pozo**

Este tipo se caracteriza por llenar espacios vacíos relativamente pequeños en el pozo con cemento hasta alcanzar presión de “Squeeze” y formar el respectivo tapón. Limitado a espacios vacíos pequeños durante la perforación o a zonas productoras de arena que pueden crear cavernas, las cuales no permiten que el cemento se deshidrate contra la formación y por lo tanto no se forme el tapón de cemento.

#### **3.6.4.2. Reparación de la Cementación Primaria**

Se refiere básicamente a la reparación de canales de cemento formados durante la cementación primaria. Cualquier corrección a un canal producido a través del tiempo por la erosión que ejerce el flujo del fluido ya sea en la formación o en el “Casing” e inclusive la reparación de un micro-anulo, se encuentra dentro de esta categoría. Casi siempre se refiere a áreas anulares cercanas a la cara de la formación.

#### **3.6.4.3. Reparación de la formación**

Se caracteriza por grandes espacios o cavernas que se presentan detrás del hueco revestido, incluyendo fracturas naturales o inducidas, intervalos erosionados o de grandes producciones de arena. En estas situaciones es posible que no se pueda formar un tapón deshidratado de cemento y por tanto va a existir comunicación entre el hueco y la formación. El problema puede ser muy

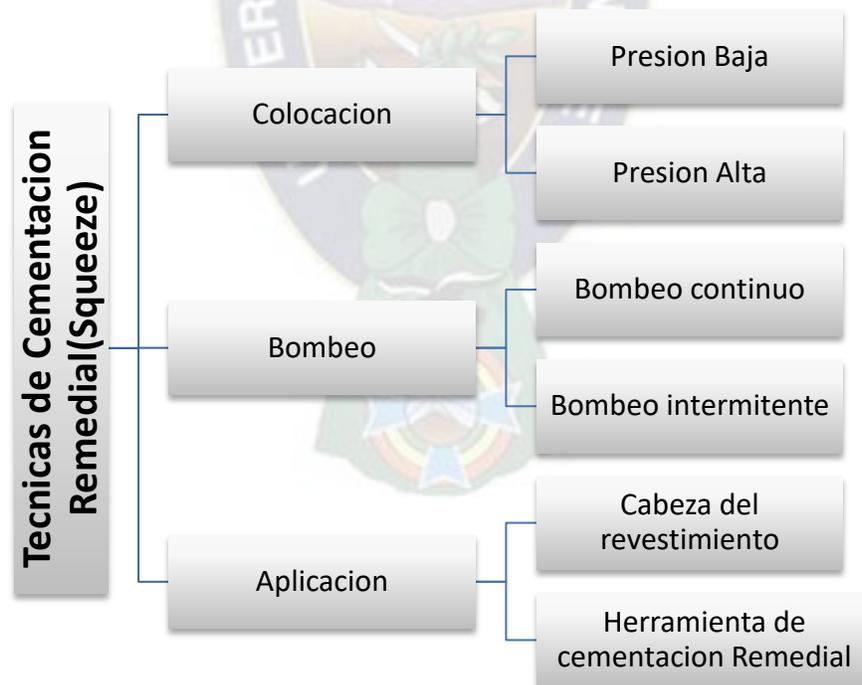
grande y por lo que es difícil estimar la cantidad de cemento necesaria para llenar el espacio vacío.

### 3.6.5. Técnicas de reparación

La cementación forzada puede clasificarse según la técnica de colocación (presión de inyección baja o alta), el método de bombeo (continuo o por forzamiento intermitente) y el método de aplicación (mediante herramientas de cementación remedial o método de colocación convencionales)

Las técnicas aplicadas en estos trabajos son generalmente conocidas por las presiones altas y bajas requeridas, al igual que por el tipo de empacadura a ser utilizadas. Dependiendo de estas herramientas será posible o no incrementar la presión hasta alcanzar las exigencias del problema que se trata de reparar.

**FIGURA 3.9. Esquemas de las Técnicas de Cementación Remedial.**



**FUENTE: Elaboración propia, mejorada del autor Well Cementing, ERICK B, NELSON**

### **3.6.5.1. Colocación**

La lechada de cementación puede colocarse detrás de la tubería de revestimiento con presión de inyección alta o baja.

- **Colocación con Baja Presión**

Es uno de los métodos más eficientes de sellado de zonas perforadas. En una operación de cementación remedial a baja presión la formación no es fracturada. En cambio la lechada es forzada suavemente sobre la formación. La lechada de cemento consiste de solidos finos dispersos en un medio líquido. Estos solidos son demasiado grandes para ser desplazados dentro de la formación, como se aplica presión al sistema, la fase liquida es forzada dentro de los poros, generando un depósito de material solido o revoque detrás. Este revoque de cemento deshidratado que se genera sirve de barrera impermeable que previene la invasión de filtrado a futuro. En este sentido esta técnica crea un sello impermeable alrededor de la zona perforada.

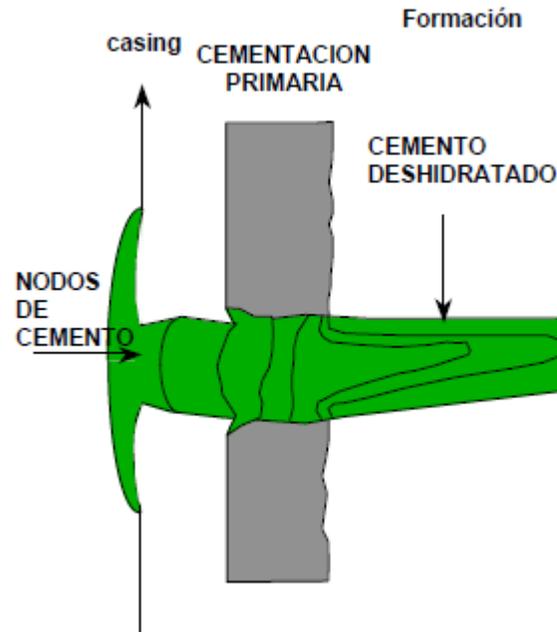
La cementación remedial a presión baja consiste básicamente en la inyección de lechada con una presión inferior a la de fractura de la formación. Esta técnica se utiliza sobre todo para rellenar cavidades de las perforaciones o canales interconectados. Es la técnica más utilizada.

Algunos factores claves que afectan la construcción del revoque de cemento son:

- Perdida de fluido (generalmente 50 – 200 cc)
- Relación de agua-solidos (0.4 por peso)
- Características de la formación (permeabilidad, presión de poro)
- Presión de esfuerzo

Solo se requiere un volumen pequeño de cemento para realizar una cementación remedial a baja presión. Los baleos deben encontrarse libres de lodo u otro material que sirva de puenteo o bache. Si el pozo ha estado produciendo por un tiempo, sus baleos deben ser lavados a veces con solución acida.

**FIGURA 3.10 Permeabilidad de Revoque y Rata de Deshidratación de la Lechada**



**FUENTE: Schlumberger**

- **Colocación con Alta Presión**

Es una operación de cementación remedial con alta presión, la formación inicialmente fracturada por un fluido libre de sólidos (salmuera o agua) para determinar la presión de admisión de la formación. Nunca se debe usar lodo de perforación para realizar esta prueba, porque se puede dañar la formación o el revoque formado evita la inyección de fluido.

La dirección de las fracturas depende de la resistencia de la roca presente en la formación. A fractura ocurre a lo largo de un plano perpendicular a la dirección de menor resistencia compresiva. En general, la resistencia vertical, depende del esfuerzo de sobrecarga, el cual es más grande que la resistencia horizontal, entonces es más fácil que se produzca una fractura vertical.

En la práctica es difícil predecir la dirección de la fractura debido a que la tendencia será seguir la dirección de las fracturas naturales de la formación.

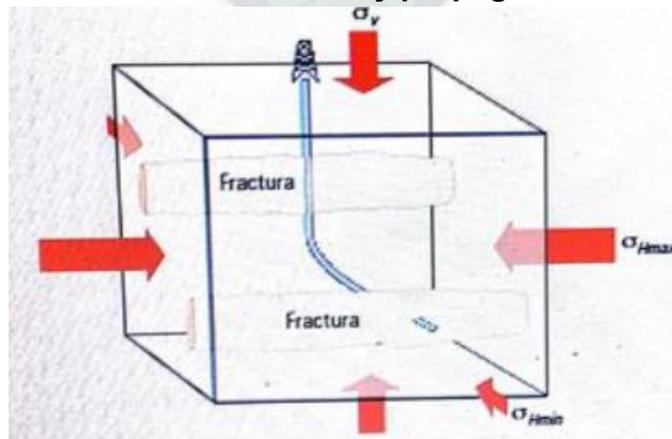
Después de que la formación es fracturada, la lechada de cemento es colocada frente a la formación y luego es bombeada dentro de la zona a un caudal de bombeo bajo. La presión de inyección debe crecer gradualmente mientras el cemento llena la zona fracturada. Después de que la lechada ha sido forzada se debe desfogar la presión y revisar si existe retorno.

La técnica de cementación remedial de alta presión se utiliza cuando no es posible inyectar la lechada a una presión inferior a la de fractura. Esto ocurre principalmente en canales aislados detrás de las tuberías de revestimiento, en micro-anulares y en perforaciones obstruidas.

El cemento se coloca fracturando la formación e inyectando la lechada en la zona. Se suele utilizar un volumen relativamente alto de lechada, ya que las fracturas creadas y las perforaciones tienen que rellenarse con ella.

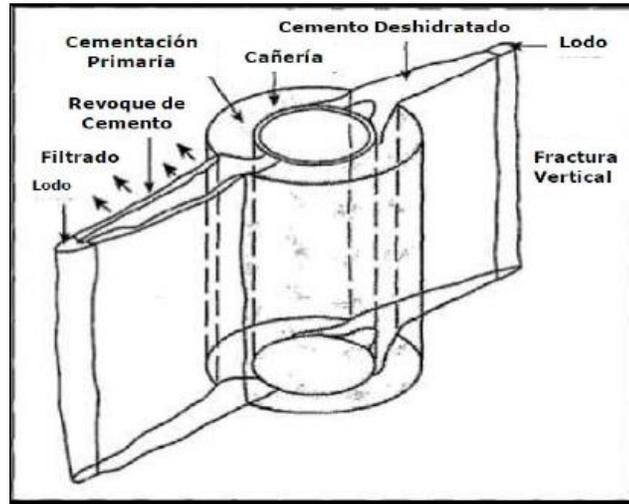
Como medida de precaución especial, antes de inyectar la lechada, debe bombearse un lavador o un ácido débil, con el fin de minimizar el caudal de bombeo necesario para iniciar las fracturas. Un caudal de bombeo alto puede generar fracturas grandes, con orientaciones impredecibles que no puedan controlarse.

**FIGURA 3.11 Esfuerzos locales y propagación de la fractura**



**FUENTE: Nolen-Hoeksema, R. (2013). Elementos de fracturamiento hidráulico. Oilfield review**

**FIGURA 3.12 Fractura Vertical Generada por Cementación Forzada**



**FUENTE: Recuperación de hidrocarburos de horizontes productivos someros, en pozos con falta de aislamiento hidráulico usando técnicas de tubería flexible, 2012.**

- **Desventajas**

- No existe control sobre la orientación de las fracturas.
- Pueden ser necesarios grandes volúmenes de cemento para llenar la fractura.
- El lodo remanente dentro de los baleos es atrapado dentro de las fracturas, lo que puede ocasionar que el sello no sea efectivo.

### **3.6.5.2. Bombeo**

Existen dos métodos para bombear y forzar la lechada detrás de una tubería de revestimiento: Bombeo continuo o bombeo secuencial, bombeo intermitente.

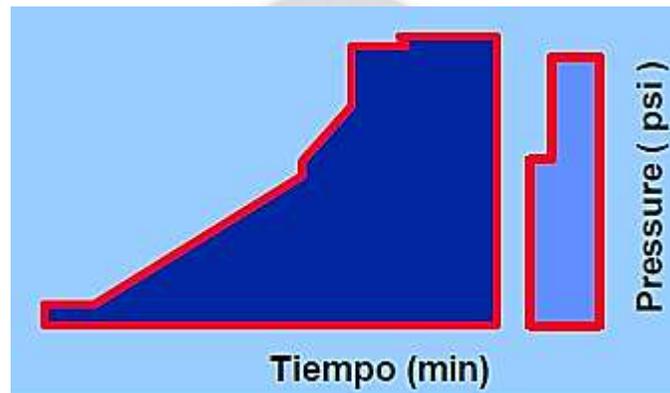
- **Bombeo continuo**

El bombeo continuo consiste en bombear de forma ininterrumpida un volumen determinado de lechada hasta alcanzar la presión de inyección final. Cuando la

presión de inyección final mantiene constante, el trabajo ha terminado; caso contrario, se debe repetir hasta alcanzar una presión uniforme.

Esta técnica puede utilizarse tanto con presiones altas como bajas, aunque hay que tener en cuenta el volumen de la lechada bombeado suele ser alto en esta situación.

**FIGURA 3.13 Bombeo Continuo**



**FUENTE: Schlumberger**

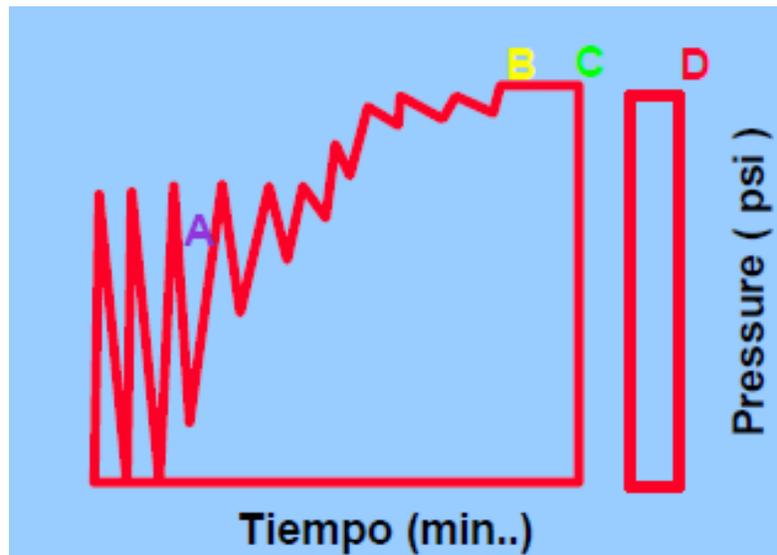
- **Bombeo intermitente**

Esta técnica consiste en aplicar de forma intermitente presión a un caudal entre 0.25 Bbl/min y 0.50 Bbl/min durante un intervalo entre 10 y 20 minutos hasta alcanzar la presión final de la cementación remedial.

La pérdida de filtrado inicial suele ser muy alta, pero disminuye a medida que se forma el revoque de lodo. En comparación con la técnica de bombeo continuo, en el bombeo secuencial se utilizan volúmenes de lechada relativamente bajos.

La duración de cada secuencia depende del tipo de formación y puede oscilar entre 5 minutos en formaciones duras, y 30 minutos en formaciones blandas. Esta duración debe tenerse en cuenta a la hora de determinar el tiempo de espesamiento de la lechada.

**FIGURA 3.14 Variación de Presión con Respecto al Tiempo Durante una Cementación Forzada Mediante Bombeo Intermitente.**



**FUENTE: Schlumberger**

**A:** El agua de mezcla de la lechada se filtra durante el bombeo secuencial.

**B:** No hay más filtrado, de modo que la lechada se ha deshidratado.

**C:** La presión se libera.

**D:** La presión de inyección final se vuelve a aplicar escalonadamente.

### **3.6.6. Casos frecuentes donde se aplica cementación remedial**

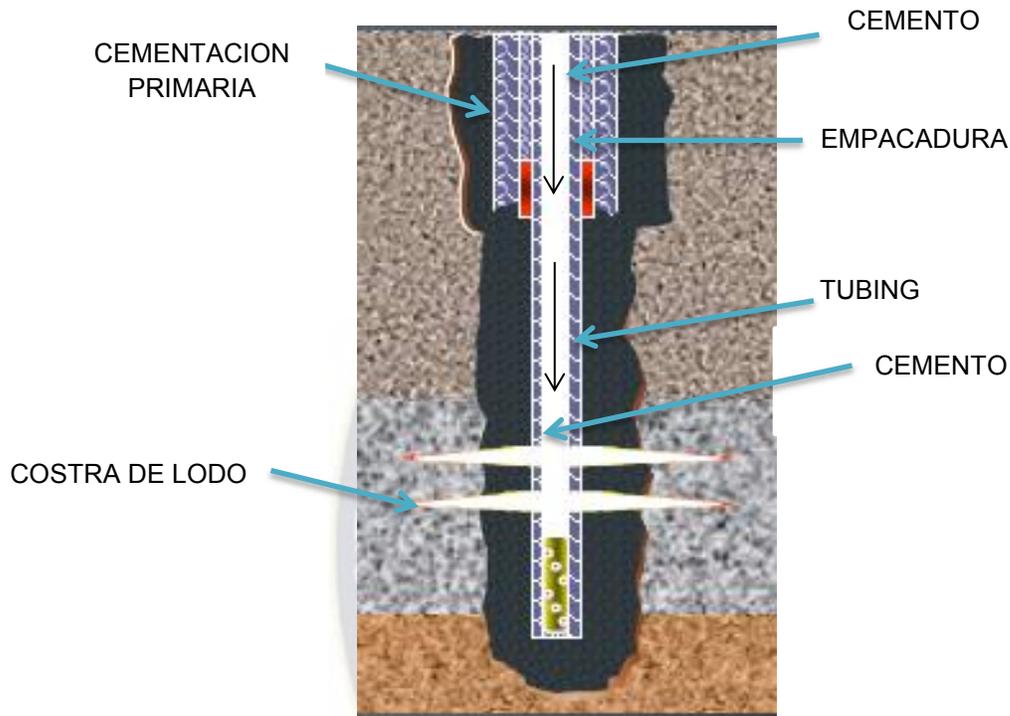
Cementación remedial es el nombre que se le da a la operación efectuada por una unidad de alta presión, donde las presiones alcanzadas son relativamente altas para inyectar el cemento a la formación, a través de los orificios de los disparos efectuados en el interior de la tubería de revestimiento.

#### **3.6.6.1. Reparación de fuga en “Casing”**

Cuando un revestimiento está dañado en la parte superior de la cementación primaria o incluso en un sector que estuvo cementado resulta necesario forzar

cemento a presión a través de esta rajadura y dentro del espacio anular "casing"- hueco, para aislar la zona de interés.

**FIGURA 3.15 Reparación de una Fuga de "Casing"**



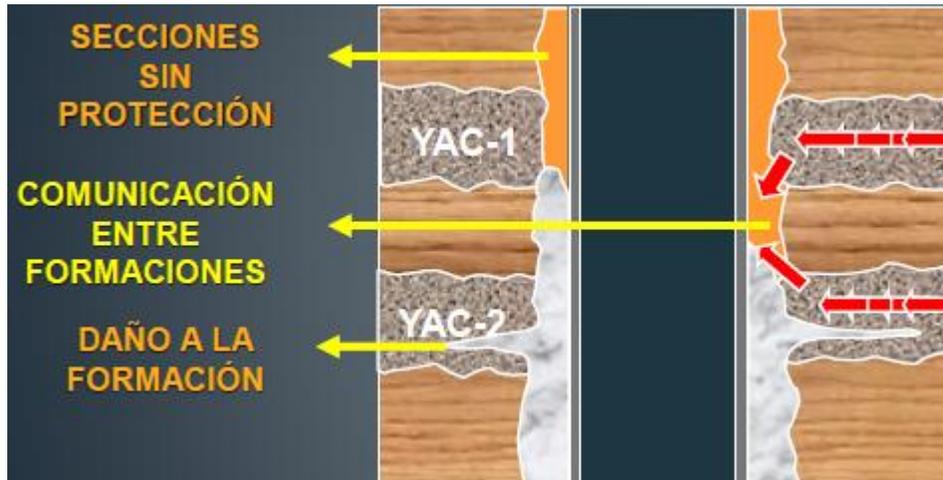
**FUENTE: Salas Roberto - Cementación De Pozos**

Para su reparación, se corre un empacador, colocado encima de la tubería de revestimiento dañada. A continuación, se hace circular la lechada hasta el área dañada, se fija el empacador, y se fuerza la lechada a baja presión hacia el interior y en torno a los orificios de la tubería.

### **3.6.6.2. Preparación o sello de canales indeseables en el cemento detrás del "Casing"**

Esta canalización detrás de la tubería de revestimiento se presenta por deficiencias durante la cementación primaria y permite que intervalos adyacentes puedan comunicarse de manera indeseable.

**FIGURA 3.16 Detección del Tipo de Problema según Intervalos a Reparar**



**FUENTE: Salas Roberto - Cementación de Pozos**

Se dispara frente a los intervalos o cercanamente, procurando hacerlo en una zona admisible inferior, sobre un posible contacto agua-petróleo y que no se halle en cuellos de la tubería, los disparos se realizan generalmente en una sección del “casing” de dos pies y con dos disparos por pie y para formaciones consideradas duras (poca admisión y/o baja permeabilidad) es recomendable disparar intervalos de cuatro pies a cuatro disparos por pie.

### **3.6.6.3. Aislamiento de la producción de agua y/o gas**

Es un motivo frecuente para la cementación remedial de un pozo y se requiere en casos donde se quiera aislar la producción de agua en una misma zona.

### **3.6.6.4. Aislamiento de producción de agua en una misma zona**

En este caso resulta necesario cementar los punzados inferiores para aislarlos, permitiendo la producción de petróleo por los punzados superiores. Esto se hace colocando un retenedor de cemento sobre el contacto agua-petróleo y taponando a presión los punzados inferiores. Si no han sido taponados los punzados superiores durante la operación de cementación remedial, el pozo podrá

producir, de lo contrario será necesario re-disparar o incluso incrementar nuevos disparos hacia arriba si la zona de interés lo permite, para que produzca.

### **3.6.7. Operaciones de cementación remedial**

La cantidad de cemento requerida en las operaciones de cementación remedial es variable. Se considera que es una función del comportamiento hidráulico de los fluidos inyectados a las rocas en el subsuelo y del espesor de la formación.

Si la presión de admisión es alta, mayor a los 3000 PSI, la cantidad de cemento a utilizar será de 60 sacos y la inyección de la lechada a la formación se hará lo más rápido posible.

Si la presión de admisión esta entre 150 PSI y 2750 PSI, la cantidad de cemento a utilizar será de 100 sacos y la lechada se inyectará la formación a una tasa promedio de 1.5 Bbl/min.

Si la presión de admisión es baja o menor a 1000 PSI, se utilizaran de 120 a 160 sacos de cemento y la inyección de la lechada se hará a tasas de 0.5 1.0 Bpm. Si encontramos una zona de perdida muy severa, se recomienda que cuando la lechada salga de la tubería de producción, desplazarla por intervalos de tiempo de 5, 10 y 15 minutos e incluso hasta 30 minutos, cerrando y abriendo las válvulas de control hasta lograr que se forme un frente de cemento en la formación que permita concluir la operación con una presión final aceptable.

Existen formaciones de arena con intercalaciones de arcilla que presentan cierta elasticidad al momento de inyectar los fluidos a la formación, de manera que la roca almacenadora sufre un aumento de volumen (hinchamiento) al recibir el fluido. Cuando se deja de inyectar y de ejercer presión, la roca recupera su estado original, comprimiendo y expulsando parte o la totalidad de los fluidos inyectados. Para formaciones de este tipo, es recomendable el uso de un retenedor de cemento.

Si al finalizar la prueba de inyectividad con 10BLS. de fluido y no hay retorno del mismo se puede efectuar la cementación remedial con herramientas RTTS

A profundidades mayores de los 8000 pies y en trabajos de cementaciones remediales donde los estratos de la formación están poco consolidados y expuestos al regreso de fluidos de la formación, se recomienda el uso del retenedor de cemento (Cement Retainer). También en zonas con presencia de formaciones arcillosas y elásticas, que pueden originar retorno de los fluidos de la formación al pozo.



## CAPITULO IV

### CEMENTACION DE TECNOLOGIAS CemNET, DensCRETE, LiteCRETE, ULTRALiteCRETE

#### 4.1. CEMENTACIÓN TECNOLOGÍA

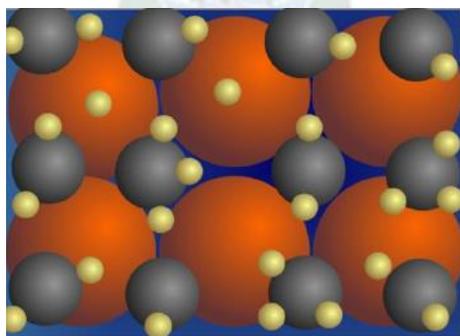
El diseño de lechadas con cantidades necesarias de aditivos, más ciertas cantidades de partículas o polímeros, que ayudaran a una mejor consistencia de la lechada, mejorando su reología como la suspensión, logrando así una menor porosidad y permeabilidad a la vez que restringe la perdida de agua de mezcla, haciendo de esta una buena cementación de las paredes de la formación.

Para el Ecuador, estas son nuevas tecnologías aplicables en la cementación de los pozos, donde se explicara algunos tipos de lechadas para estos campos que tienen las características necesarias para utilizarla.

#### 4.2. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Es una Tecnología que utiliza la distribución del tamaño de las partículas (Fig. 5.1), diseñadas para aumentar el contenido de sólidos del polvo, disminuyendo el espacio perdido entre los granos. Por ingeniería la composición química de los granos de cemento, así como su tamaño, con lo que mayores niveles de lechada de cemento y el rendimiento conjunto son alcanzables.

**FIGURA 4.1 Arreglo de partículas CemCRETE.**



**FUENTE: Paper Tecnología CemCRETE Schlumberger**

Usando PVF (Fracción de Volumen de Empaque), se puede lograr en un diseño de la lechada dado que los aditivos necesarios (pérdida de líquido, etc.) será menor; la proporción de partículas optimizado presenta el efecto de rodamiento de bolas, una reología mejor para la suspensión. Además, un alto contenido de sólidos convierte directamente en una menor porosidad de la suspensión y baja permeabilidad. Embalaje optimizado (es decir partículas del medio de llenado en los huecos entre las partículas gruesas y luego las partículas finas de relleno en los huecos dejados entre el medio y las partículas gruesas) significa que hay una red de partículas que impedirá cualquier sedimentación de las partículas individuales dentro de la masa de las partículas y también restringir el agua de la mezcla salga fácilmente.

Los espacios vacíos se llenan con partículas y la porosidad es inferior para un 40 a 45% en comparación con una clase G ordenada de 59% de porosidad.

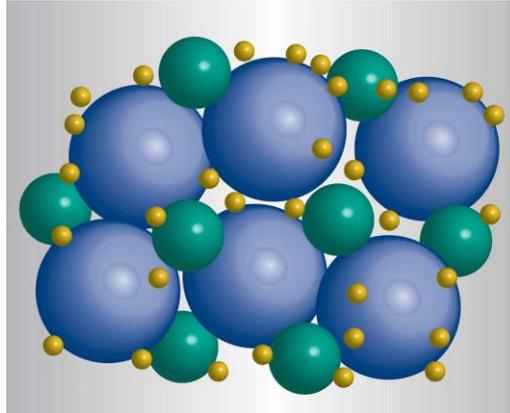
#### **4.2.1. CemNET**

La tecnología de cementación de pozos de petróleo a base de concreto CemCRETE aumenta el contenido de sólidos de la lechada mediante la distribución del tamaño de partículas. Las partículas más pequeñas llenan el vacío entre las partículas más grandes y requieren menos agua. Esto da como resultado una lechada de cemento con propiedades de flujo mejoradas y excelentes propiedades de fraguado, como permeabilidad y resistencia. Una relación de agua a cemento más baja durante la mezcla y el bombeo permite un mayor rendimiento a largo plazo.

Ofertas de tecnología CemCRETE

- Más sólidos en su cemento
- Mayor resistencia a la compresión
- Reducción de la permeabilidad del cemento
- Mayor resistencia a los fluidos corrosivos.

**FIGURA 4.2 Arreglo de partículas CemCRETE.**



**FUENTE: Paper Tecnología CemCRETE Schlumberger**

Las lechadas de cemento estándar requieren agua para llenar el vacío entre las partículas. Las lechadas CemCRETE llenan el vacío entre partículas con más sólidos, lo que proporciona propiedades de cemento superiores.

#### **4.2.2. DensCRETE**

En el sistema DensCRETE, la alta temperatura y alta presión de cementación se simplifica. Este sistema tiene un rango de 17 - 24 libras / galón, 3,3 SG (gravedad específica) que se puede diseñar con menores concentraciones de aditivos, tiene una estabilidad mejorada y mejora las propiedades de los fluidos, lo que da un mejor control del pozo durante la cementación.

En lechadas pesadas alcanza buenos valores reológicos, usado con un aditivo TXI para cementos ligeros, posee una alta fuerza de compresión, lo cual puede alcanzar 14000 PSI en 24 horas.

Las aplicaciones de esta lechada son:

- Posición de tapones en formaciones duras
- Alta presión en medio poroso
- Ambiente corrosivo

El rango de densidades puede variar dependiendo del tipo de aditivo que se utilice, por ejemplo:

De 17 a 21 lbm / gal (extensión a 28 lbm / gal es posible).

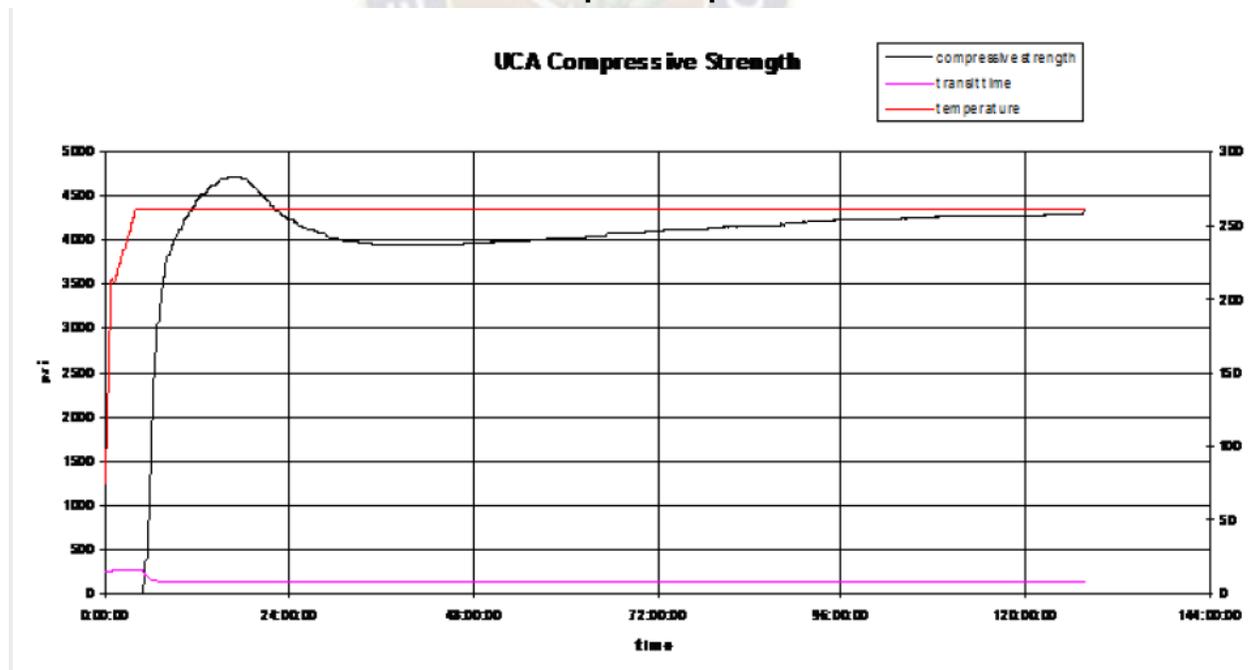
De 17 a 17.5 lbm / gal: la mezcla seca de D166 - Cemento - D178.

De 17 a 24 lbm / gal: la mezcla seca de D165/D166 - cemento - D178 D157.

(Micromax - tetróxido de manganeso) podría ser añadido después del agua de mezcla para aumentar la densidad. Se podría añadir en la mezcla seca para mejorar la estabilidad durante los 300° F.

Las principales características están en la colocación o puesta de la lechada, que es el principal problema, incrementa el SVF (fracción de volumen sólidos), el uso de D153 o bentonita, existiendo un compromiso entre la fracción en volumen en lechada solida y viscosidad plástica.

**FIGURA 4.3 Fuerza de Compresión por el Sistema Uca.**



**FUENTE: Paper Tecnología CemCRETE Schlumberger.**

Esta tecnología aplica a bajas presiones de fricción, presiones bajas de colocación, tasas de colocación altas, tiempos bajos de WOC (Tiempo de espera para el fraguado) y reduce los costos de cementación.

#### 4.2.3. LiteCRETE

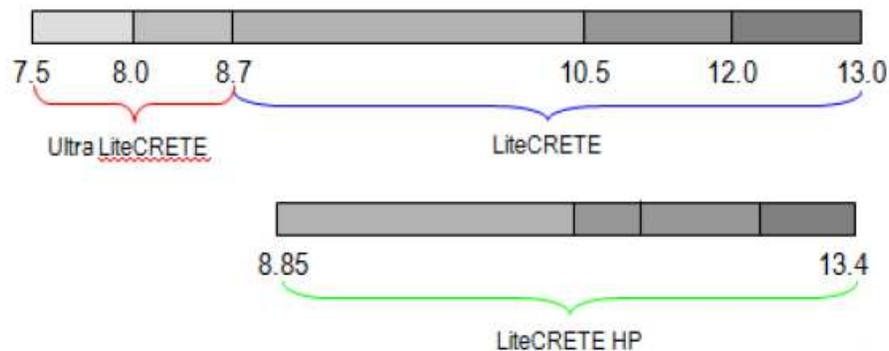
Este es un tipo de lechada liviana, con muy baja densidad (figura 5.3) que se mezcla para producir lechadas entre 7,5 y 13,4 lbm / gal. La densidad de la lechada para el sistema está determinada por la densidad de mezcla seca. Para obtener densidades de diferentes mezclas de partículas donde se utilizan en diversas proporciones.

Para simplificar la selección, las densidades de los purines se dividen en 4 partes. Se debe recordar que estas partículas son selecciones para un diseño de la lechada buena. Sin embargo, alguna desviación del diseño es posible, pero las pruebas a fondo se pueden hacer.

Los rangos de densidades de lechada son:

- <8,7 ppg
- 8,7 -10,5 ppg
- 10,5 a 12,0 ppg
- 12,0 a 13,0 ppg

**FIGURA 4.4 Cuadro de densidades LiteCRETE.**



**FUENTE: Paper Tecnología CemCRETE Schlumberger**

Todos los sistemas usan partículas gruesas, medianas y finas, en los siguientes sistemas se describen las partículas que se utilizaran:

#### **4.2.4. ULTRALiteCRETE**

Este sistema utiliza partículas medias, finas y micro finas.

Esta lechada está por debajo de 8,0 lbm / gal y se compone de los siguientes componentes:

La mezcla tri-modal se compone de los siguientes componentes:

Micro-fino: D163 - Micro-cemento – BVOB (por el volumen de mezcla) 12.8% que se tiene una buena resistencia a la compresión.

Fina: D189 (preferible) o Clase G - 08.12% de cemento BVOB de resistencia a la compresión adicional

Media - D188 - Micro-burbujas de vidrio: 80-85% BVOB (por el volumen de mezcla). La densidad de estas partículas se fija en 0,38 SG + / - 0,02 SG.

El límite de presión es de 4000 PSI. Pero D188 no se rompe antes de 2000 psi. El tamaño es de 40 micras. El BVOB% (porcentaje del volumen de mezcla) de D188 se ajusta para alcanzar la densidad de la lechada. El BVOB en porcentaje del micro-cemento a continuación, afectada en consecuencia. La disminución de la BVOB% de la D188, aumenta la BVOB en porcentaje de cemento y consiguiente mejora la resistencia a la compresión.

A continuación 8.7 lbm / gal se compone de los siguientes componentes:

En sistemas convencionales de LiteCRETE, la mezcla de tri-modal se compone de los siguientes componentes:

Fina: D163 o D189 - Micro / Fina de cemento - BVOB> 10% (D163), BVOB> 14% (D189) que tienen buena resistencia a la compresión.

Media - D188 - Micro-burbujas de vidrio: + / - 30% BVOB. La densidad de estas partículas se fija en 0,38 SG + / - 0,02 SG.

Grueso: D124 - LITEFIL: BVOB 55%. Este porcentaje se fija en la formulación de fabricación.

Para el diseño de LiteCRETE, entre 8,7 y 10,5 lbm / gal La mezcla es el mismo que el anterior, excepto el hecho de que partículas del medio 2 se utilizan: Clase G y D188. D124 se ha fijado en un 55% BVOB. BVOB% de D188 se utiliza para ajustar la densidad de la lechada. El cemento Clase G se ve afectada en consecuencia. Un mínimo del 10% de los BVOB D163 o D189 14% es necesario para diseñar lechadas LiteCRETE competentes en estos intervalos de densidad.

Nota: En la densidad 10lbm/gal, hay un cambio en componentes de la mezcla a fin de lograr la densidad requerida. Para obtener la densidad requerida y embalaje fracción de volumen, es necesario utilizar D124 (grueso), D179 (versión medianas empresas de la D124), la Clase G (medio) y D189 (muy bien). Por debajo de 10 lbm / gal, hay entonces un desplazamiento hacia el uso D188, sin embargo, el costo interno de D188 es alta, así que donde D179 puede ser utilizado a bajas densidades, un costo menor de mezcla se puede lograr, sino que se venden al cliente en el mismo que el anterior D188 que contiene el precio de mezcla.

En sistemas convencionales de LiteCRETE, entre 10.5-13 lbm / gal, la mezcla de tri-modal se compone de los siguientes componentes: Fina: D178 - sílice cristalizada: BVOB 10% Medio: Clase de cemento G: 35% BVOB Grueso: D124 - LITEFIL: BVOB 55%. LITEFIL cenosferas son huecos (subproducto de las centrales eléctricas que utilizan carbón). Por lo tanto, las esferas LITEFIL tienen una limitación de presión de 5000 psi.

La densidad de LITEFIL normalmente varía entre 0,68 a 0,85 SG. En la calculadora de la CemCRETE BVOB% LITEFIL se ajusta para llegar a la densidad de la lechada. Por ejemplo, 10.5 lbm / gal mezcla LiteCRETE con un

57% la fracción de sólidos tiene + / - 63% de los BVOB LITEFIL. El BVOB% de LITEFIL depende también de la gravedad específica de la verdadera LITEFIL utilizado. En consecuencia, el más claro es el LITEFIL el menor que necesita para lograr la densidad de la suspensión diseñada. Para densidades entre 10-11 lbm / gal D154 o D155 se puede utilizar para mejorar la estabilidad y resistencia a la compresión.

Para aplicaciones de alta presión de D181 o D196 reemplaza al D124 (para >5000 psi), y el D195 reemplaza al D188 como la fracción de tamaño medio hasta al menos 10.000 PSI BHP.



## CAPITULO V

### FORMULACION DE LA LECHADA REMEDIAL CON LAS TECNOLOGIAS

#### 5.1. PREPARACIÓN DE LECHADA

##### 5.1.1. Calculo del volumen de la lechada y el rendimiento

Uno de los aspectos importantes de las operaciones de cementación, es tener la cantidad de agua disponible para formar la lechada de cemento. Para dicho cálculo, se requiere conocer la densidad y el volumen de la lechada de cemento y el rendimiento. Los cálculos principales requeridos para un trabajo de cemento son:

La cantidad de lechada requerida para llenar el espacio anular fuera de la tubería de revestimiento, hasta la altura programada.

Los esquemas son invaluable para clarificar los volúmenes requeridos incluyendo detalles con respecto a las capacidades anulares (agujero descubierto y agujero descubierto con tubería de revestimiento), diferentes grados de tubería de revestimiento, longitud de las secciones, etc.

En todos los cálculos de cemento es necesario conocer el rendimiento:

$$\eta = \frac{V_{lechada}}{7,48 [gal/ft^3]} \quad Ec. 5.1$$

Dónde:

$\eta$  = Rendimiento de la lechada [ $ft^3/saco$ ]

$V_{lechada}$  = Volumen de la lechada [ $gal/saco$ ]

Para determinar el número de sacos de cemento con la siguiente formula:

$$Nro_{sacos} = \frac{V_{lechada}}{\eta} \quad Ec. 5.2$$

Dónde:

$Nro_{sacos}$  = Numero de sacos de cemento [*saco*]

$V_{lechada}$  = Volumen de la lechada [*l*]

$\eta$  = Rendimiento [*l/saco*]

### 5.1.2. Determinación del contenido de agua en la lechada.

#### • Agua libre

Una vez que se ha preparado la lechada en el mezclador, se le agita en un consistometro a presión atmosférica; se vuelve a pasar por el mezclador, y luego se le deja en un cilindro de vidrio graduado de 250ml, perfectamente acumulado de agua en la parte del recipiente, ese volumen de agua expresado en mililitros, es el contenido de agua libre de la lechada.

#### • Agua normal

El contenido de agua normal de una lechada de cemento es lo que cede una lechada que tiene 11 unidades de consistencia, luego de haber sido agitada durante 20 minutos, a 80°F de temperatura en un consistometro a presión atmosférica.

#### • Agua mínima

El mínimo contenido de agua de una lechada es aquel que logra una consistencia de 30 unidades luego de haber sido agitada durante 20 minutos en un consistometro a presión atmosférica y 80°F de temperatura.

Por lo general, las pruebas de contenido de agua se hacen con cementos puros, porque agregar aditivos puede hacer variar la consistencia de la lechada, sin cambiar el porcentaje de agua.

### 5.1.3. Determinación de la densidad

La densidad de una lechada en todos los trabajos de cementación, excepto en las cementaciones a presión, debe ser lo suficientemente elevada para controlar el pozo.

En las operaciones de campo, la densidad se controla con equipos electrónicos, los cuales en tiempo real y en forma continua monitorean este parámetro durante la operación.

$$\rho_{lechada} = \frac{94 + w_{aditivo} + (8,33 * V_{agua})}{V_{lechada}} \quad Ec. 5.3$$

Dónde:

$\rho_{lechada}$  = Densidad de la lechada [*lb/gal*]

$V_{lechada}$  = Volumen de la lechada [*gal/saco*]

$w_{aditivo}$  = Peso del aditivo [*lb*]

$V_{agua}$  = Volumen de agua /saco

### 5.1.4. Pruebas de permeabilidad

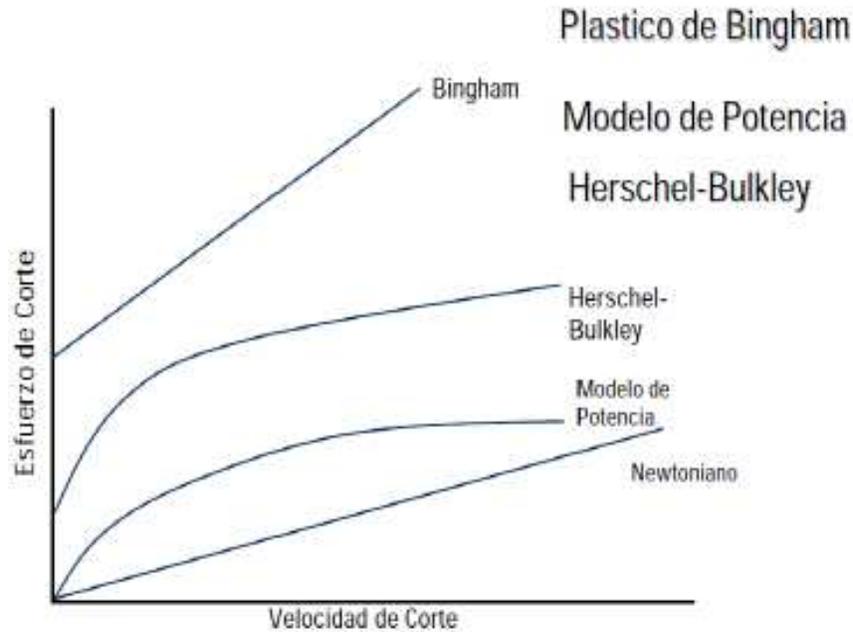
Se utiliza un viscosímetro o también en el equipo UCA que mide la permeabilidad de las muestras de cemento fraguado de acuerdo a la ley de darcy.

### 5.1.5. Determinación de las propiedades reológicas

La reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia o, más precisamente, de los fluidos. Por medio de la observación y del conocimiento del campo de deformación aplicado, el técnico puede en muchos casos desarrollar una relación constitutiva o modelo

matemático que permite obtener, en principio, las funciones materiales o propiedades que caracterizan el material.<sup>3</sup>

**FIGURA 5.1 Modelos Reológicos**



**FUENTE: Halliburton Energy Institute, (2011) Book 2- Formation Evaluation and Cement.**

$$\text{Esfuerzo de corte} = \frac{\text{fuerza}}{\text{area}} \left[ \frac{\text{dynas}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{Ec. 5.4}$$

$$\text{Velocidad de corte} = \frac{\text{Velocidad relativa} \left( \frac{\text{pies}}{\text{sec}} \right)}{\text{distancia relativa} \left( \text{pies} \right)} \left[ \text{sec}^{-1} \right] \quad \text{Ec. 5.6}$$

$$\text{viscosidad} = \frac{\text{esfuerzo de corte} \left[ \text{Dynas/cm}^2 \right]}{\text{velocidad de corte} \left[ \text{sec}^{-1} \right]} \quad \text{Ec. 5.7}$$

Determinación de propiedades reológicas

<sup>3</sup> Nicolas Yopez Carrillo, "factibilidad de la cementación de zonas productoras con tecnología CemCRETE en los campos VHR y Cuyabeno"; 2012.

Bingham

$$\mu_p = 150 * F(\theta_{300} - \theta_{100}) \quad \text{Ec. 5.8}$$

$$\tau_0 = F(\theta_{300} - \mu_p) \quad \text{Ec. 5.9}$$

Ley de Potencia  $n = 2.096 * \log_{10} \left( \frac{\theta_{300}}{\theta_{100}} \right) \quad \text{Ec. 5.10}$

$$k = (F * \theta_{300}) * (100 * 511^n) \quad \text{Ec. 5.11}$$

Obtenemos valores de “n” y “k” los mismos que tienden a 1 y 0 respectivamente para que la lechada reúna requisitos para el flujo y bombeabilidad.

#### **5.1.5.1. Viscosidad**

La viscosidad se puede describir como la resistencia al flujo de una sustancia.

##### **•Viscosidad plástica**

Se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica y es principalmente afectada por el porcentaje volumétrico de sólidos en el lodo.

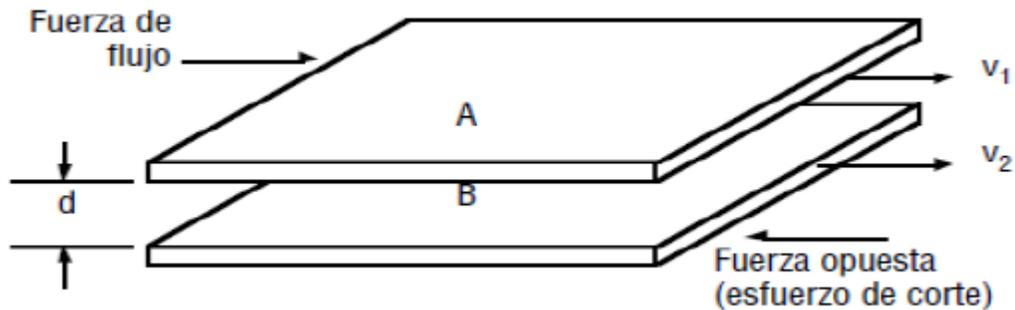
##### **•Esfuerzo de corte**

El esfuerzo de corte ( $\tau$ ) es la fuerza requerida para mantener la velocidad de corte. El esfuerzo de corte está expresado en unidades estándar del campo petrolífero, es decir las libras de fuerza por cien pies cuadrados (lb/100 pies<sup>2</sup>) requeridas para mantener la velocidad de corte.

##### **•Velocidad de corte**

La velocidad a la cual una capa pasa por delante de la otra capa se llama velocidad de corte, por lo tanto, la velocidad de corte ( $\gamma$ ) es un gradiente de velocidad.

**FIGURA 5.2 Velocidad de corte y esfuerzo de corte**



**FUENTE: (MI-Swaco, 2001)**

- **Tixotropía**

La tixotropía es la propiedad demostrada por algunos fluidos que forman una estructura de gel cuando están estáticos, regresando luego al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte.

#### **5.1.5.2. Viscosidad y contenido de agua de la lechada**

En las cementaciones, las lechadas de cemento deben tener una viscosidad o consistencia que permita una buena adherencia del cemento con la formación y la tubería.

Una de las propiedades de los fluidos es la (Viscosidad plástica), que es la resistencia del fluido a fluir medida en centipoises (cP) o milipascales – segundo (mPa\*s) a partir del viscosímetro de lodo para medir las tasas de corte a 600 y 300 (rpm) y a partir de la diferencia de estas se emplea la fórmula:

$$V(cP) = \theta_{600} - \theta_{300} \quad \text{Ec. 5.12}$$

#### **5.1.6. Estructura del diseño de cementación remedial**

Se determina el volumen total de la lechada cemento a ser mezclada en superficie, este volumen se determina por medio de los volúmenes que ocupan

tanto el espacio anular como el Rat Hole para lo cual se emplean las siguientes formulas:

$$V_{lechada} = V_{EA} + V_{RH} \quad Ec. 5.13$$

Volumen de espacio anular:

$$V_{EA} = \frac{OD_{OH}^2 - OD_{casing}^2}{1029,4} * L \quad Ec. 5.14$$

Volumen en Rat Hole:

$$V_{RH} = \frac{ID_{casing}^2}{1029,4} * L \quad Ec. 5.15$$

Dónde:

$V_{lechada}$  = Volumen de lechada [Bbl]

$V_{EA}$  = Volumen del espacio anular [Bbl]

$V_{RH}$  = Volumen del rat hole [Bbl]

$OD_{OH}$  = Diámetro exterior de open hault [pulg]

$OD_{casing}$  = Diámetro exterior casing [pulg]

$ID_{casing}$  = Diámetro interior casing [pulg]

L = Longitud de la cañería [ft]

- **Volumen de desplazamiento**

Para el diseño se consideran una gran variedad de Drill Pipes que deben ser seleccionados de acuerdo al diámetro de las cañerías o liner de producción, estos Drill Pipe son empleados como tubos de fondos que se utiliza para garantizar una buena colocación de la lechada en la zona el número de estas

dependen del número de cañerías de diferente diámetro y la profundidad del pozo; además, permite asentarse en un tapón retenedor de cemento.

$$V_{desplazamiento} = NV_{DP} + 10Bbl \quad Ec. 5.16$$

Dónde:

$V_{desplazamiento}$  = Volumen de desplazamiento [Bbl]

10 barriles en las líneas de superficie y como margen de seguridad.

$NV_{DP}$  = El número de volúmenes de Drill pipe [Bbl]

#### 5.1.6.1. Tiempo de bombeo

Es el tiempo que la lechada puede ser bombeada utilizando presiones razonables; como factor importante en el desplazamiento de cemento y su colocación en el espacio anular para el tiempo de bombeo se considera:

El tiempo de operación conformado por tiempo de mezcla del cemento de 30 minutos, tiempo de bombeo de los fluidos a de terminados caudales y el tiempo de desplazamiento.

Determinación del flujo de salida de bomba considerando la velocidad de la bomba.

$$FSB \left( \frac{Bbl}{stk} \right) = 0,000243(\varnothing_{camisa}^2) * L * effc \quad Ec. 5.17$$

Dónde:

$FSB$  = Determinación del flujo de salida de la bomba (Bbl/stk)

$\varnothing_{camisa}$  = Diámetro de camisa [plg]

$L$  = Longitud [plg]

$effc$  = Eficiencia

Caudal de desplazamiento

$$Q_{Desplazamiento} = FSB * V_{bomba} \quad Ec. 5.18$$

Dónde:

$$Q_{Desplazamiento} = \text{Caudal de desplazamiento} [Bbl/min]$$

$$V_{bomba} = \text{Velocidad de bomba} \left( \frac{stk}{min} \right)$$

Con el dato obtenido determinamos el tiempo de desplazamiento:

$$T_{desplazamiento} = \frac{V_{desplazamiento}}{Q_{Desplazamiento}} \quad Ec. 5.19$$

Dónde:

$$T_{desplazamiento} = \text{Tiempo de desplazamiento} [min]$$

Reología de los fluidos por medio del modelo exponencial:

- Cálculo del índice de consistencia

$$n = 3,32 \log \left( \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right) \quad Ec. 5.20$$

Dónde:

n=índice de flujo

$\theta_{600}$ =lectura de Reómetro a 600RPM

$\theta_{300}$ =lectura de Reómetro a 300RPM

- Cálculo del índice de comportamiento del fluido:

$$K = \frac{510 * lectura \theta_{300}}{511^n} \quad Ec. 5.21$$

Dónde:

K= Índice de consistencia

$\theta_{300}$  = Lectura de reómetro a 300RPM

$n$  = Índice de flujo

- **Calculo de hidráulica**

**Calculo de la caída d presión en equipos de superficie**

$$\Delta P_S = 45,5617 * E * \rho^{0.8} * Q_{Bomba}^{1.8} * VP^{0.2} \quad Ec. 5.22$$

Dónde:

$\Delta P_S$  =Caída de presión por fricción en el equipo superficial [*psi*]

E=Constante superficial

$\rho$  =Densidad del fluido [ $\frac{lb}{gal}$ ]

$Q_{Bomba}$ =Caudal de bomba [ $\frac{gal}{min}$ ]

VP = Viscosidad plástica [*cp*]

- Velocidad al interior de la tubería

$$V_{Interior} = \frac{Q_{Bomba}}{2.45 * ID_{dp}^2} \quad Ec. 5.23$$

Dónde:

$V_{Interior}$  = Velocidad al interior de la tubería [*pie/min*]

$Q_{Bomba}$  = Caudal de la bomba. [ $\frac{gal}{min}$ ]

ID = Diámetro interior [*pulg*]

- Velocidad en el espacio anular

$$V_{EA} = \frac{Q_{Bomba}}{2.45 * (OD^2 - ID_{dp}^2)} \quad Ec. 5.24$$

Dónde:

$V_{EA}$  = Velocidad en el espacio anular [*pie/min*]

$Q_{Bomba}$  = Caudal de la bomba [ $\frac{gal}{min}$ ]

ID = Diámetro interior [*pulg*]

OD = Diámetro exterior [*pulg*]

**- Calculo del número de Reynold en el interior de la tubería**

$$N_{Re} = 1077.188 \frac{\rho * V * ID}{VP} \quad Ec. 5.25$$

Dónde:

$N_{Re}$  = Número de Reynolds.

$\rho$  = Densidad del fluido [*ppg*]

V = Velocidad interior de la tubería [ $\frac{pie}{min}$ ]

ID = Diámetro interior [*pulg*]

VP = Viscosidad plástica

**- Calculo del número de Reynold en el espacio anular**

$$N_{Re} = 1077.188 \frac{\rho * V * (OD - ID)}{VP} \quad Ec. 5.26$$

Dónde:

$N_{Re}$  = Número de Reynolds.

$\rho$  = Densidad del fluido [*ppg*]

V = Velocidad interior de la tubería [ $\frac{pie}{min}$ ]

ID = Diámetro interior [*pulg*]

OD = Diámetro exterior [pulg]

VP = Viscosidad plástica.

- Calculo del factor de fricción para flujo turbulento

$$f = \frac{0.079}{N_{Re}^{0.25}} \quad Ec. 5.27$$

Dónde:

f = Factor de fricción.

$N_{Re}$  = Numero de Reynolds.

- **Calculo de la caída de presión al interior de la tubería**

$$\Delta P_f = L * \frac{0.00246 * f * \rho * V^2}{ID} \quad Ec. 5.28$$

Dónde:

$\Delta P_f$  = Caída de presión por fricción [psi]

L = Longitud [pie]

f = Factor de fricción.

V = Velocidad.  $\left[\frac{pie}{min}\right]$

ID = Diámetro interior [pulg]

$\rho$  = Densidad del fluido [ppg]

- **Calculo de la caída de presión en el espacio anular**

$$\Delta P_f = L * \frac{0.00301 * f * \rho * V^2}{(OD - ID)} \quad Ec. 5.29$$

Dónde:

$\Delta P_f$  = Caída de presión por fricción [psi]

L = Longitud[*pie*]

f = Factor de fricción.

V = Velocidad. [ $\frac{pie}{min}$ ]

ID = Diámetro interior[*pulg*]

OD = Diámetro exterior[*pulg*]

$\rho$  = Densidad del fluido [*ppg*]

### 5.1.6.2. Determinación del tiempo de bombeabilidad

Determina durante cuánto tiempo la lechada permanece en estado fluido, (y por consiguiente bombeable) bajo una serie de condiciones dadas en el laboratorio. (Presión y Temperatura), es uno de los factores más influyentes en la actualidad el tiempo de espera del fragüe del cemento es de 24 horas pero algunas experiencias se puede decir que no es necesario más de 8 a 12 horas. La decisión del tiempo de bombeabilidad se basa en factores tales como: presión, temperatura, permeabilidad de la formación, perdidas de filtrado, profundidad, etc de acuerdo considerando:

- El tiempo de bombeabilidad considera el tiempo durante el cual la lechada de cemento puede ser bombeada y desplazada dentro del espacio anular.

- Asumiendo lo siguiente:

- Velocidad de mezcla de lechada (min).
- Caudal de desplazamiento (barriles por minuto).
- Tiempo de contingencia de (minutos) que permitiendo la presencia de fallas, problemas con el equipo.
- Margen de seguridad 30 (min) (incluye en tiempo de ubicación del cemento en el espacio anular).

$$T_{bombeabilidad} = \frac{V_{lechada}}{0.7} + \frac{V_{desplazamiento}}{Q_{desplazamiento}} + T_{ctg} + C \quad Ec. 5.30$$

Dónde:

$T_{bombeabilidad}$  =Tiempo de bombeabilidad [*min*]

$V_{lechada}$  = Volumen de la lechada [*Bbl*]

$Q_{desplazamiento}$  = Caudal de desplazamiento[*Bbl/min*]

$T_{ctg}$  = Tiempo de contingencia [*min.*]

$V_{desplazamiento}$  = Volumen de desplazamiento [*Bbl*]



## CAPITULO VI

### CALCULO Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA LA CEMENTACION REMEDIAL TRAMO LINER DE 7”

#### 6.1. SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA DEL POZO SABALO X-7

El objetivo planificado y realizado para la perforación del pozo Sábalo-7, es la de desarrollar las reservas de gas de los niveles naturalmente fracturados de las formaciones Huamampampa, Icla y Santa Rosa.

Se considera las características de cada una de las formaciones en relación al pozo piloto y a la rama superior del pozo.

**TABLA 6.1 Secuencia Estratigráfica Del Pozo Piloto Ramal Inferior**

POZO PILOTO									
X= 430,510.40m			Y=7,637,454.99 m		Zt=1,074.00 m		Zr=1,082.59 m		
Sistema	Formación	Estructuras	Cuerpo	Tope md (m)	Tope tvd (m)	Cota (mss)	Incl. Deg	Azi. Deg	
Carbonífero	Tarija/Chorro			Planchada	0	1082.59			
		Falla		111	111	971.59			
	Escarpment			111	111	971.59	0.23	304.89	
	Tarija/Chorro			400	400	682.59	1.03	304.89	
	Itacuami (T-2)			866.5	866.5	216.09	2.28	304.89	
	Tupambi			956.5	956.5	126.09	2.52	304.89	
				1338.8	1338.8	-256.21	3.50	304.89	
Devónico	Complejo Iquiri / Los Monos	Falla		1905	1902.7	-820.13			
		Falla		2515	2909.5	-1426.89			
		Falla		2993	2985.9	-1903.40			
		Falla		3287	3279.7	-2197.13			
		Falla		3708	3700.7	-2618.07			
		Falla		3872	3864.5	-2781.91			
					3872	3864.5	-2781.91		
	Huamampampa			H0	4256	4243.80	-3048	16.29	87.94
				H1	4274.5	4261.52	-3106	16.97	88.21
				H2A	4322.6	4307.23	-3398	19.45	88.53
				H2B	4382.8	4363.03	-3527	25.14	80.26
				H3	4436.0	4410.31	-3527	29.74	71.09
				H4	4482.4	4449.71	-3612	38.32	68.26
	Icla			I1	4601.8	4545.55	-3462.96	38.36	54.73
				I2	4666.0	4595.60	-3513.01	40.94	53.51
				llower	4948.6	4799.04	-3716.45	39.49	56.38
	Santa Rosa			SR1	5206.0	5001.42	-3918.83	36.83	58.94
			SR2	5293.0					
	Prof. Final			5380.0	5134.39	-4064.80	27.76	66.85	

**FUENTE: Elaboración propia en base a datos del Informe Final del pozo SBL X7.**

El Pozo Sábalo-7 es el segundo pozo multilateral de dos ramas perforado por Petrobras, siendo el primero en el Campo Sábalo.

**TABLA 6.2 Secuencia Estratigráfica Del Ramal Superior Del Pozo**

RAMA SUPERIOR								
Sistema	Formación	Estructuras	Cuerpo	Tope md (m)	Tope tvd (m)	Cota (mss)	Incl. Deg	Azi. Deg
	Complejo Iquiri / Los Monos			1338,8	1338,8	-256,21	3,50	317,73
Devónico	KOP			3842,0	3834,58	-2751,99	3,90	317,73
			H0	4272,0	4220,44	-3137,85	45,50	37,16
			H1	4292,0	4234,22	-3151,63	47,37	38,18
			H2A	4351,0	4272,65	-3190,06	54,00	38,09
			H2B	4441,0	4317,28	-3234,64	66,02	36,13
	Huamampampa		H3	4528,0	4343,61	-3261,02	77,41	36,12
			H4	4647,0	4355,71	-3273,12	85,60	32,26
			I	5004,0	4368,59	-3286,00	82,25	26,19
	Icla			5004,0	4368,59	-3286,00	82,25	26,19
	Prof. Final			5060	4377,26	-3294,67	80,64	25,09

**FUENTE: Elaboración propia en base a datos del Informe Final del pozo SBL X7.**

Los intervalos de la secuencia estratigráfica denotan la presencia de variadas características de las formaciones a considerar.

#### 6.1.1. Formaciones No Consolidadas

Las formaciones no consolidadas generalmente se encuentran en la parte superior del hueco, son arenas sueltas, gravas y limolitas que pueden fluir dentro del hueco, con frecuencia ocurren en profundidades someras.

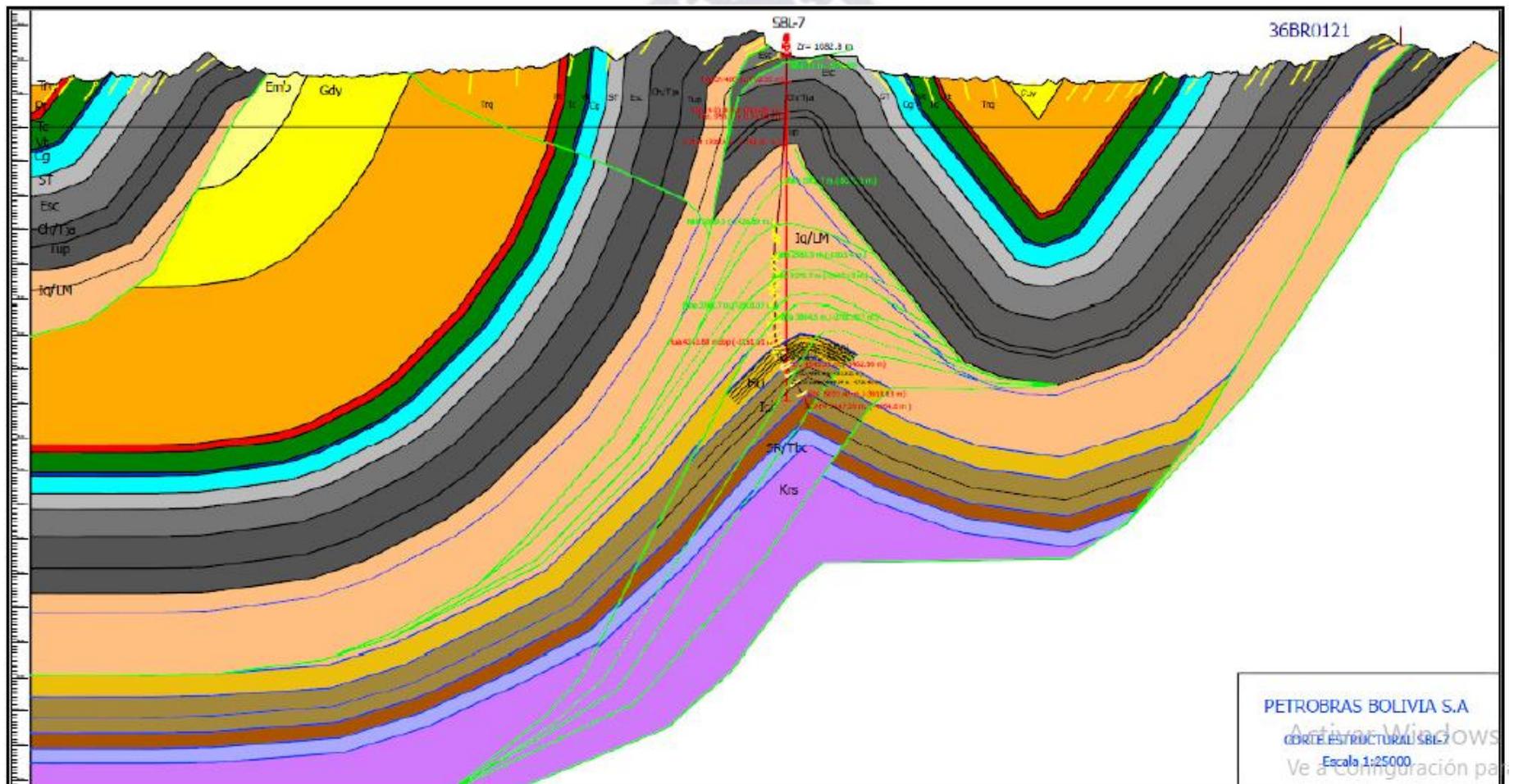
#### 6.1.2. Formaciones Reactivas

Las lutitas que contienen arcillas reactivas pueden reaccionar libremente con el filtrado del lodo, causando una deshidratación de las lutitas y un hinchamiento en las paredes del hueco.

### 6.1.3. Corte de Sección Estructural

Se identifica las formaciones que se tomarán en cuenta.

FIGURA 6.1 Corte de Sección Estructural



FUENTE: (Pascual, Vargas, C.Grudner, & Soriano, 2012)

Realizando el análisis de las formaciones pertenecientes al Devónico podemos identificar los mayores problemas en la formación Los Monos, esto se debe a las características que posee:

- Buzamiento natural de los estratos.
- Stress producido por las fuerzas tectónicas.
- Lutitas presurizadas por gas.

Es importante reconocer la inestabilidad en formaciones de lutitas que van cambiando ampliamente con los cambios de mineralogía y la estructura de la roca.

Los estratos arenosos de la Formación Huamampampa tienen las siguientes características:

- El tramo de interés se encuentra a condiciones profundas.
- El tramo de interés es altamente gasífero.

La formación Icla se encuentra dividida en tres unidades mayores en la base un paquete de arcilla de espesor denominado Icla inferior, que se denomina intervalo no productor.

#### **6.1.4 Geología del Tramo Liner 7”**

Se identifica el espesor de la formación Iquiri - Los Monos y el espesor de la formación Huamampampa, la cual se divide en cinco zonas H0, H1, H2A, H2B, H3 y H4 las mismas que se encuentran separadas por arcillas, siendo el de mayor espesor el que divide los reservorios H1 y H2. En la formación Huamampampa se identifica las zonas H0 y H1.

Los problemas en esta zona están relacionados a la inclinación de la formación, el cambio de secuencia de la formación y la inestabilidad a través del trayecto.

##### **6.1.4.1 Iquiri / Los Monos**

Formada por las siguientes características:

- Lutitas de color gris oscuro a negro grisáceo, micro micáceas, fractura astillosa a laminar, compactas, duras.
- Limolitas de color gris oscuro a gris medio oscuro.
- Areniscas de color gris medio claro con granos muy finos a finos y subredondeados,

#### **6.1.4.2 Huamampampa**

Está formada por dos características:

- Areniscas: Gris claro, ocasional blanquecino, cuarzo muy fino, menor fino, líticos oscuros, subredondeado, menor redondeado, buena selección, abundante matriz limosa, cemento siliceo, consolidada.
- Lutitas: Negro grisáceo, subfisil, fractura planar-irregular, micromicácea, compacta. Interlaminada con la limolita.

En relación a las dos formaciones en las cuales se va a cementar se tiene lo siguiente:

- Se identifica que la mayoría de los estratos están formados por areniscas, las cuales al tener una alta permeabilidad, podrían traer problemas.
- Al atravesar la formación Iquiri/Los Monos, la estructura podría tener derrumbes debido a la presencia de formaciones arcillosas, además de ser naturalmente fracturada.

#### **6.1.5. Configuración Final del Pozo**

En la Figura 6.2 se puede identificar en el ramal superior la ubicación del Liner 7”.

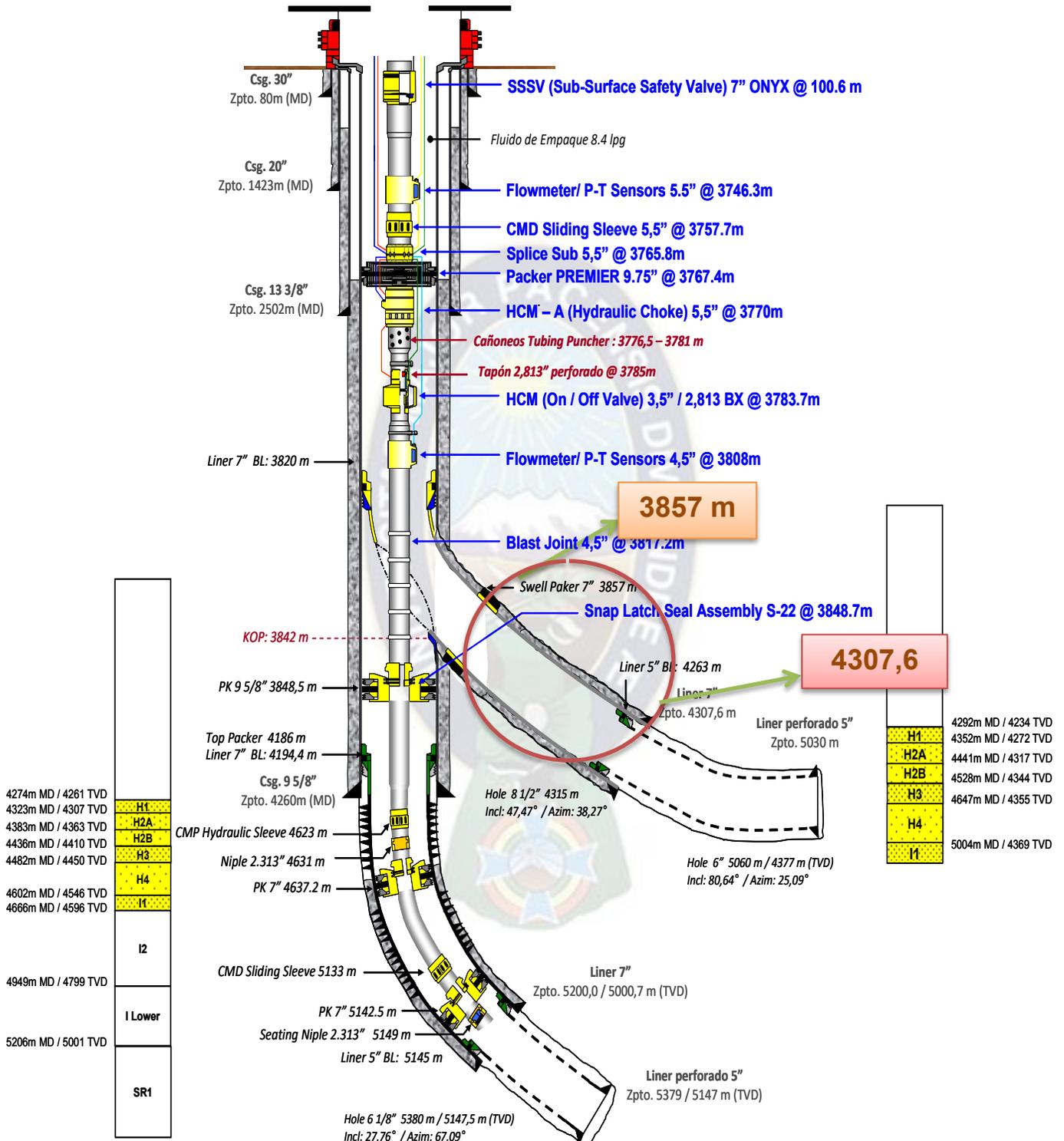
Las formaciones que se atravesó para lograr llegar a los reservorios presentan variaciones en cuanto a las características, presencia de fallas, formaciones no consolidadas, formaciones reactivas y el cambio mismo de la secuencia estratigráfica de una misma formación. Tales consideraciones se deben tomar en cuenta para el diseño de lechada de cementación.

A continuación, se precisará las características geológicas de los intervalos en los cuales existe una mala cementación en el liner 7”:

Los tramos a tomar en cuenta son: 3857m - 4307,6m de acuerdo a la información extraída del informe final del pozo Sabalo-X7, la cual se identificó una mala cementación, y mediante los registros se llegó a determinar la mala cementación como se muestra en la figura 6.3 Registro Caliper y Gamma Ray

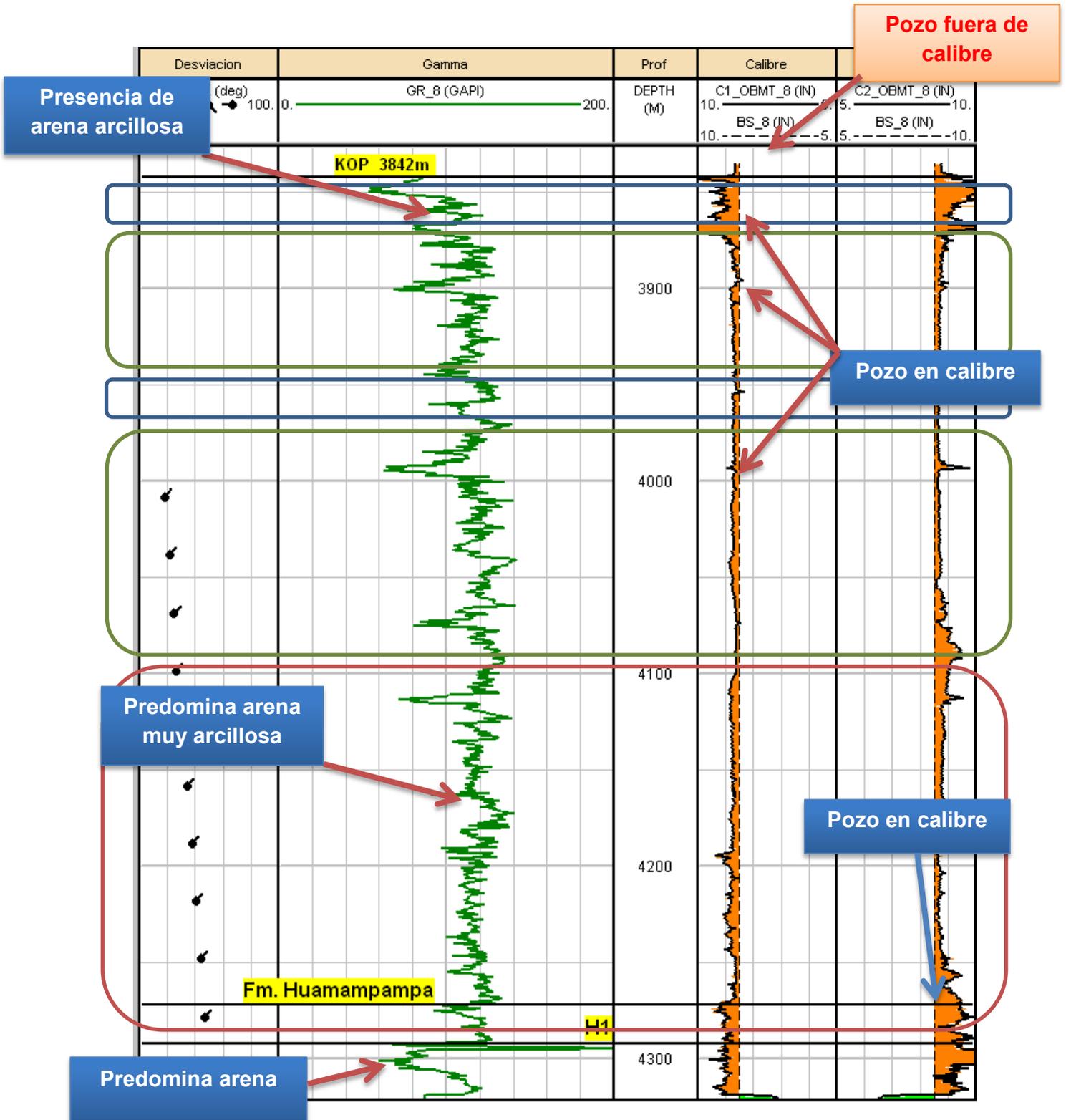


**FIGURA 6.2 Configuración Final del Pozo**



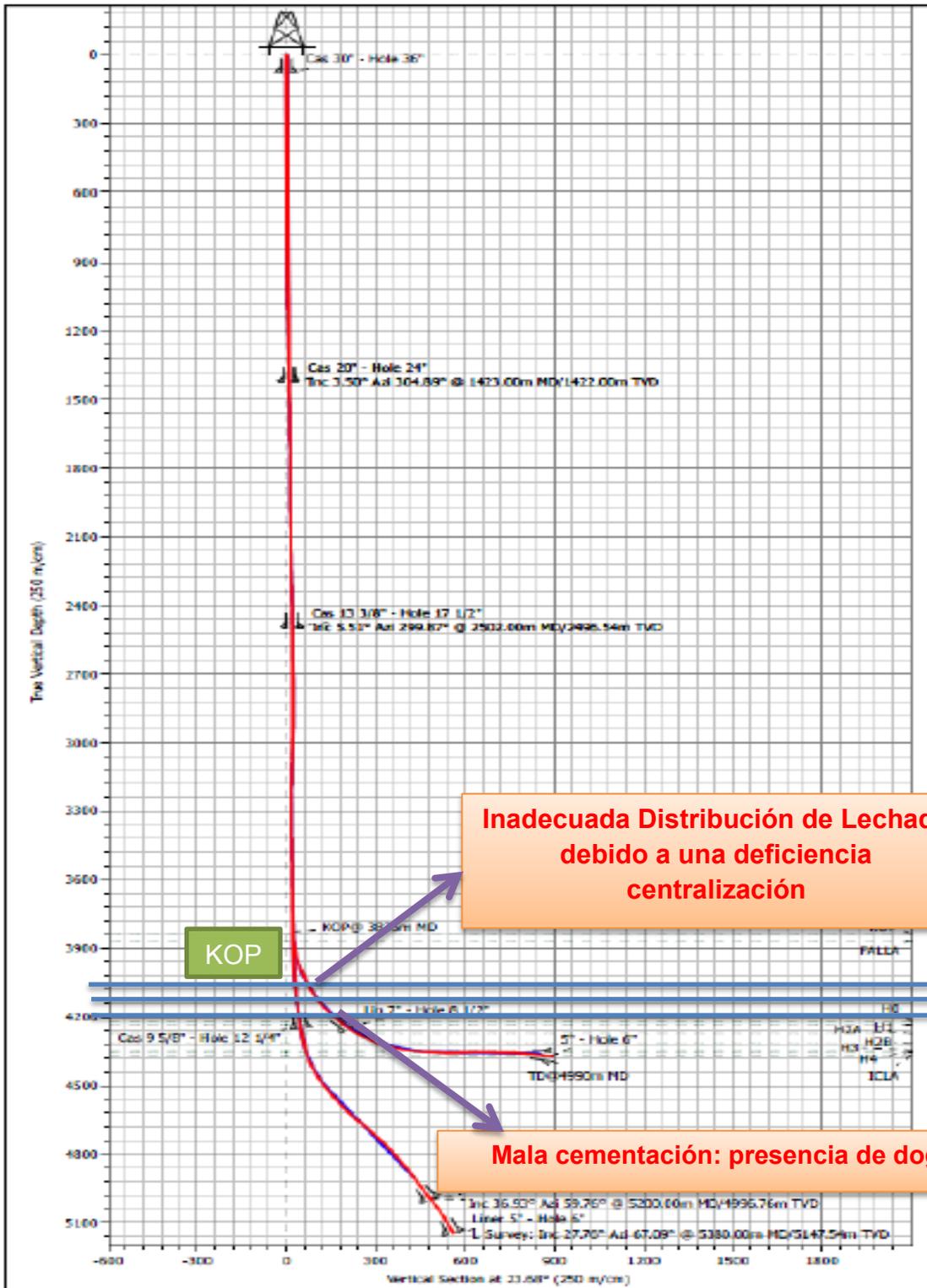
**FUENTE: (Pascual, Vargas, C.Grudner, & Soriano, 2012)**

**FIGURA 6.3 Registro Caliper y Gamma Ray del Liner 7" Ramal Superior**



FUENTE: (Pascual, Vargas, C.Grudner, & Soriano, 2012)

**FIGURA 6.4 Sección Vertical del Pozo SBL-X7**



FUENTE: (Pascual, Vargas, C.Grudner, & Soriano, 2012) (Modificación propia)

En el liner de 7" del ramal superior con una profundidad de 3857m - 4307,6 m, se identifica un cemento pobre, pero con anillos que hacen sello en la cañería en los tramos comprendidos, debido a que fue difícil mejorar la centralización cerca al colgador del liner, debido a sus herramientas que se utilizó para tal efecto.

En el tramo de 3857m - 4307,6 m, se tiene un dog leg elevado lo que puede llegar a ocasiona una pobre centralización y por lo tanto una mala cementación.

## 6.2. CÁLCULO Y FORMULACIÓN DE LECHADA DE CEMENTO

### 6.2.1. Balance de materia para formulación de lechada.

#### Características de los diferentes aditivos utilizados para la formulación de lechada

Para la formulación de las cuatro lechadas de cemento se empleó la misma clase de cemento usado para la cementación inicial; un cementó clase "G", como un tipo de cemento comúnmente utilizado que alcanza hasta 8000 pies de profundidad y trabaja hasta 200 °F, que puede ser modificada para un amplio rango de presiones y temperaturas.

**TABLA 6.3 Aditivos Aplicados Para Formulación de Lechadas de Cemento  
Fibras CemNET**

<b>FIBRAS CEMNET</b>					
-Capacidad para dispersarse fácilmente en la lechada de cemento.					
-Recubiertas con surfactante que mantienen las fibras unidas cuando están secas pero que además las ayudan a dispersarse y mezclarse sin mezclar cuando se incorporan a la lechada.					
En concentraciones optimas, no alteran las propiedades críticas de la lechada o del cemento, tales como tiempo de densificación, propiedades reologicas, perdida de fluido, contenido de agua libre, resistencia a la tracción, resistencia a la cizalladura y resistencia a la compresión.					
<b>ADITIVO (PROPIEADES)</b>					
<b>CLORURO</b>	<b>DE</b>	BARITINA	CARBONATO	<b>DE</b>	SURFACTANTE
<b>SODIO</b>		(DENSIFICANTE)	CALCIO		-Efectos contrapresión y

<p><b>(EXPANDIDOR)</b> <b>(CONDUCTOR)</b></p> <p>-Modifica el tiempo de bombeabilidad de diferente forma dependiendo de la concentración.</p> <p>- Acelera el proceso de endurecimiento de lechada.</p> <p>- Favorece la adherencia del cemento a formaciones.</p> <p>-Produce ligera expansión.</p> <p>- Actúa como dispersantes en las lechadas reduciendo su viscosidad,</p>	<p>-Son usados para alcanzar densidades de lechada por encima de las 18 lb/gal.</p> <p>- Usado en zonas con sobrepresión.</p>	<p><b>(DENSIFICANTE Y PUENTE)</b></p> <p>-Controlan la perdida de fluido en las salmueras o en fluidos de perforación.</p> <p>-Para control de perdidas actuando como puente en los poros y fracturas de formación usado en reparación de pozos, minimiza perdidas de fluido a la formación durante la circulación y en condiciones estáticas.</p>	<p>anti filtración.</p> <p>- Dispersante y emulsionante.</p> <p>- Disminución de la tensión superficial de la fase liquida y la adsorción del surfactante sobre las partículas de cemento permiten mejorar su dispersión en agua, evitando la floculación.</p>
---	---	--	--

**FUENTE: Elaboración propia en función a Shlumberger**

**TABLA 6.4 Aditivos Aplicados para Formulación de Lechadas de Cemento LiteCRETE.**

<b>LITECRETE</b>
<p>Lechada de baja densidad, como cementación ligera de alta eficiencia mejora el aislamiento de las formaciones, o exceden el bajo gradiente de fractura de la formación permeabilidad del cemento fraguado es menor pesar de sus bajas densidades, estas nuevas lechadas ultraligeras logran la baja permeabilidad y alta resistencia a la compresión.</p>

<p><b>BENTONITA (EXTENDEDOR)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Se la pueden usar en seco o prehidratada.</li> <li>-En reologia mantiene buenas propiedades aun a bajas densidades.</li> <li>-Aumenta su eficiencia cuando se hidrata previamente.</li> <li>- En la medida que incrementa el porcentaje de bentonita la densidad de la lechada baja e incrementa el rendimiento, pero cae la resistencia e incrementa la permeabilidad.</li> </ul>	<p><b>CLORURO DE POTASIO (EXPANDIDOR)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Eficiente estabilizador de las arcillas.</li> <li>-el filtrado de las lechas que lo contienen sea compatible con la mayoría de los aceites.</li> </ul>
	<p><b>CARBONATO DE CLACIO</b></p>
	<p><b>SURFACTANTE</b></p>

**FUENTE: Elaboración propia en función a Shlumberger**

**TABLA 6.5 Aditivos Aplicados para Formulación de Lechadas de Cemento  
DensCRETE**

<p><b>DENSCRETE</b></p>
<p>En el sistema DensCRETE, la alta temperatura y alta presión de cementación se simplifica. Este sistema tiene un rango de 17 - 24 libras / galón, 3,3 SG (gravedad específica) que se puede diseñar con menor concentraciones de aditivos, tiene una estabilidad mejorada y mejora las propiedades de los fluidos, lo que da un mejor control del pozo durante la cementación. En lechadas pesadas alcanza buenos valores reológicos, usado con un aditivo TXI para cementos ligeros, posee una alta fuerza de compresión, lo cual puede alcanzar 14000 PSI en 24 horas.</p>

<p>El rango de densidades puede variar dependiendo del tipo de aditivo que se utilice, por ejemplo:</p> <p>De 17 a 21 lbm / gal (extensión a 28 lbm / gal es posible).</p> <p>De 17 a 17.5 lbm / gal: la mezcla seca de D166 - Cemento - D178.</p> <p>De 17 a 24 lbm / gal: la mezcla seca de D165/D166 - cemento - D178 D157.</p>	<p>. Las aplicaciones de esta lechada son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posición de tapones en formaciones duras</li> <li>• Alta presión en medio poroso</li> <li>• Ambiente corrosivo</li> </ul> <p>(Micromax - tetróxido de manganeso) podría ser añadido después del agua de mezcla para aumentar la densidad. Se podría añadir en la mezcla seca para mejorar la estabilidad durante los 300° F.</p> <p>Esta tecnología aplica a bajas presiones de fricción, presiones bajas de colocación, ratas de colocación altas, tiempos bajos de WOC (Tiempo de espera para el fraguado) y reduce los costos de cementación</p>
--	---

**FUENTE: Elaboración propia en función a Shlumberger**

**TABLA 6.6 Aditivos Aplicados para Formulación de Lechadas de Cemento  
UltraLICRETE**

<b>ULTRALICRETE</b>
<p>Este sistema utiliza partículas medias, finas y micro finas.</p> <p>Esta lechada está por debajo de 8,0 lbm / gal y se compone de los siguientes componentes:</p> <p>La mezcla tri-modal se compone de los siguientes componentes:</p> <p>Micro-fino: D163 - Micro-cemento – BVOB (por el volumen de mezcla) 12.8% que se tiene una buena resistencia a la compresión.</p>

Fina: D189 (preferible) o Clase G - 08.12% de cemento BVOB de resistencia a la compresión adicional

Media - D188 - Micro-burbujas de vidrio: 80-85% BVOB (por el volumen de mezcla). La densidad de estas partículas se fija en 0,38 SG + / - 0,02 SG.

El límite de presión es de 4000 PSI. Pero D188 no se rompe antes de 2000 psi. El tamaño es de 40 micras. El BVOB% (porcentaje del volumen de mezcla) de D188 se ajusta para alcanzar la densidad de la lechada. El BVOB en porcentaje del micro-cemento a continuación, afectada en consecuencia. La disminución de la BVOB% de la D188, aumenta la BVOB en porcentaje de cemento y consiguiente mejora la resistencia a la compresión.

En sistemas convencionales de LiteCRETE, la mezcla de tri-modal se compone de los siguientes componentes:

Fina: D163 o D189 - Micro / Fina de cemento - BVOB > 10% (D163), BVOB > 14% (D189) que tienen buena resistencia a la compresión.

Media - D188 - Micro-burbujas de vidrio: + / - 30% BVOB. La densidad de estas partículas se fija en 0,38 SG + / - 0,02 SG.

Grueso: D124 - LITEFIL: BVOB 55%. Este porcentaje se fija en la formulación de fabricación.

Para el diseño de LiteCRETE, entre 8,7 y 10,5 lbm / gal La mezcla es el mismo que el anterior, excepto el hecho de que partículas del medio 2 se utilizan: Clase G y D188. D124 se ha fijado en un 55% BVOB. BVOB% de D188 se utiliza para ajustar la densidad de la lechada. El cemento Clase G se ve afectada en consecuencia. Un mínimo del 10% de los BVOB D163 o D189 14% es necesario para diseñar lechadas LiteCRETE competentes en estos intervalos de densidad.

**FUENTE: Elaboración propia en función a Shlumberger**

## 6.2.2. Balance de materia lechada de cemento de fibras CemNET

TABLA 6.7 Propiedades Requeridas de Aditivos (Fibras CemNET)

MATERIAL	DENSIDAD	UNIDAD	REQUERIMIENTO DE AGUA %
Cemento portland clase "G"	26.15	Ppg	44
NaCl	17.99	Ppg	0
Barita	34,99	Ppg	10
CaCO3	22,57	Ppg	0
Surfactante	9,99	Ppg	0

FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger

Calculo del volumen de cemento (gal)

$$m_c = 110lb$$

$$\rho_c = 26,15 \text{ LPG}$$

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{110 \text{ Lb}}{26,15 \text{ LPG}}$$

$$V_c = 4,213 \text{ Gal}$$

Calculo del volumen absoluto (gal/lb)

$$V_{Absoluto} = \frac{V_c}{m_c} = \frac{4,21 \text{ gal}}{110 \text{ lb}}$$

$$V_{Absoluto} = 0,0383 \text{ gal/lb}$$

**TABLA 6.8 Balance de Materia Cemento de Fibras CemNET**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	VOLUMEN ABSOLUTO (gal/lb)	VOLUMEN(gal/sk)
Cemento "G"	110	0,0383	4,213
NaCl (5%) *	5,50	0,0556	0,306
Barita (12%) **	13.20	0,0285	0,314
CaCO3 (6.5%)	7.15	0,0443	1,608
Surfactante(7 %)	7.70	0,1001	0,771
H2O	8,33*X		X
<b>TOTAL</b>	<b>143,55+8,33X</b>		<b>7,212+X</b>

(\*) El 5% es obtenido de la referencia aditivo para cementos

(\*\*)El 12% es obtenido de la referencia documento programas de cementación

**FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger**

Para el cemento "G" el requerimiento de agua es (44%)

$$m_{W1} = 110lb * 0.44$$

$$m_{W1} = 48,40 lb$$

Para la barita

$$m_{W2} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * m_c$$

$$m_{W2} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * 110$$

$$m_{W2} = 58.30 lb$$

$$m_{WT} = m_{W1} + m_{W2}$$

$$m_{WT} = 48,40 lb + 58,30 bl$$

$$m_{WT} = 106,70 lb$$

$$\rho_W = 8,33 \text{ ppg}$$

$$V_{WT} = \frac{m_{WT}}{\rho_W} = \frac{106,70 \text{ lb}}{8,33 \text{ ppg}}$$

$$V_{WT} = 12,809 \text{ gal}$$

$$V_{WT} = X$$

Datos obtenidos de la tabla:

$$m_L = 143,55 + 8,33X \dots \dots (1)$$

$$V_L = 7,212 + X \dots \dots \dots (2)$$

En (1)

$$m_L = 143,55 + 8,33 * (12,809)$$

$$m_L = 250,249 \text{ lb}$$

En (2)

$$V_L = 7,212 + 12,809$$

$$V_L = 20,021 \text{ gal}$$

$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} = \frac{250,249 \text{ lb}}{20,021 \text{ gal}}$$

$$\rho_L = 12,500 \text{ LPG}$$

Rendimiento

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Volumen}}{Sx}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{20,021 \text{ gal}}{1Sx} * \frac{3,785 \text{ l}}{1\text{gal}}$$

$$\text{Rendimiento} = 75,779 \text{ l/Sx}$$

### 6.2.3. Balance de materia lechada de cemento DensCRETE

**TABLA 6.9 Propiedades Requeridas de Aditivos (DensCRETE)**

MATERIAL	DENSIDAD	UNIDAD	REQUERIMIENTO DE AGUA %
Cemento portland clase "G"	26.15	Ppg	44
NaCl	17,99	Ppg	-
Bentonita	21,658	Ppg	0
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22,196	Ppg	-
Barita	34,99	Ppg	0
Pulzolana	9,596	Ppg	-

FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger

**TABLA 6.10 Balance de Materia Cemento DensCRETE**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	VOLUMEN ABSOLUTO (gal/lb)	VOLUMEN(gal/sk)
Cemento "G"	110	0,038	4,206
NaCl (5%) *	5,5	0,056	0,306
Bentonita (6%) **	6,6	0,046	0,305
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,6%)	0,66	0,045	0,030
Barita (7 %)	7,7	0,028	0,220
Pulzolana(1%)	1,1	0,104	0,115
H <sub>2</sub> O	8,33*X		X
<b>TOTAL</b>	131,56+8,33X		5,182+X

(\*) El 5% es obtenido de la referencia aditivo para cementos

(\*\*)El 6% es obtenido de la referencia documento programas de cementación

FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger

Para el cemento "G" el requerimiento de agua es (44%)

$$m_W = 110lb * 0.44$$

$$m_W = 48,40 lb$$

$$V_W = \frac{m_W}{\rho_W} = \frac{48,40 lb}{8,33 ppg}$$

$$V_W = 5,810 gal$$

$$V_W = X$$

Datos obtenidos de la tabla:

$$m_L = 131,56 + 8,33X \dots \dots (1)$$

$$V_L = 5,182 + X \dots \dots \dots (2)$$

En (1)

$$m_L = 131,56 + 8,33 * (5,810)$$

$$m_L = 179,957 lb$$

En (2)

$$V_L = 5,182 + 5,810$$

$$V_L = 10,992 gal$$

$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} = \frac{179,957 lb}{10,992 gal}$$

$$\rho_L = 16,34 LPG$$

Rendimiento

$$Rendimiento = \frac{Volumen}{Sx}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{10,992 \text{ gal}}{1 \text{ Sx}} * \frac{3,785 \text{ l}}{1 \text{ gal}}$$

$$\text{Rendimiento} = 41,60 \text{ l/Sx}$$

#### 6.2.4. Balance de materia lechada de cemento LiteCRETE

**TABLA 6.11 Propiedades Requeridas de Aditivos (LiteCRETE)**

MATERIAL	DENSIDAD	UNIDAD	REQUERIMIENTO DE AGUA %
Cemento portland clase "G"	26.15	Ppg	44
Bentonita	21,658	Ppg	10
KCl	16,49	Ppg	0
CaCO <sub>3</sub>	22,57	Ppg	0
Surfactante	9,99	Ppg	0

FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger

**TABLA 6.12 Balance de Materia Cemento LiteCRETE**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	VOLUMEN ABSOLUTO (gal/lb)	VOLUMEN(gal/sk)
Cemento "G"	110	0,038	4,206
KCl (8%) *	8,8	0,061	0,534
Bentonita (6%) **	6,6	0,046	0,305
CaCO <sub>3</sub> (6,5%)	7,15	0,044	0,317
Surfactante(7 %)	7.70	0,100	0,771
H <sub>2</sub> O	8,33*X		X
<b>TOTAL</b>	<b>140,25+8,33X</b>		<b>6,133+X</b>

(\*) El 8% es obtenido de la referencia aditivo para cementos

(\*\*)El 6% es obtenido de la referencia documento programas de cementación

FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger

Para el cemento "G" el requerimiento de agua es (44%)

$$m_{W1} = 110lb * 0.44$$

$$m_{W1} = 48,40 lb$$

Para la barita

$$m_{W2} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * m_c$$

$$m_{W2} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * 110$$

$$m_{W2} = 58.30 lb$$

$$m_{WT} = m_{W1} + m_{W2}$$

$$m_{WT} = 48,40 lb + 58,30 bl$$

$$m_{WT} = 106,70 lb$$

$$\rho_W = 8,33 \text{ ppg}$$

$$V_{WT} = \frac{m_{WT}}{\rho_W} = \frac{106,70 lb}{8,33 \text{ ppg}}$$

$$V_{WT} = 12,809 gal$$

$$V_{WT} = X$$

Datos obtenidos de la tabla:

$$m_L = 140,25 + 8,33X \dots \dots (1)$$

$$V_L = 6,133 + X \dots \dots \dots (2)$$

En (1)

$$m_L = 140,25 + 8,33 * (12,809)$$

$$m_L = 246,949 \text{ lb}$$

En (2)

$$V_L = 6,133 + 12,809$$

$$V_L = 18,942 \text{ gal}$$

$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} = \frac{246,949 \text{ lb}}{18,942 \text{ gal}}$$

$$\rho_L = 13,04 \text{ LPG}$$

Rendimiento

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Volumen}}{Sx}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{18,942 \text{ gal}}{1Sx} * \frac{3,785 \text{ l}}{1 \text{ gal}}$$

$$\text{Rendimiento} = 71,70 \text{ l/Sx}$$

#### 6.2.5. Balance de materia lechada de cemento UltraLiteCRETE

TABLA 6.13 Propiedades Requeridas de Aditivos (UltraLiteCRETE)

MATERIAL	DENSIDAD	UNIDAD	REQUERIMIENTO DE AGUA %
Cemento portland clase "G"	26.15	Ppg	44
NaCl	17,99	Ppg	10
Bentonita	21,658	Ppg	0
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22,196	Ppg	-
Barita	34,99	Ppg	10
Pulzolana	9,596	Ppg	-

FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger

**TABLA 6.14 Balance de Materia Cemento UltraLiteCRETE**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	VOLUMEN ABSOLUTO (gal/lb)	VOLUMEN(gal/sk)
Cemento "G"	110	0,038	4,206
NaCl (5%) *	5,5	0,056	0,306
Bentonita (6%) **	6,6	0,046	0,305
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,6%)	0,66	0,045	0,030
Barita (7 %)	7,7	0,028	0,220
Pulzolana(1%)	1,1	0,104	0,115
H <sub>2</sub> O	8,33*X		X
<b>TOTAL</b>	<b>131,56+8,33X</b>		<b>5,182+X</b>

(\*) El 5% es obtenido de la referencia aditivo para cementos

(\*\*)El 6% es obtenido de la referencia documento programas de cementación

**FUENTE: Elaboración propia en función Shlumberger.**

Para el cemento "G" el requerimiento de agua es (44%)

$$m_{W1} = 110lb * 0.44$$

$$m_{W1} = 48,40 lb$$

Para la barita

$$m_{W2} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * m_c$$

$$m_{W2} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * 110$$

$$m_{W2} = 58.30 lb$$

Para la bentonita

$$m_{W3} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * m_c$$

$$m_{W3} = \frac{5,3 * (10\%)}{100\%} * 110$$

$$m_{W3} = 58.30 \text{ lb}$$

$$m_{WT} = m_{W1} + m_{W2} + m_{W3}$$

$$m_{WT} = 48,40 \text{ lb} + 58,30 \text{ bl} + 58,30 \text{ bl}$$

$$m_{WT} = 165 \text{ lb}$$

$$\rho_W = 8,33 \text{ ppg}$$

$$V_{WT} = \frac{m_{WT}}{\rho_W} = \frac{165 \text{ lb}}{8,33 \text{ ppg}}$$

$$V_{WT} = 19,808 \text{ gal}$$

$$V_W = X$$

Datos obtenidos de la tabla:

$$m_L = 131,56 + 8,33X \dots \dots (1)$$

$$V_L = 5,182 + X \dots \dots \dots (2)$$

En (1)

$$m_L = 131,56 + 8,33 * (19,808)$$

$$m_L = 296,56 \text{ lb}$$

En (2)

$$V_L = 5,182 + 19,808$$

$$V_L = 24,99 \text{ gal}$$

$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} = \frac{296,56 \text{ lb}}{24,99 \text{ gal}}$$

$$\rho_L = 11,867 \text{ LPG}$$

Rendimiento

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Volumen}}{Sx}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{24,99 \text{ gal}}{1Sx} * \frac{3,785 \text{ l}}{1 \text{ gal}}$$

$$\text{Rendimiento} = 94,59 \text{ l/Sx}$$

**TABLA 6.15** Tabla de Resultados de Balance de Materia

	<b>REQUERIMIENTO DE AGUA (gal/sx)</b>	<b>VOLUMEN DE LECHADA [gal]</b>	<b>RENDIMIENTO [l/sk]</b>	<b>DENSIDAD [lb/gal]</b>
<b>CemNET</b>	12,809	20,021	75,78	12,500
<b>DensCRETE</b>	5,810	10,992	41,60	16,340
<b>LiteCRETE</b>	12,809	18,942	71,70	13,040
<b>UltraLiteCRETE</b>	19,808	24,99	94,59	11,867

**FUENTE:** Elaboración propia en función Shlumberger

Los requerimientos de agua para los cementos CemNET, LiteCRETE y UltraLiteCRETE son mayores lo cual reduce la viscosidad de la lechada de cemento con reducción en los tiempos de bombeabilidad, pero baja resistencia a la compresión por su densidad que puede alcanzar hasta 12,500(ppg), 13,040(ppg) y 11,867 (ppg) respectivamente; todos con mayor rendimiento.

El cemento de DensCRETE posee un menor requerimiento de agua y rendimiento de agua es decir se requiere más sacos de cemento para llegar a un volumen de lechada deseada ocupado por el cemento, agua de mezcla y aditivos; incrementando la densidad 16,340 (ppg) máxima densidad alcanzada, alta resistencia a la compresión, mayor viscosidad de bombeabilidad de la

lechada pero con aditivos dispersantes en las cuales reducen su viscosidad como se observa en el cálculo del rendimiento a comparación con las tres tecnologías.

La tecnología DensCRETE cuenta con una ventaja en su capacidad para dispersarse fácilmente en la lechada de cementación, a diferencia de las tres tecnologías. La lechada de fibras DensCRETE cuenta con un surfactante que mantienen las fibras unidas cuando están secas pero que además las ayudan a dispersarse y mezclarse sin dificultad cuando se incorporan a la lechada. Si se agregan en concentraciones óptimas, no alteran las propiedades críticas de la lechada o del cemento, tales como tiempo de densificación y propiedades reológicas.

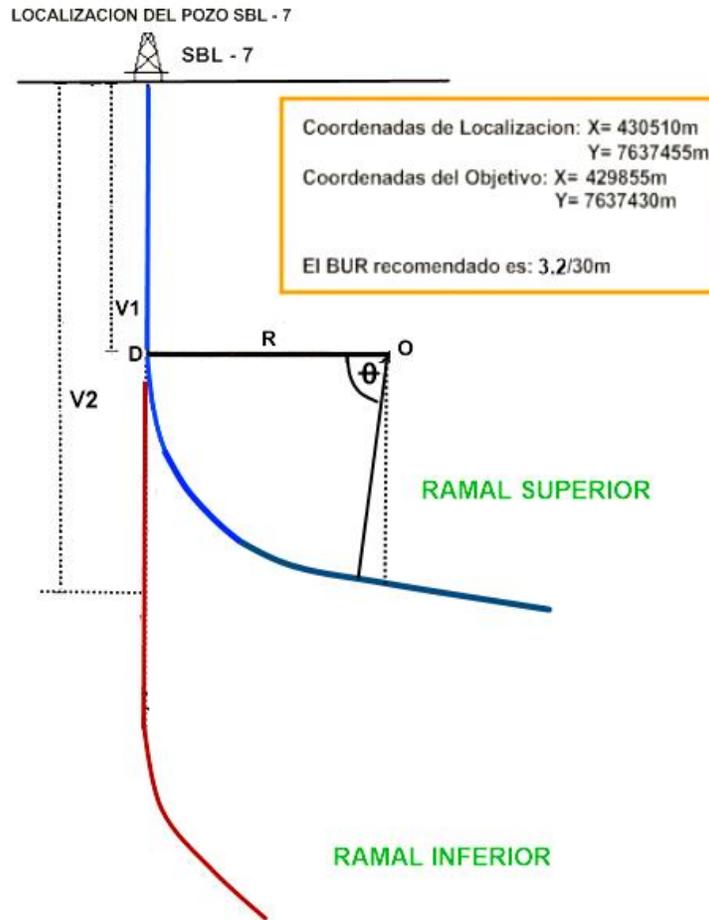
### **6.3. ESTRUCTURA FINAL DE LA CEMENTACIÓN REMEDIAL**

#### **6.3.1. Calculo de la geometría del pozo direccional Sabalo X7**

Se ha perforado un Pozo Direccional Multilateral en el Campo San Antonio (SABALO) Pozo SBL – 7 donde los topes atravesados son: Rama Inferior, Rama Superficial de las estratigrafías de HUAMAMPAMPA, ICLA Y SANTA ROSA, la cual se hará el análisis en el ramal superior SBL-X7.

Ademas por medio del informe final se cementara desde 3857 (m) hasta 4307.6 (m) zona con problemas en la cementación.

**FIGURA 6.5 Pozo direccional ramal superior 7" SBL-X7**



**FUENTE: Elaboración propia en función del informa final.**

Los datos adquiridos del POZO SBL – 7 son los siguientes:

**TABLA 6.16 Datos del Pozo SBL-7**

<b>RAMA SUPERIOR</b>
Profundidad vertical: Kick off Point: 3834.58 m
Zapata 1º revestimiento intermedio: 4307.6 m
Zapata 2º revestimiento intermedio: 5030 m
Profundidad final del pozo: (TVD): 4377.26 m

**FUENTE: Elaboración propia en función al informe final**

### 6.3.2. Procedimiento a realizar en la cementación remedial

Se utilizara un Drill Pipe de 3 1/2", grado P-105 de 15,50 lb/ft como tubería de cola, Retenedor de cemento (Posi Trive), con el bombeo de lechada de cemento de fibras DensCRETE con una densidad total de 16,34 (lb/gal) obtenida en la parte práctica, (balance de materia) empleando una salmuera con densidad optima de (17,99 lb/gal) para prueba de inyección, que no presenta sólidos en suspensión ante un gradiente de fractura de la formación de 0,93 (psi/ft).

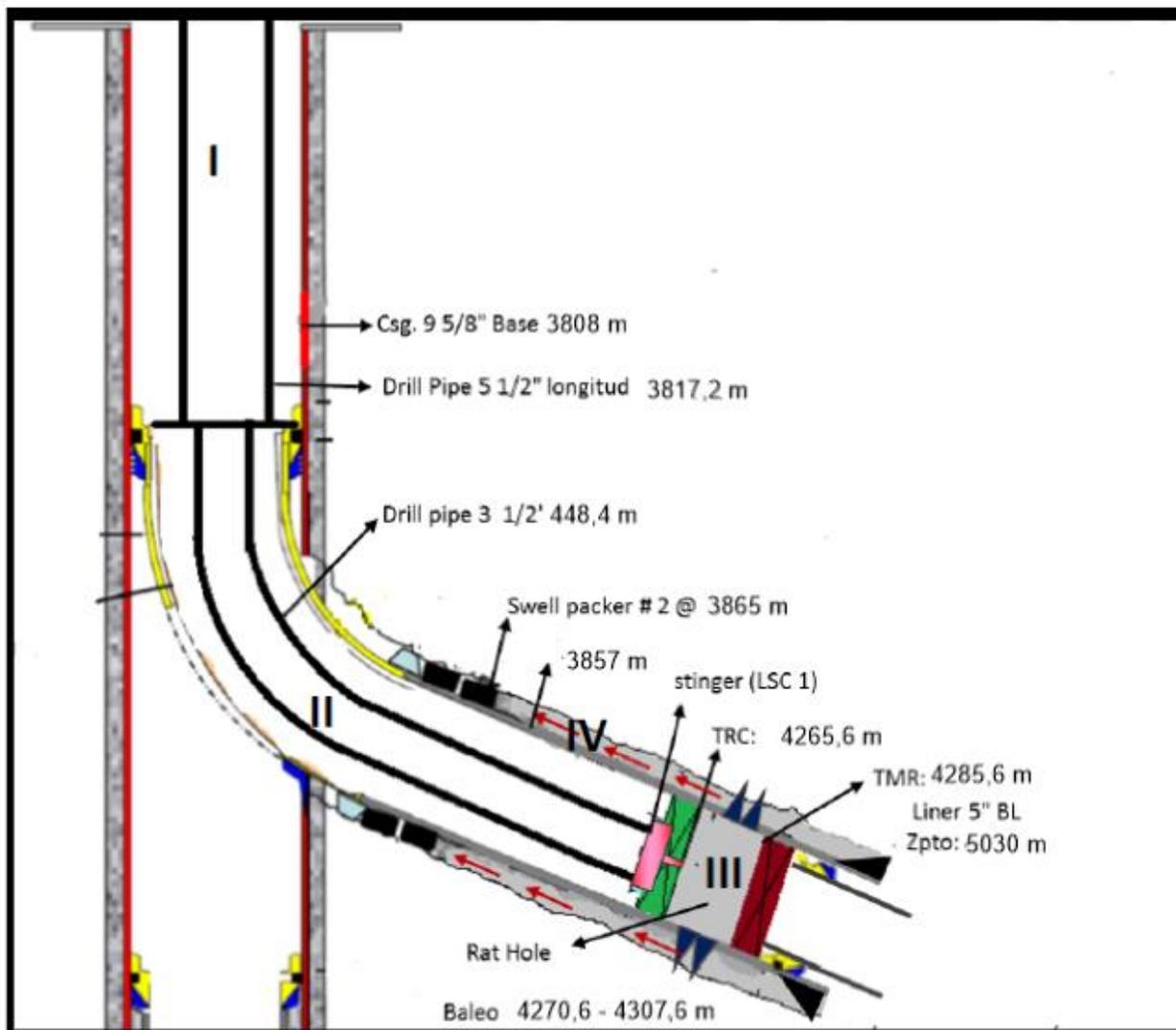
Se empleara un bache lavador y espaciador con densidades de 10 (ppg), y 8 (bbl) cada una.

**TABLA 6.17 Datos Requeridos y (Drill Pipe) Bajados para Cementación Remedial**

<b>CAÑERÍA DE 9 5/8</b>	
Drill Pipe de 5 1/2 " (OD); 4,670(ID); de 24,70 (lb)	
<b>LINER DE 7"</b>	
Drill Pipe de 3 1/2 " (OD); 2,602" (ID); de 15,50 (lb)	
Stinger "LSC1" 5" (OD); 4,1 (ID); 127 (mm).	
Intervalo baleado	4270,6 (m) – 4307,6 (m)
Open Hole	8,5" (OD)
Gradiente de fractura	0,93 psi/ft
$\rho_{\text{cemento fibras CemNET}}$	16,340 lb/gal
$\rho_{\text{salmuera}}$	15,44 lb/gal

**FUENTE: Elaboración propia en función al informe final**

**FIGURA 6.6 Estructura Cementación Remedial**



FUENTE: Elaboración propia en función del informa final.

**TABLA 6.18 Resultados de la Estructura de Cementación Remedial**

Altura del tapón mecánico recuperable (a)	4285,6	(mts.)
Retenedor de cemento (b) anclado	4265,6	(mts.)
Longitud Drill Pipe 3 1/2" (3817,2 – 4265,6 m)	448,4	(mts.)
Longitud Drill Pipe 5 1/2"	3817,2	(mts.)

Longitud espacio anular (3857 – 4307,6 m)	450,6	(mts.)
Longitud tapon de cemento (RH) (4265,6 – 4285,6m)	20	(mts.)

**FUENTE: Elaboración propia en función al informe final**

**TABLA 6.19 Secciones Interiores y Espacio Anular de la Estructura de Cementación**

	SECCION	OD (in)	ID (in)	LONGITUD (ft)
Drill Pipe 5 1/2"	I	5,5	4,670	12523,62
Drill Pipe 3 1/2"	II	3,5	2,602	1471,13
Liner 7"	III	7	6,184	65,62
Espacio anular (liner - formación)	IV	8,5	7	1478,35

**FUENTE: Elaboración propia en función al informe final**

### 6.3.3. Volumen de lechada

Primeramente hallamos el volumen de lechada que ocupa el espacio anular y el tapon de cemento (Rat Hole). (Ec. 5.13)

$$V_{lechada} = V_{EA} + V_{RH}$$

Volumen de espacio anular (3857 – 4307,6 m) (Ec. 5.14)

$$V_{3857 - 4307,6 \text{ m}}(bbl) = \frac{OD_{OH}^2 - OD_{casing}^2}{1029,4} * longitud \text{ de cañería (ft)}$$

$$V_{3857 - 4307,6 \text{ m}}(bbl) = \frac{8,5^2 - 7^2}{1029,4} * 1478,35 [ft]$$

$$V_{3857 - 4307,6 \text{ m}}(bbl) = 33,39 [bbl]$$

Volumen Rat Hole (4265,6 – 4285,6m) (Ec. 5.15)

$$V_{4265,6 - 4285,6 \text{ m}}(bbl) = \frac{ID_{casing}^2}{1029,4} * longitud \text{ de cañería (ft)}$$

$$V_{4265,6 - 4285,6m} (bbl) = \frac{6,184^2}{1029,4} * 65,62 (ft)$$

$$V_{4265,6 - 4285,6m} (bbl) = 2,44 [bbl]$$

El volumen total de lechada de cemento DensCRETE será entonces:

$$\text{Volumen de lechada} = 33,39 + 2,44 = 35,83 [bbl]$$

#### - Calculo de masa de cemento, aditivos y volumen de agua requerida

Luego determinamos la cantidad de sacos de cemento y aditivos para la formulación de lechada de cemento DensCRETE, en un volumen de 35,83 [bbl], se desplazará baches lavador y espaciador posteriores al desplazamiento de los sacos de cemento. (Ec. 5.2)

$$\text{El volumen de la lechada } 35,83 \text{ bbl} * \frac{159 \text{ l}}{1 \text{ bbl}} = 5696,97 [l]$$

$$\text{Numero de sacos de cemento} = \frac{\text{volumen de lechada [l]}}{\text{rendimiento [l/sk]}}$$

$$\text{Numero de sacos de cemento} = \frac{5696,97 [l]}{41,60 [l/sk]} = 136,95 \approx 137 [sk]$$

**TABLA 6.20 Calculo de Masa de Aditivos para un Volumen de Lechada**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	PESO (lb)	SACOS
<b>Cemento "G"</b>	110	15070	137
<b>NaCl (5%) *</b>	5,5	753,5	6,85
<b>Bentonita (6%) **</b>	6,6	904,20	8,22
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,6%)</b>	0,66	90,42	0,822
<b>Barita (7 %)</b>	7,7	1054,9	9,59
<b>Pulzolana (1%)</b>	1,1	150,7	9,59
<b>H2O</b>	106,70	14617,9	132,89

**FUENTE: Elaboración propia en función al informe final**

#### 6.3.4. Volumen de desplazamiento

Luego calculamos el volumen de desplazamiento desde el tope del Drill Pipe de 5 1/2" hasta la profundidad del Drill Pipe de 3 1/2" considerando el Stinger enchufado en el retenedor de cemento y 10 barriles en las líneas de superficie y como margen de seguridad.( Ec. 5.16)

$$V_{desplazamiento} = V_{DP.5\ 1/2} + V_{Tubing\ 3\ 1/2} + V_{Stinger} + 10Bbl.$$

#### . Volumen tramo intermedio 9 5/8:

Drill Pipe 5 1/2" (OD); 4,670" (ID); longitud de 3817,2 (m)

$$V_{DP\ 5\ 1/2"} = \frac{4.670^2}{1029,4} * 12523,62[ft] = 265,33[Bbl]$$

Volumen liner 7":

Drill Pipe de 3 1/2" (OD); 2,602" (ID); longitud de 448,4 (m)

$$V_{DP\ 3\ 1/2"} = \frac{2.602^2}{1029,4} * 1471,13[ft] = 9,68[Bbl]$$

Stinger "LSC1"; 5" (OD); 4.1 (ID); 127 mm.

$$V_{Stinger} = \frac{4,1^2}{1029,4} * 0,42[ft] = 6,86x10^{-3}[Bbl]$$

$$V_{Desplazamiento} = 265,33 + 9,68 + 6,86x10^{-3} + 10 = 285,02[Bbl]$$

#### 6.3.5. Tiempo de bombeo

Para ello se toma en cuenta el tiempo de operación conformado por tiempo de mezcla del cemento de 30 minutos, tiempo de bombeo de los fluidos y el tiempo de desplazamiento.

Se empleara una bomba triplex de 6 1/2 pulg por 12 pulg; con eficiencia al 95%.

- Primero hallamos el flujo de salida de bomba considerando 50 (stk/minuto).  
(Ec.5.17)

$$FSB \left( \frac{Bbl}{stk} \right) = 0,000243(\phi_{camisa}^2) * L * effc$$

$$FSB = 0,000243(6,5^2) * 12 * 0,95 = 0,12 \left[ \frac{bbl}{stk} \right]$$

- Luego determinamos el caudal de desplazamiento con 50 (stk/minuto). (Ec. 5.18)

$$Q_{Desplazamiento} = FSB * Velocidad\ de\ bomba \left( \frac{stk}{min} \right)$$

$$Q_{Desplazamiento} = 0,12 \left( \frac{bbl}{stk} \right) * 50 \left( \frac{stk}{min} \right) = 6\ bbl/min$$

Con el dato obtenido determinamos el tiempo de desplazamiento (Ec. 5.19) reduciendo 30 (bbl) al volumen de desplazamiento total para que sean desplazados con otro caudal:

$$T_{desplazamiento} = \frac{Volumen\ de\ desplazamiento}{Q_{desplazamiento}}$$

$$T_{desplazamiento} = \frac{285,02\ (bbl)}{6 \left( \frac{bbl}{min} \right)}$$

$$T_{desplazamiento} = 48[min]$$

Luego consideramos un caudal de 2 bbl/min para los últimos 30 (bbl) para desplazar la lechada en un flujo tapón.

$$T_{desplazamiento} = \frac{30\ (bbl)}{2 \left( \frac{bbl}{min} \right)}$$

$$T_{desplazamiento} = 15[min]$$

**TABLA 6.21 Resumen Secuencia de Bombeo**

	TIEMPO (min)
Mezcla de lechada	30
Lavador	1,6
Espaciador	1,6
Lechada (interior espacio anular)	3,33
Desplazamiento a 6 (Bbl/min)	48
Desplazamiento a 2 (Bbl/min)	15

**FUENTE:** Elaboración propia en función a la información adquirida del informe final SBL-X7

Con los datos obtenidos calculamos el tiempo de bombeo:

$$T_{bombeo} = 30 \text{ [min]} + 6,53 + 48 + 15 \text{ [min]} = 99,53 \text{ [min]}$$

### 6.3.6. Calculo de las caídas de presión

**TABLA 6.22 Propiedades de los Fluidos a Bombear**

FLUIDOS	DENSIDAD	CAUDAL (Gal/Min)	600 RPM	300 RPM	VP	YP
Lavador	15	252	5	3	2	1
Espaciador	10	252	12	7	5	2
Lechada principal	16,340	252	9	4	5	1
Lechada principal	16,340	84	9	4	5	1

**FUENTE:** Elaborado con base a datos en datos recopilados

#### 6.3.6.1. Calculo de la caída de presión para bache lavador

**Modelo exponencial:**

- Cálculo del índice de consistencia con la (Ec.5.20):

$$n = 3,32 \log\left(\frac{5}{3}\right) = 0,74$$

- Cálculo del índice de comportamiento del fluido con la (Ec.5.21):

$$K = 1,07 * \frac{510 * 3}{510^{0.74}} = 16,24$$

- **Calculo de la caída de presión en equipos de superficie con la (Ec.5.22):**

$$\Delta P_s = 45,5617 * 0,000053 * 15^{0.8} \left[ \frac{lb}{gal} \right] * 252^{1.8} \left[ \frac{gal}{min} \right] * 2^{0.2} [cp] \quad Ec. 4.23$$

$$\Delta P_s = 508,72 \text{ (psi)}$$

- **Caída de presión en el interior de las herramientas tubulares (Drill Pipe)**

Primero determinamos la velocidad al interior de la tubería con la (Ec.5.23):

$$V_I = \frac{252 \left( \frac{gal}{min} \right)}{2.45 * 4.1^2} = 6.12 \left[ \frac{pie}{min} \right]$$

$$V_{II} = \frac{252 \left( \frac{gal}{min} \right)}{2.45 * (2,602)^2} = 15,19 \left[ \frac{pie}{min} \right]$$

$$V_{III} = \frac{252 \left( \frac{gal}{min} \right)}{2.45 * (6,184)^2} = 2,69 \left[ \frac{pie}{min} \right]$$

- Luego determinamos la velocidad en el espacio anular con la (Ec.5.24):

$$V_{IV} = \frac{252 \left( \frac{gal}{min} \right)}{2.45 * (8,5^2 - 7^2)} = 4,42 \left[ \frac{pie}{min} \right]$$

Luego determinamos la velocidad en el espacio anular para un caudal de 84 (gal/min) para la lechada principal

$$V_V = \frac{84 \left( \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right)}{2.45 * (8,5^2 - 7^2)} = 1,47 \left[ \frac{\text{pie}}{\text{min}} \right]$$

- **Calculo del número de Reynold en el interior de la tubería con la (Ec.5.28):**

(Flujo turbulento)

$$N_{Re I} = 1077.188 * \frac{15[\text{ppg}] * 6,12 \left[ \frac{\text{pie}}{\text{min}} \right] * 4,1[\text{pulg}]}{2}$$

$$N_{Re I} = 202716,01 \text{ (Flujo turbulento)}$$

$$N_{Re II} = 1077.188 * \frac{15[\text{ppg}] * 15,19 \left[ \frac{\text{pie}}{\text{min}} \right] * 2,602[\text{pulg}]}{2}$$

$$N_{Re II} = 319313,91 \text{ (Flujo turbulento)}$$

$$N_{Re III} = 1077.188 * \frac{15[\text{ppg}] * 2,69 \left[ \frac{\text{pie}}{\text{min}} \right] * 6,184[\text{pulg}]}{2}$$

$$N_{Re III} = 134392,34 \text{ (Flujo turbulento)}$$

- **Calculo del número de Reynold en el espacio anular con la (Ec.5.26):**

$$N_{Re VI} = 1077.188 * \frac{15[\text{ppg}] * 4,42 \left[ \frac{\text{pie}}{\text{minz}} \right] * (8,5 - 7)[\text{pulg}]}{2}$$

$$N_{Re I} = 53563,17 \text{ (Flujo turbulento)}$$

- **Calculo del factor de fricción para flujo turbulento con la (Ec.5.27):**

$$f_I = \frac{0.079}{202716,01^{0.25}} = 0,0037$$

$$f_{II} = \frac{0.079}{319313,91^{0.25}} = 0,0033$$

$$f_{III} = \frac{0.079}{134392,34^{0.25}} = 0,0041$$

$$f_{IV} = \frac{0.079}{54563,17^{0.25}} = 0,0052$$

- **Calculo de la caída de presión al interior de la tubería con la (Ec.5.28):**

$$\Delta P_{fI} = 12523,52 * \frac{0.00246 * 0,0037 * 15[ppg] * 6,12^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{4,1[pulg]}$$

$$\Delta P_{fI} = 15,620[psi]$$

$$\Delta P_{fII} = 1471,13 * \frac{0.00246 * 0,0033 * 15[ppg] * 15,19^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{2,602[pulg]}$$

$$\Delta P_{fII} = 15,885[psi]$$

$$\Delta P_{fIII} = 65,62 * \frac{0.00246 * 0,0041 * 15[ppg] * 2,69^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{6,184[pulg]}$$

$$\Delta P_{fIII} = 0,012[psi]$$

- **Calculo de la caída de presión en el espacio anular con la (Ec.5.29):**

$$\Delta P_{fIV} = 1478,35[pie] * \frac{0.00301 * 0,0052 * 15[ppg] * 4,42^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{(8,5 - 7[pulg])}$$

$$\Delta P_{fIV} = 4,52[psi]$$

**6.3.6.2. Calculo de la caída de presión para bache espaciador**

**Modelo exponencial:**

- **Cálculo del índice de consistencia (Ec.5.20):**

$$n = 3,32 \log\left(\frac{12}{7}\right) = 0,78$$

- Cálculo del índice de comportamiento del fluido (Ec.5.21):

$$K = 1,07 * \frac{510 * 7}{511^{0.78}} = 29,48$$

- Cálculo de la caída de presión en equipos de superficie (Ec. 5.22):

$$\Delta P_s = 45,5617 * 0,000053 * 10^{0.8} \left[ \frac{lb}{gal} \right] * 252^{1.8} \left[ \frac{gal}{min} \right] * 5^{0.2} [cp]$$

$$\Delta P_s = 441,76 [psi]$$

- Caída de presión en el interior de las herramientas tubulares (Drill Pipe)

- Cálculo del número de Reynold en el interior de la tubería con la (Ec.5.25):

$$N_{ReI} = 1077.188 * \frac{10 [ppg] * 6,12 \left[ \frac{pie}{min} \right] * 4,1 [pulg]}{5}$$

$$N_{ReI} = 54057,60 \text{ (flujo turbulento)}$$

$$N_{ReII} = 1077.188 * \frac{10 [ppg] * 15,19 \left[ \frac{pie}{min} \right] * 2,602 [pulg]}{5}$$

$$N_{ReII} = 85150,38 \text{ (flujo turbulento)}$$

$$N_{ReIII} = 1077.188 * \frac{10 [ppg] * 2,69 \left[ \frac{pie}{min} \right] * 6,184 [pulg]}{5}$$

$$N_{ReIII} = 35837,96 \text{ (flujo turbulento)}$$

- Cálculo del número de Reynold en el espacio anular tubería con la (Ec.5.26):

$$N_{ReIV} = 1077.188 * \frac{10 [ppg] * 4,42 \left[ \frac{pie}{min} \right] * (8,5 - 7) [pulg]}{5}$$

$$N_{ReIV} = 14283,51 \text{ (flujo turbulento)}$$

- Calculo del factor de fricción para flujo turbulento con la (Ec.5.27):

$$f_I = \frac{0.079}{54057,60^{0.25}} = 0,0052$$

$$f_{II} = \frac{0.079}{85150,38^{0.25}} = 0,0046$$

$$f_{III} = \frac{0.079}{35837,96^{0.25}} = 0,0057$$

$$f_{IV} = \frac{0.079}{14283,51^{0.25}} = 0,0072$$

- Calculo de la caída de presión al interior de la tubería con la (Ec.5.28):

$$\Delta P_{fI} = 12523,62 * \frac{0.00246 * 0,0052 * 10[ppg] * 6,12^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{4,1[pulg]}$$

$$\Delta P_{fI} = 14,635[psi]$$

$$\Delta P_{fII} = 1471,13 * \frac{0.00246 * 0,0046 * 10[ppg] * 15,19^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{2,602[pulg]}$$

$$\Delta P_{fII} = 14,762[psi]$$

$$\Delta P_{fIII} = 65,62 * \frac{0.00246 * 0,0057 * 10[ppg] * 2,69^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{6,184[pulg]}$$

$$\Delta P_{fIII} = 0.011[psi]$$

- Calculo de la caída de presión en el espacio anular con la (Ec.5.29):

$$\Delta P_{fIV} = 1478,35 * \frac{0.00246 * 0,0055 * 10[ppg] * 4.42^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{(8,5 - 7)[pulg]}$$

$$\Delta P_{fIII} = 2,605[\text{psi}]$$

### 6.3.6.3. Cálculo de la caída de presión para lechada principal

#### Modelo exponencial:

- Cálculo del índice de consistencia (Ec.5.20):

$$n = 3,32 \log\left(\frac{9}{4}\right) = 1,17$$

- Cálculo del índice de comportamiento del fluido (Ec.5.21):

$$K = 1,07 * \frac{510 * 4}{511^{1,17}} = 1,48$$

- Cálculo de la caída de presión en equipos de superficie (Ec.5.22):

$$\Delta P_s = 45,5617 * 0,000053 * 16,340^{0,8} \left[\frac{\text{lb}}{\text{gal}}\right] * 252^{1,8} \left[\frac{\text{gal}}{\text{min}}\right] * 5^{0,2}[\text{cp}]$$

$$\Delta P_s = 654,32[\text{psi}]$$

- Caída de presión en el interior de las herramientas tubulares (Drill Pipe)

- Cálculo del número de Reynold en el interior de la tubería con la (Ec.5.25):

$$N_{Rel} = 1077.188 * \frac{16,34[\text{ppg}] * 6,12 \left[\frac{\text{pie}}{\text{min}}\right] * 4,1[\text{pulg}]}{5}$$

$$N_{Rel} = 88330,12 \text{ (flujo turbulento)}$$

$$N_{RelI} = 1077.188 * \frac{16,34[\text{ppg}] * 15,19 \left[\frac{\text{pie}}{\text{min}}\right] * 2,602[\text{pulg}]}{5}$$

$$N_{RelI} = 139135,71 \text{ (flujo turbulento)}$$

$$N_{RelII} = 1077.188 * \frac{16,34[\text{ppg}] * 2,69 \left[\frac{\text{pie}}{\text{min}}\right] * 6,184[\text{pulg}]}{5}$$

$$N_{ReIII} = 58559,22 \text{ (flujo turbulento)}$$

- Cálculo del número de Reynold en el espacio anular tubería con la (Ec.5.26):

$$N_{ReIV} = 1077.188 * \frac{16,34[ppg] * 4,42 \left[ \frac{pie}{min} \right] * (8,5 - 7)[pulg]}{5}$$

$$N_{ReIV} = 23339,26 \text{ (flujo turbulento)}$$

$$N_{ReV} = 1077.188 * \frac{16,34[ppg] * 1,47 \left[ \frac{pie}{min} \right] * (8,5 - 7)[pulg]}{5}$$

$$N_{ReV} = 7762,15 \text{ (flujo turbulento)}$$

- Calculo del factor de fricción para flujo turbulento con la (Ec.5.27):

$$f_I = \frac{0.079}{88330,12^{0.25}} = 0,0046$$

$$f_{II} = \frac{0.079}{139135,71^{0.25}} = 0,0041$$

$$f_{III} = \frac{0.079}{58559,22^{0.25}} = 0,0051$$

$$f_{IV} = \frac{0.079}{23339,26^{0.25}} = 0,0064$$

$$f_V = \frac{0.079}{7762,15^{0.25}} = 0,0084$$

- Calculo de la caída de presión al interior de la tubería con la (Ec.5.28):

$$\Delta P_{fI} = 12523,62 * \frac{0.00246 * 0,0046 * 16,34[ppg] * 6,12^2 \left[ \frac{pie}{min} \right]}{4,1[pulg]}$$

$$\Delta P_{fI} = 21,154[psi]$$

$$\Delta P_{fII} = 1471,13 * \frac{0.00246 * 0,0041 * 16,34[ppg] * 15,19^2 \left[\frac{pie}{min}\right]}{2,602[pulg]}$$

$$\Delta P_{fII} = 21,500[psi]$$

$$\Delta P_{fIII} = 65,62 * \frac{0.00246 * 0,0051 * 16,34[ppg] * 2,69^2 \left[\frac{pie}{min}\right]}{6,184[pulg]}$$

$$\Delta P_{fIII} = 0,016[psi]$$

- **Calculo de la caída de presión en el espacio anular con la (Ec.5.29):**

$$\Delta P_{fVI} = 1478,35 * \frac{0.00301 * 0,0064 * 16,34[ppg] * 4,42^2 \left[\frac{pie}{min}\right]}{(8,5 - 7)[pulg]}$$

$$\Delta P_{fVI} = 6,061[psi]$$

$$\Delta P_{fV} = 1471,13 * \frac{0.00301 * 0,0084 * 16,34[ppg] * 1,47^2 \left[\frac{pie}{min}\right]}{(8,5 - 7)[pulg]}$$

$$\Delta P_{fV} = 0,876[psi]$$

**TABLA 6.23** Tabla de Cálculos Efectuados para caída de Presión

LAVADOR			ESPACIADOR	LECHADA PRINCIPAL
NUMERO DE REYNOLD			NUMERO DE REYNOLD	NUMERO DE REYNOLD
Interior de la tubería	I	202716,01	54057,60	88330,12
Interior de la tubería	II	319313,91	85150,38	139135,71
Interior de la tubería	III	134392,34	35837,96	58559,22
Espacio anular	IV	53563,17	14283,51	23339,26

FACTOR DE FRICCION			FACTOR DE FRICCION	FACTOR DE FRICCION
Interior de la tubería	I	0,0037	0,0052	0,0046
Interior de la tubería	II	0,0033	0,0046	0,0041
Interior de la tubería	III	0,0041	0,0057	0,0051
Espacio anular	IV	0,0052	0,0072	0,0064
CAIDA DE PRESION FLUJO TURBULENTO			CAIDA DE PRESION FLUJO TURBULENTO	CAIDA DE PRESION FLUJO TURBULENTO
Interior de la tubería	I	15,620	14,635	21,154
Interior de la tubería	II	15,885	14,762	21,500
Interior de la tubería	III	0,012	0,011	0,016
Espacio anular	IV	4,520	2,605	6,061
Espacio anular	V			0,876

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados.**

### 6.3.7. Tiempo de bombeabilidad

El tiempo de bombeabilidad considera el tiempo durante el cual la lechada de cemento puede ser bombeada y desplazada dentro del espacio anular.

Asumiendo lo siguiente:

Velocidad de mezcla de lechada de 30 [min].

Caudal de desplazamiento de 6,1 barriles por minuto.

Tiempo de contingencia de 30 minutos (permitiendo la presencia de fallas, problemas con el equipo).

Margen de seguridad 30 [min] (incluye en tiempo de ubicación del cemento en el espacio anular).

- Determinamos el tiempo de bombeabilidad con la (Ec.5.30)

$$T_{bombeabilidad} = \frac{(bbl)V_{lechada}}{0.7(bbl/min)} + \frac{V_{desplazamiento}}{Q_{desplazamiento}} + T_{ctg} + C$$

$$T_{bombeabilidad} = \frac{35,83 (bbl)}{0.7(bbl/min)} + \frac{285,02}{6,1(\frac{bbl}{min})} + 30 + 30 = 157,91(\text{min})$$

$$T_{bombeabilidad} = 157,91(\text{min})$$

### 6.3.8. Estado de los niveles de fluidos

Tomando en cuenta un volumen de Bombeo 10 Bbl de colchón lavador de densidad 15 (ppg), Bombear 10 Bbl de colchón espaciador, densidad 10 (ppg).

Lechada de cemento de fibras DensCRETE, de densidad 16,34 (ppg).

- Primero calculamos el tope del colchón espaciador:

$$V_{Colchon} = \frac{OD^2 - ID^2(\text{pulg})}{314} * H_{colcho.esp.}(m)$$

$$H_{colcho.esp.} = \frac{314 * V_{Colchon}}{OD^2 - ID^2(\text{pulg})}$$

$$H_{colcho.esp.} = \frac{314 * 10 (bbl)}{8,5^2 - 7^2(\text{pulg})}$$

$$H_{colcho.esp.} = 135.05(m)$$

$$H_{colcho.esp.} = 3857 - 135.05 = 3721,95 (m)$$

- Luego calculamos el tope del colchón lavador:

$$\text{Altura restante} = 3817.2(m) - 3721.95(m) = 95,25(m)$$

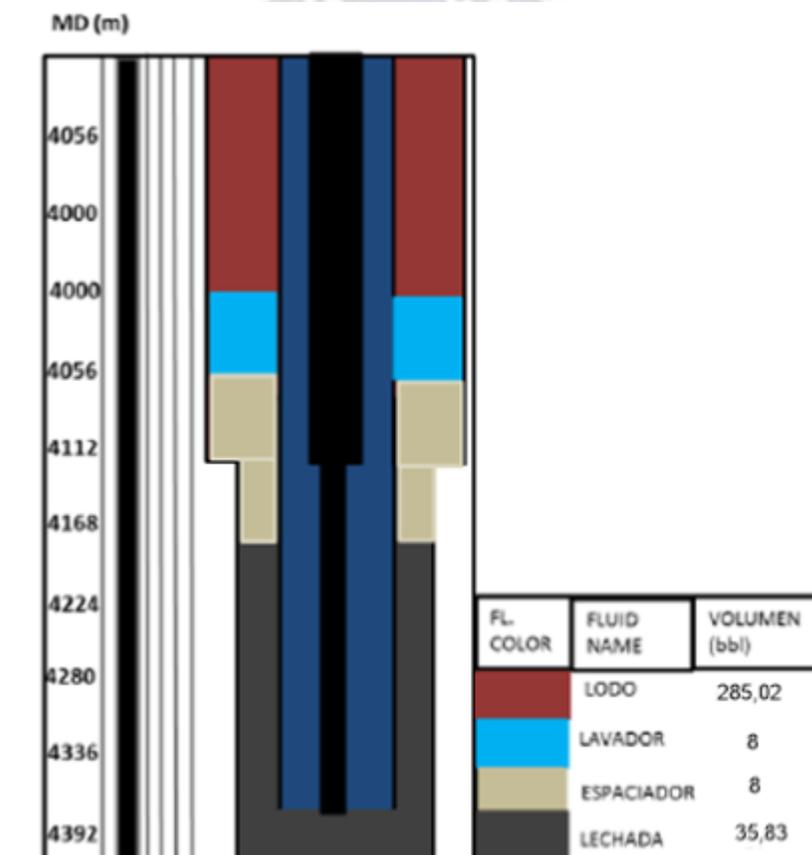
$$V_1 = \frac{8.5^2 - 7^2(\text{pulg})}{314} * 95,25(\text{m}) = 7,05[\text{bbl}]$$

$$V_{\text{Restante}} = 10(\text{bbl}) - 7,05 = 2,95(\text{bbl})$$

$$H_{\text{colch.Lav}} = \frac{2,95(\text{bbl})}{\frac{8,5^2 - 7^2(\text{pulg})}{314}} = 39,84[\text{m}]$$

$$H_{\text{colch.Lav}} = 3721,95(\text{m}) - 39.84(\text{m}) = 3682,11(\text{m})$$

**FIGURA 6.7 Estructura Cementación Remedial**



**FUENTE: Elaboración propia en base al informe final**

El eficiente diseño de la densidad de los fluidos, la reología utilizada para obtener un flujo turbulento, y el programa de 35.83 bbls de lechada, que cumple con el criterio de que cubra 450,6 (m), bombeando a un gasto de 6 (bpm) durante la

operación de cementación hizo que redujera la probabilidad obtener una canalización o una contaminación de fluidos, logrando así la eficiencia de desplazamiento.

**TABLA 6.24 Programa Final de Cementación Remedial SBL-X7**

<b>RESUMEN FINAL DE CEMENTACIÓN REMEDIAL POZO SBL-X7 LINER 7" (3857 – 4307,6 M)</b>	
<b>SECUENCIA DE OPERACIÓN</b>	
1. Sacar arreglo de completación.	
2.- Realizar cambio de fluido de completación por de intervención.	
3.- Bajar tapón mecánico recuperable de cemento a $\pm$ 4285,6 (m)	
4.- Correr registros de cementación (3857 – 4307,6 m).	
5.- Balear intervalo de 4270,6 (m) – 4307,6 (m).	
6.- Bajar retenedor de cemento y anclar a $\pm$ 4265,6 (m).	
7.- Bajar arreglo con Stinger enchufar en retenedor.	
8.- Realizar prueba de inyektividad con salmuera de densidad de (17,99 ppg)	
9.- bombear 8 Bbl de bache lavador con densidad de 15 ppg.	
10.- bombear 8 Bbl de bache espaciador con densidad de 10 ppg.	
11.- Realizar cementación correctiva bombeando 35,83 bbl de lechada de cemento con densidad de 16,34 ppg a un caudal de (6 bbl/min) en flujo turbulento.	
12.- Desenchufar Stinger y circular por reversa para limpieza de tubería.	
13.- Bajar arreglo y recuperar Tapón retenedor de cemento.	
14.- correr registros eléctricos CBL-VDL para evaluación de la cementación.	
<b>ESTRUCTURA CEMENTACIÓN REMEDIAL</b>	
Altura del tapón mecánico recuperable (a) [Mts.]	4285,6
Tapón retenedor de cemento (b) anclado [Mts.]	4265,6
Longitud Drill Pipe 3 ½" [Mts.]	448,4
Longitud de Drill Pipe 5 ½" [Mts.]	3817,2
Longitud espacio anular a cementar [Mts.]	450,6

Longitud tapón de cemento (RH) [Mts.]			20	
<b>FLUIDOS DESPLAZADOS</b>				
TIPO DE FLUIDO	DENSIDAD D (ppg)	VOLUMEN (Bbl)	CAUDAL (Bbl/min)	TIEMPO (min)
Mezclado de lechada				30
Lavador	15	8	5-6	1,6
Espaciador	10	8	5-6	1,6
Lechada de cemento de fibras DensCRETE	16,34	35,83	6	3,33
Desplazamiento	285,02		6	48
Desplazamiento (flujo tapón)	30		2	15
<b>TIEMPOS (min)</b>				
Tiempo de bombeo	99,53			
Tiempo de bombeabilidad	157,91			

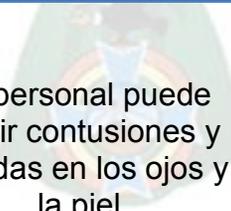
**FUENTE: Elaboración propia en base al informe final.**

### **6.3.9. Principales Riesgos y Plan de Contingencias**

Identificar áreas críticas con alto potencial de riesgos asociados al trabajo y detallar las medidas de control que se deben tomar para minimizar y/o eliminar los mismos.

**TABLA 6.25 Análisis de Riesgos**

<b>ANÁLISIS DE RIESGO</b>			
<b>BASE: TARIJA - BOLIVIA</b>	<b>CAMPO SABALO</b>	<b>Pozo SBL-X7</b>	<b>TIPO DE TRABAJO Cementación remedial del Casing 7” Ramal Superior</b>
<p><b>COMENTARIO:</b> Este análisis de Riesgo fue elaborado en base a las experiencias y lecciones aprendidas que se rescató de todos los trabajos realizados por Halliburton. Con el objetivo de tener mejoras y realizar un trabajo con seguridad y calidad.</p>		<p><b>CONTROL Y/O RECOMENDACIÓN:</b> Existen controles y/o medidas en contra y/o recomendaciones para disminuir el riesgo incluyendo fecha estimada de completación (datos importantes de recomendaciones)</p>	
<b>Descripción de la actividad</b>	<b>Causas</b>	<b>Efecto</b>	
<p>Accidente de tránsito vehicular</p>	<p>Mal estado de la carretera. Condiciones climatológicas no favorables</p>	<p>Como efecto de un accidente se pueden perder vidas humanas. Pérdida de equipo o material de la compañía o de terceros. Realizar viajes nocturnos como consecuencia tener cansancio y fatiga a la hora de llegar para la operación.</p>	<p>1 Manejar con mucha precaución. 2 Planificar viaje con anticipación. 3 Viajar con acompañante (escolta). 4 Completar el Gerenciamiento de Viaje. 5 Realizar la prueba de alcoholemia al salir de la base. 6 Tomar las medidas necesarias "Manejo del cambio"(actualizar JSA, reunión con el personal Involucrado tomando en cuenta condiciones actuales). 7 Tener a disposición la hoja del plan de respuesta a emergencias correspondiente a cada operación con la información debidamente actualizada.</p>

Caídas a distinto nivel durante la realización de trabajos en el equipo de	Pérdida de equilibrio.	Lesiones a las personas: golpes, fracturas, luxaciones, etc.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Personal capacitado para trabajo en altura.</li> <li>2 Utilizar arnés de cuerpo entero y línea de vida.</li> </ol>
bombeo y tanques de almacenamiento.	Tropezones subiendo y bajando de equipos/tanques.		<ol style="list-style-type: none"> <li>3 Equipos y tanques con escaleras, barandas y dispositivos estándares para enganche.</li> <li>4 Supervisar al personal.</li> <li>5 Inspeccionar periódicamente los arnés, línea de vida, escaleras y barandas.</li> </ol>
Derrame, salpicaduras de aditivos químicos y/o cemento durante la mezcla y bombeo de fluidos.	Exceder la capacidad de los tanques. No contar con el bordillo y geomembranas adecuadas. Pérdida por conexiones. Envases mal tapados y/o rupturas de envases.	Quemadura química de la piel y ojos por contacto con productos químicos. Contaminación del suelo.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Asegurarse de que la carga esté asegurada y estable.</li> <li>2 Instruir al personal en seguridad con el manejo de productos químicos.</li> <li>3 Colocar geomembrana y bordillos de manera de cubrir el 110% de exceso en caso de derrame.</li> <li>4 Contar con un Kit de control/contención de derrame.</li> <li>5 Correcto ajuste de conexiones.</li> <li>6 Todo el personal debe contar con el EPP adecuado para trabajos con químicos peligrosos, protección para ojos, cara, manos, brazos, botas de goma y respiradores de gases y vapores inorgánicos.</li> <li>7 Contar con las hojas de MSDS de los productos químicos que se emplean en el trabajo.</li> </ol>
Personal expuesto a contacto con fluidos a alta presión, o, a contacto violento con partes del equipo de superficie.	Mal ajuste o desgaste de las uniones y componentes. Vibración de la línea.	 El personal puede sufrir contusiones y heridas en los ojos y la piel.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Uso de Equipo de Protección Personal.</li> <li>2 Verificar el ajuste correcto del ensamblado de las líneas.</li> <li>3 Seguir los procedimientos de ajuste de líneas a altas presiones, y sus compatibilidades.</li> <li>4 Asegurar las líneas de bombeo y manifold, envolviéndolas con cable 3/8", sujetando las terminaciones con grapas.</li> </ol>

			<p>5 Registrar/Inspeccionar periódicamente las líneas de alta presión.</p> <p>6 Realizar los reemplazos y destrucción de tuberías que no pasen las pruebas de inspecciones.</p>
Estimación inadecuada de la temperatura.	Datos incorrectos.	Fragüe retardado/acelerado de cemento, causando incrementos repentinos de presión.	<p>1 Verificar datos con el cliente.</p> <p>2 Verificar datos con Hmta. BHCT.</p> <p>3 Correr Well Cat.</p> <p>4 Corroborar pruebas de laboratorio.</p>
Circulación durante la cementación.	Excesos de Volumen. Pérdidas durante la	No circular cemento a superficie.	<p>1 Correr baches trazadores durante circulación de acondicionamiento.</p> <p>2 Correr registros de calibre de 4 brazos.</p> <p>3 Tener stock de cemento y aditivos en locación.</p>
	circulación. Falta de material por excesos no programados		
Altas presiones de Bombeo	Exceder la presión de colapso de la cañería.	Colapso de la cañería	<p>1 Realizar cálculos de hidráulica.</p> <p>2 Establecer máximas presiones de bombeo con representante del cliente.</p> <p>3 Colocar corte de presión en la unidad de bombeo.</p>
Baja eficiencia de desplazamiento.	Caudal de bombeo. Acondicionamiento del lodo.	Pobre aislamiento zonal, mala adherencia del cemento a la formación	<p>1 Mantener altos caudales en función a la gradiente de fractura.</p> <p>2 Uso de Tuned Spacer III como espaciador.</p>

Que no circule cemento a superficie.	Pérdidas de circulación. Volúmenes inadecuados.	Adherencia débil del cemento en la zona superficial.	1 Uso de aditivos para controlar pérdidas en las lechadas previas a la cementación. 2 Considerar el uso de lechadas Tuned Light. 3 Excesos de cemento en función a zonas aledañas.
Mala centralización.	Cantidad inadecuada de centralizadores.	Canalización. Aislamiento zonal inadecuado.	1 Posición efectiva de centralizadores. 2 Modelar excentricidad, 100 % Stand Off. 3 Simulación I cem y D3D.
Sobre desplazamiento (Lavado del Zapato)	Volumen de desplazamiento incorrecto.	Zapato sin cemento. Cemento contaminado. Problemas para perforar siguiente sección.	1 Verificar arreglo inner string, revisar ID con representante del cliente. 2 Ajustar cálculos de volumen de desplazamiento. 3 Dejar cemento dentro de la cañería para ser
Flotación de la cañería.	Alta presión ejercida en el OD del zapato.	Que la tubería salga elevada a la superficie ocasionando daños operativos.	1 Realizar cálculos de flotación de la cañería. 2 Asegurar la cañería a la subestructura.

**FUENTE: Elaboración Propia en base a YPFB.ANDIA S.A.**

### **6.3.9.1. Contingencias Respecto al Funcionamiento de Equipos y Manejo de Químicos antes/durante y después del Trabajo de Cementación**

- **Flotación de la cañería.** Se recomienda amarrar o sujetar con cadenas la cañería y sarta de trabajo a la subestructura como contingencia en caso de problemas de flotación.

- **Exceso de cemento en Ante-Pozo.** Muchas veces, al ser el cemento más denso que el lodo, se acumula buena cantidad del mismo en el ante pozo, sin observarse retornos a superficie. Para ello es recomendable tener bombas sifón durante el bombeo limpiando el ante pozo, además de personal verificando la densidad del fluido retornado; esto permitirá detectar la salida de cemento puro a superficie y comenzar con el desplazamiento. Es importante disponer de los contenedores necesarios en locación para poder depositar todo el cemento recuperado.

- **Exceso de Cemento y Agua de Mezcla.** Al ser los tramos superficiales los más débiles, pudieran presentarse pérdidas durante la cementación o pudiese el pozo requerir excesos adicionales de cemento. Se recomienda la mezcla del 100% de exceso de agua de mezcla, así como la cantidad correspondiente de cemento a este volumen, en locación. Se dispondrá en locación con DensCRETE.

- **Mal Funcionamiento del Equipo de Flotación.** En este caso se recomienda levantar el Stinger hasta superficie para evitar atrapamiento del mismo y dejar que el cemento se equalice dentro del pozo, luego reperforar el mismo y proceder a realizar Top Job para completar el anular, si fuese necesario.

### **6.4. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA CEMENTACIÓN DEL POZO**

Durante la cementación, se utiliza una serie de químicos con distintos grados de toxicidad, siendo los más importantes el limo y la arcilla.

A estos se añade otros aditivos, para acelerar (cloruro de sodio, carbonato de sodio) o retardar (lignina, lignosulfonato de calcio y derivados de celulosa) el proceso de cementación.

Se añade además agentes que prevén la pérdida de fluidos (derivados de celulosa), dispersantes (productos orgánicos sintéticos), controladores de densidad (bentonita, tierra rica en diatomeas -para reducirla- barita, arena –para aumentarla).entre otros, cada uno con distintos grados de riesgo para el ambiente y la salud.

### **- Las aguas de producción**

Se componen de aguas de formación, y aguas que se contaminan al inyectarlas a un yacimiento petrolero (esta actividad utiliza una gran cantidad de agua superficial).

Estas aguas son altamente contaminantes, por lo que representan un alto riesgo para la fauna, flora, suelos, fuentes de agua y el ser humano. La mayor parte del agua potable en el mundo se encuentra en acuíferos (aguas subterráneas) de poca profundidad. La mayoría de los acuíferos de agua potable se alimentan de fuentes superficiales y son altamente susceptibles a contaminarse con otros fluidos.

Las aguas de producción son un contaminador 'ideal', pues esencialmente tienen la misma gravedad específica del acuífero y son fácilmente mezclables con el agua fresca.

Las concentraciones de sales en el agua de formación pueden llegar a ser varias veces más alta que la del agua de mar, afectando negativamente a la fauna y flora nativa. Otra fuente importante de impactos, son las altas temperaturas que alcanzan estas aguas. Por ello existen restricciones para su manipulación y/o deposición.

Según el Capítulo III (Reglamento ambiental para el sector hidrocarburos) de la perforación terminación e intervención se deberá construir fosas de lodo, que se realizaran en función del volumen a manejar, de manera que esta mantenga un mínimo de borde libre. Su construcción debe ser realizada en forma tal que permita una máxima reutilización del agua para la preparación del lodo.

No deben ser construidas sobre áreas con material de relleno, deben ser revestidas e impermeabilizadas con arcilla, u otro material para prevenir infiltraciones.



## CAPITULO VII

### EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

#### 7.1. EVALUACIÓN TÉCNICA

El presente proyecto está dirigido a realizar una cementación remedial en el liner de 7" del ramal superior perteneciente al pozo SBL-X7; con la formulación y selección de una de las nuevas tecnologías (CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraLiteCRETE) para ser desplazado en el espacio anular para un afectivo aislamiento zonal. Para lo cual se realizará una evaluación técnica a partir del estudio de las características geológicas de las formaciones de interés, lo cual permite evaluar el estado actual del pozo.

En el análisis se determinó los problemas que presenta la formación Huamampampa (formación de interés) donde se encuentra el liner de 7" del ramal superior, esta formación que está conformada en su mayoría por arena arcillosa con presencia de micro-fracturas naturales, ocasiona pérdidas de circulación, problemas de presiones sub-normales, riesgo de inestabilidad y migraciones severas de gas condensado.

Por medio del análisis de los registros de calidad de cementación remedial se determinó que se presenta una cementación de mala calidad, baja consistencia con una inadecuada adherencia entre la tubería-cemento y cemento-formación en el intervalo 3857 – 4307,6 metros; mismo que pudo ser ocasionado debido a una pérdida de circulación de la lechada a la formación por las fracturas naturales, y aportes de gas condensado que presenta la formación, siendo la operación de aislamiento inefectiva. Por tanto se pretende optimizar la cementación remedial con una de las nuevas tecnologías de cementos.

Por medio del análisis teórico se determinó una mayor factibilidad del uso de la lechada de cemento de fibras DensCRETE, a diferencia de las otras lechadas de

prueba. Para aplicar la lechada seleccionada en el pozo SBL-X7, esta es diseñada con una alta concentración de aditivos más sólidos denominadas arenas, lo que hace que la lechada tenga mayor durabilidad en tiempo y mejores propiedades para controlar perdidas de circulación, además que soporta cambios de presión y temperatura adecuándose a formaciones que presentan alta permeabilidad por las fracturas; su correcta formulación con los aditivos de obturación Carbonato de Calcio, cloruro de sodio, hacen que la lechada no ingrese a la formación y ayuda a un mejor aislamiento de las zonas de interés minimizando la perdida de fluido al formar una costra delante de las micro fracturas y evitando cualquier tipo de invasión de gas o algún otro fluido de la formación hacia el anular.

**TABLA 7.1 Resultados formulación de lechada propuesta DensCRETE**

<b>RESULTADOS</b>		
<b>Requerimiento de agua (RW)</b>	44	%
<b>Rendimiento</b>	41,60	[l/sk]
<b><math>\rho_{\text{cemento}}</math></b>	16,34	[ppg]
<b>Numero de sacos de lechada</b>	137	[sk]

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

Con un mayor número de sacos de cemento clase “G” para llegar al volumen de lechada deseado (35,83 Bbl) a comparación de CemNET, LiteCRETE y UltraLiteCRETE.

#### **7.1.1. Evaluación técnica por tecnologías**

##### **- Numero de sacos requeridos para cemento fibras CemNET**

$$\text{Numero de sacos de cemento} = \frac{5696,97 [l]}{75,779 [l/sk]} = 75,18 \approx 76 [sk]$$

**TABLA 7.2 Sacos para Cemento Fibras CemNET**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	PESO (lb)	SACOS
Cemento "G"	110	8910	76
NaCl (5%)	5,50	445,5	4,05
Barita (12%)	13.20	1069,2	9,72
CaCO <sub>3</sub> (6.5%)	7.15	579,15	5,27
Surfactante(7 %)	7.70	623,7	5,67
H <sub>2</sub> O	106,70	8642,7	78,57

**FUENTE:** Elaborado con base a cálculos realizados

- Número de sacos requeridos para cemento DensCRETE

$$\text{Numero de sacos de cemento} = \frac{5696,97 [l]}{41,60 [l/sk]} = 136,88 \approx 137 [sk]$$

**TABLA 7.3 Sacos para Cemento DensCRETE**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	PESO (lb)	SACOS
Cemento "G"	110	15070	137
NaCl (5%)	5,5	753,5	6,85
Bentonita (6%)	6,6	904,20	8,22
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,6%)	0,66	90,42	0,822
Barita (7 %)	7,7	1054,9	9,59
Pulzolana(1%)	1,1	150,7	9,59
H <sub>2</sub> O	106,70	14617,9	132,89

**FUENTE:** Elaborado con base a cálculos realizados

- Número de sacos requeridos para cemento LiteCRETE

$$\text{Numero de sacos de cemento} = \frac{5696,97 [l]}{71,70 [l/sk]} = 79,46 \approx 80 [sk]$$

**TABLA 7.4 Sacos para Cemento LiteCRETE**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	PESO (lb)	SACOS
Cemento "G"	110	8800	80
KCl (8%)	8,8	704	6,4
Bentonita (6%)	6,6	528	4,8
CaCO <sub>3</sub> (6,5%)	7,15	572	5,2
Surfactante(7 %)	7.70	616	5,6
H2O	106,70	8536	77,6

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

- **Número de sacos requeridos para cemento UltraLiteCRETE**

$$\text{Numero de sacos de cemento} = \frac{5696,97 [l]}{94,59 [l/sk]} = 60,23 \approx 61 [sk]$$

**TABLA 7.5 Sacos para Cemento UltraliteCRETE**

MATERIAL	PESO (lb/sk)	PESO (lb)	SACOS
Cemento "G"	110	6710	61
NaCl (5%)	5,5	335,5	3,05
Bentonita (6%)	6,6	402,6	3,66
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,6%)	0,66	40,26	0,366
Barita (7 %)	7,7	516,67	4,697
Pulzolana(1%)	1,1	67,1	0,61
H2O	165,0	10065	91,5

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

Posterior al análisis de los registros de calidad de cemento y los análisis de los diferentes tipos de lechadas de cemento, se determinó que un óptimo diseño de

la estructura final de cementación remedial por circulación se alcanza mediante la utilización de la lechada de fibras DensCRETE.

Para lograr un adecuado manejo de presiones de circulación, a fin de no generar pérdidas de lechada a formación, se emplea el uso de Drill Pipe combinado (5 ½” y 3 ½”). De igual manera, para lograr una mejor colocación de los 35,83 (Bbl) de lechada en la zona a remediar (405,6 metros de longitud) se emplea para la etapa final de la cementación, flujo tapón, alcanzando un tiempo operativo de 99.53 minutos, el cual se enmarca dentro del tiempo de bombeabilidad del cemento.

Finalmente, para proporcionar un adecuado tiempo de fragüe del cemento en la zona de interés, se utiliza un retenedor de cemento, lo cual evita que el cemento pueda desplazarse y genere un óptimo sello entre el casing y la formación.

En la siguiente tabla se presenta el diseño de la cementación remedial propuesta:

**TABLA 7.6 Tabla de Estructura de Cementación Remedial**

<b>CEMENTACION REMEDIAL POZO SBL-X7 LINER 7” (3857 – 4307 m)</b>				
<b>ESTRUCTURA CEMENTACIÓN REMEDIAL</b>				
<b>Altura del tapón mecánico recuperable</b>	3817,2 m			
<b>Tapón retenedor de cemento anclado</b>	4265,6 m			
<b>Longitud Drill Pipe 3 ½”</b>	448,4 m			
<b>Longitud de Drll Pipe 5 ½”</b>	3817,2 m			
<b>Longitud espacio anular a cementar</b>	450,6 m			
<b>Longitud tapón de cemento (RH)</b>	20 m			
<b>FLUIDOS DESPLAZADOS</b>				
<b>FLUIDO</b>	<b>DENSIDAD (ppg)</b>	<b>VOLUMEN (Bbl)</b>	<b>CAUDAL (Bbl/min)</b>	<b>TIEMPO (min)</b>
<b>Mezclado de lechada</b>				30

<b>Lavador</b>	15	8	5-6	1,6
<b>Espaciador</b>	10	8	5-6	1,6
<b>Lechada de cemento de DensCRETE</b>	16,34	35,83	6	3,33
<b>Desplazamiento</b>	285,02		6	45
<b>Desplazamiento (flujo tapón)</b>	30		2	15
	TIEMPOS (min)			
<b>Tiempo de bombeo</b>	99,53			
<b>Tiempo de bombeabilidad</b>	157,91			

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

La lechada de cemento de DensCRETE con densidad de 16,34 (ppg) es óptimo a ser aplicado en la operación de cementación remedial de forma segura y rentable sin riesgos de costos adicionales por la pérdida de lechada, además de los costos operacionales por día, y futuros trabajos de aislamiento y reparación.

**7.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Para la evaluación económica se realizará el análisis costo - beneficio en base a un análisis comparativo de los costos de la lechada de cemento de (DensCRETE) frente a los costos de las lechadas de cemento ( fibras CemNET, LiteCRETE y UltraLiteCRETE) considerando el número de sacos tanto de cemento y aditivos analizadas en la evaluación técnica.

Con el propósito de asociar y evaluar la diferencia entre estos, en el que se presentaran costos aproximados basados en los precios unitarios del cemento y aditivos y reportes de costos de servicios de cementación de BJ Services. Considerando que un saco tiene 110 lb.

**- Costos del trabajo de cementación remedial más los aditivos – cemento**

Se realizó la comparación de los costos en los que se incurre cuando se realiza la primera cementación conjunto a los costos de operación de la cementación remedial.

En la tabla posterior se presenta los costos unitarios de los aditivos, cemento tanto de la cementación primaria y remedial, además de los servicios y personal para la operación de cementación remedial con las diferentes lechadas de cemento para realizar una estimación de costos.

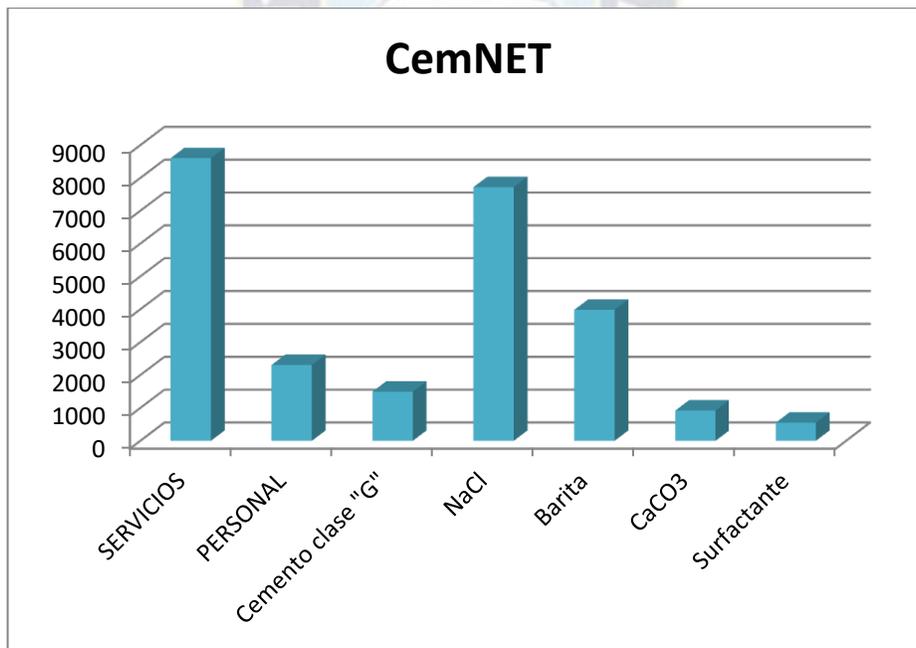
**TABLA 7.7 Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento de Fibras CemNET**

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	UNIDAD		TOTAL \$
<b>SERVICIOS</b>					
Servicio de cementaciones	636,224	1	dia	1	636,224
Cons/direccionales	1005,72	1	dia	1	1005,72
Herr./Direccional (tub.)	5087,51	1	dia	1	5087,51
Tanque de mezcla	310	1	dia	1	310
Control automático de densidad	800,9	1	dia	1	800,9
Densimeter DB-IV	263	1	dia	1	263
Transporte de cemento	0,84	1	dia	1	0,84
Stinger para la Cementación	500	1	dia	1	500
<b>Total</b>					<b>8604,194</b>
<b>PERSONAL</b>					
Ingeniero	1050	1	dia	1	1050
Operador	613	1	dia	1	613
Operador de cemento	433	1	dia	1	433
Ayudante de cementación	210	1	dia	1	210
<b>Total</b>					<b>2306</b>

<b>CEMENTO ADITIVOS</b>					
Cemento clase "G"	19,66	76	sk	1	1494,16
NaCl	183,79	42	sk	1	7719,18
Barita	398,2	10	sk	1	3982
CaCO <sub>3</sub>	153,16	6	sk	1	918,96
Surfactante	91,89	6	sk	1	551,34
<b>Total</b>					<b>14666</b>
<b>Total de la cementación</b>					<b>25576</b>

**FUENTE:** Elaborado con base en datos recopilados

**FIGURA 7.1** Costos de Cementación Remedial Fibras CemNET



**FUENTE:** Elaborado con base a cálculos realizados

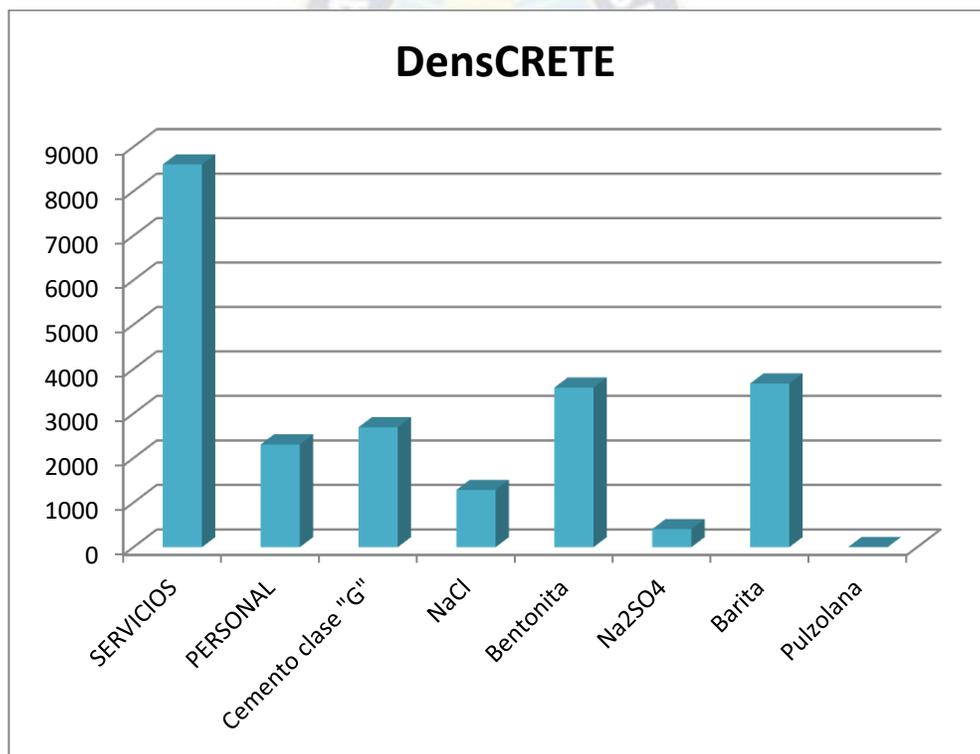
**TABLA 7.8 Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento  
DensCRETE**

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	UNIDAD		TOTAL \$
<b>SERVICIOS</b>					
Servicio de cementaciones	636,224	1	dia	1	636,224
Cons/direccionales	1005,72	1	dia	1	1005,72
Herr./Direccional (tub.)	5087,51	1	dia	1	5087,51
Tanque de mezcla	310	1	dia	1	310
Control automático de densidad	800,9	1	carga	1	800,9
Densimeter DB-IV	263	1	carga	1	263
Transporte de cemento	0,84	1	carga	1	0,84
Stinger para la Cementación	500	1	carga	1	500
<b>Total</b>					<b>8604,194</b>
<b>PERSONAL</b>					
Ingeniero	1050	1	dia	1	1050
Operador	613	1	dia	1	613
Operador de cemento	433	1	dia	1	433
Ayudante de cementación	210	1	dia	1	210
<b>Total</b>					<b>2306</b>
<b>CEMENTO ADITIVOS</b>					
Cemento clase "G"	19,66	137	sk	1	2693,42
NaCl	183,79	7	sk	1	1286,53
Bentonita	398,2	9	sk	1	3583,8

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	406,81	1	sk	1	406,81
Barita	367,57	10	sk	1	3675,7
Pulzolana	0,4	10			4
<b>Total</b>					<b>11651</b>
<b>Total de la cementación</b>					<b>22561</b>

FUENTE: Elaborado con base en datos recopilados

FIGURA 7.2 Costos de Cementación Remedial DensCRETE



FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados

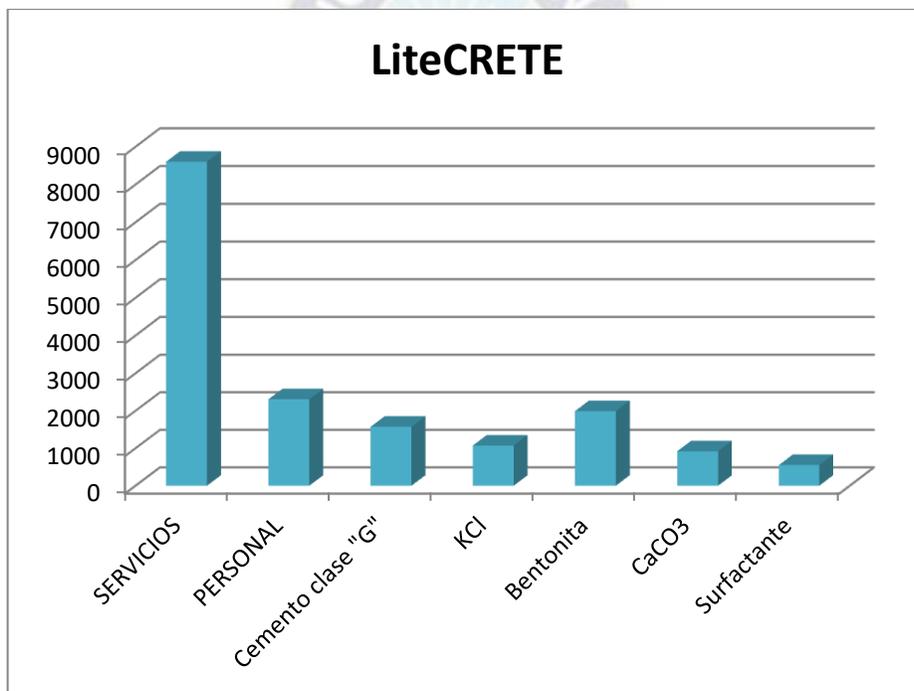
**TABLA 7.9 Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento  
LiteCRETE**

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	UNIDAD		TOTAL \$
<b>SERVICIOS</b>					
Servicio de cementaciones	636,224	1	dia	1	636,224
Cons/direccionales	1005,72	1	dia	1	1005,72
Herr./Direccional (tub.)	5087,51	1	dia	1	5087,51
Tanque de mezcla	310	1	dia	1	310
Control automático de densidad	800,9	1	carga	1	800,9
Densimeter DB-IV	263	1	carga	1	263
Transporte de cemento	0,84	1	carga	1	0,84
Stinger para la Cementación	500	1	carga	1	500
<b>Total</b>					<b>8604,194</b>
<b>PERSONAL</b>					
Ingeniero	1050	1	dia	1	1050
Operador	613	1	dia	1	613
Operador de cemento	433	1	dia	1	433
Ayudante de cementación	210	1	dia	1	210
<b>Total</b>					<b>2306</b>
<b>CEMENTO ADITIVOS</b>					
Cemento clase "G"	19,66	80	sk	1	1572,80
KCI	153,16	7	sk	1	1072,12
Bentonita	398,2	5	sk	1	1991,00

CaCO <sub>3</sub>	153,16	6	sk	1	918,96
Surfactante	91,89	6	sk	1	551,34
<b>Total</b>					<b>6106,22</b>
<b>Total de la cementación</b>					<b>17016</b>

FUENTE: Elaborado con base en datos recopilados.

FIGURA 7.3 Costos de Cementación Remedial LiteCRETE



FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados.

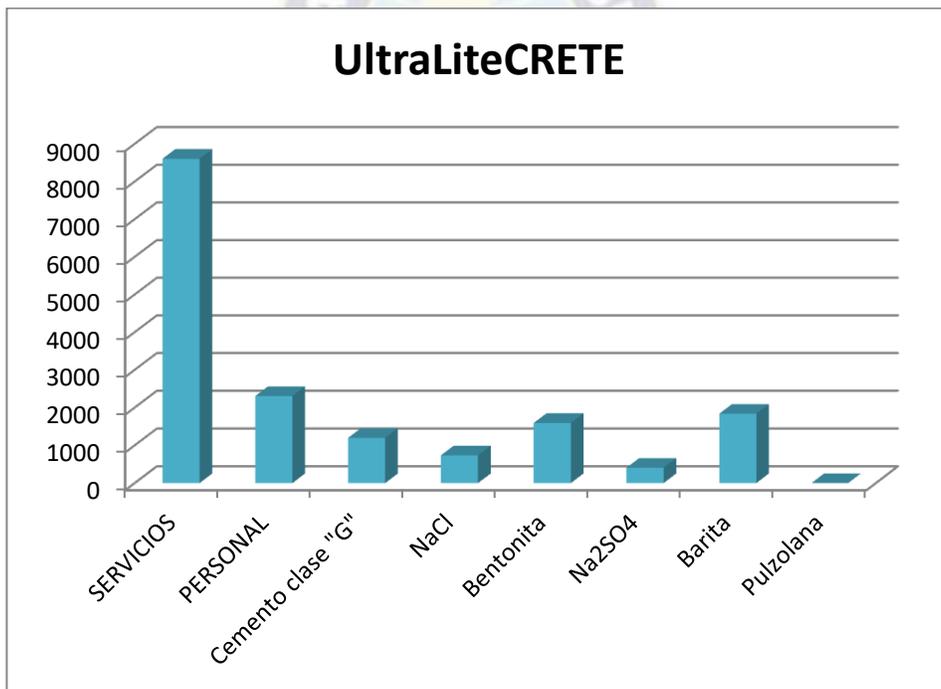
**TABLA 7.10 Costos de Cementación Remedial con Lechada de Cemento  
UltraLITECRETE**

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	UNIDAD		TOTAL \$
<b>SERVICIOS</b>					
Servicio de cementaciones	636,224	1	dia	1	636,224
Cons/direccionales	1005,72	1	dia	1	1005,72
Herr./Direccionales (tub.)	5087,51	1	dia	1	5087,51
Tanque de mezcla	310	1	dia	1	310
Control automático de densidad	800,9	1	carga	1	800,9
Densimeter DB-IV	263	1	carga	1	263
Transporte de cemento	0,84	1	carga	1	0,84
Stinger para la Cementación	500	1	carga	1	500
<b>Total</b>					<b>8604,194</b>
<b>PERSONAL</b>					
Ingeniero	1050	1	dia	1	1050
Operador	613	1	dia	1	613
Operador de cemento	433	1	dia	1	433
Ayudante de cementación	210	1	dia	1	210
<b>Total</b>					<b>2306</b>
<b>CEMENTO ADITIVOS</b>					
Cemento clase "G"	19,66	61	sk	1	1199,26
NaCl	183,79	4	sk	1	735,16
Bentonita	398,2	4	sk	1	1592,80

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	406,81	1	sk	1	406,81
Barita	367,57	5	sk	1	1837,85
Pulzolana	0,46	1	sk	1	0,46
Total					5772,34
<b>Total de la cementación</b>					<b>16683</b>

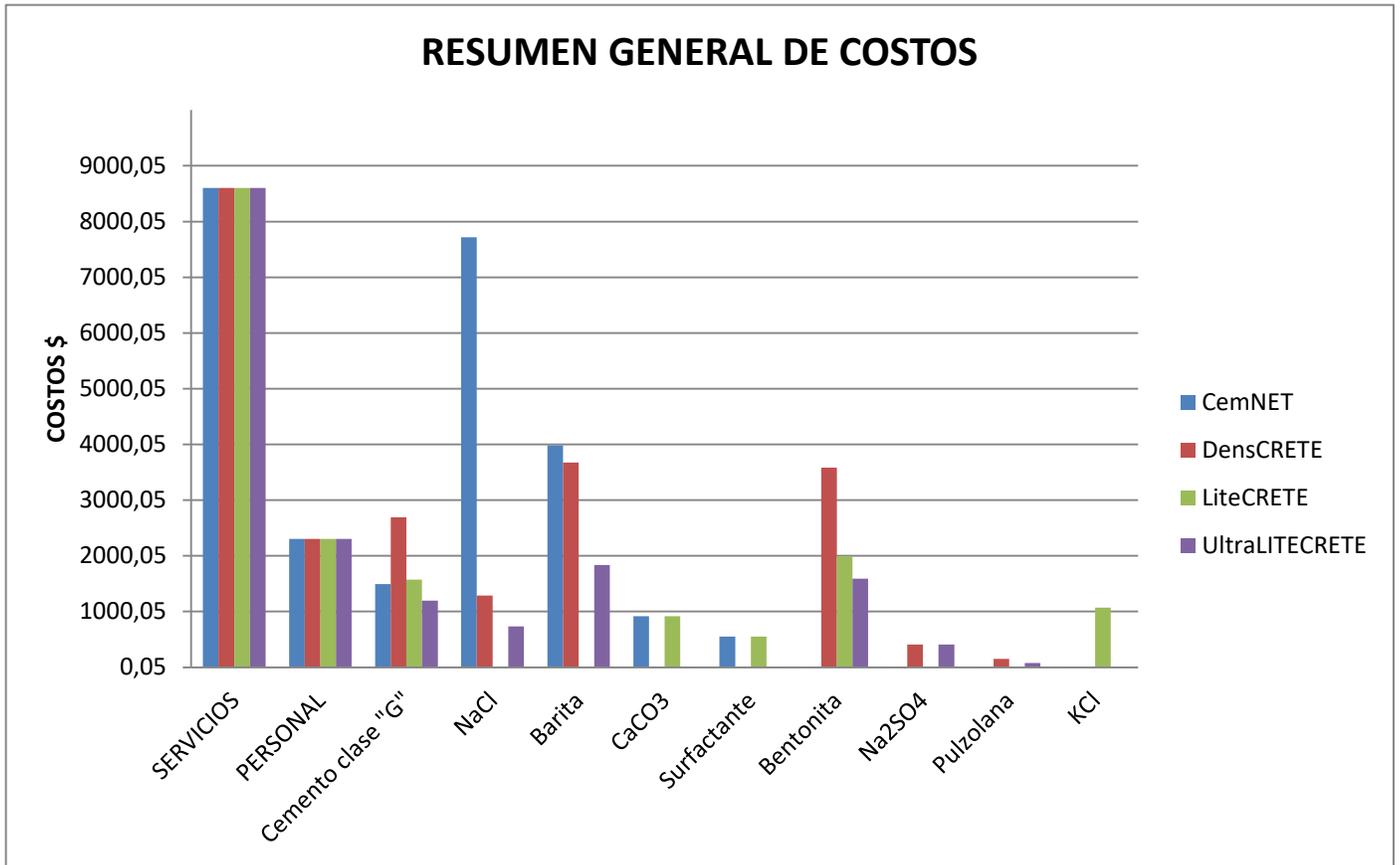
FUENTE: Elaborado con base en datos recopilados

FIGURA 7.4 Costos de Cementación Remedial UltraLiteCRETE



FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados

**FIGURA 7.5 Resumen General de Costos**



**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

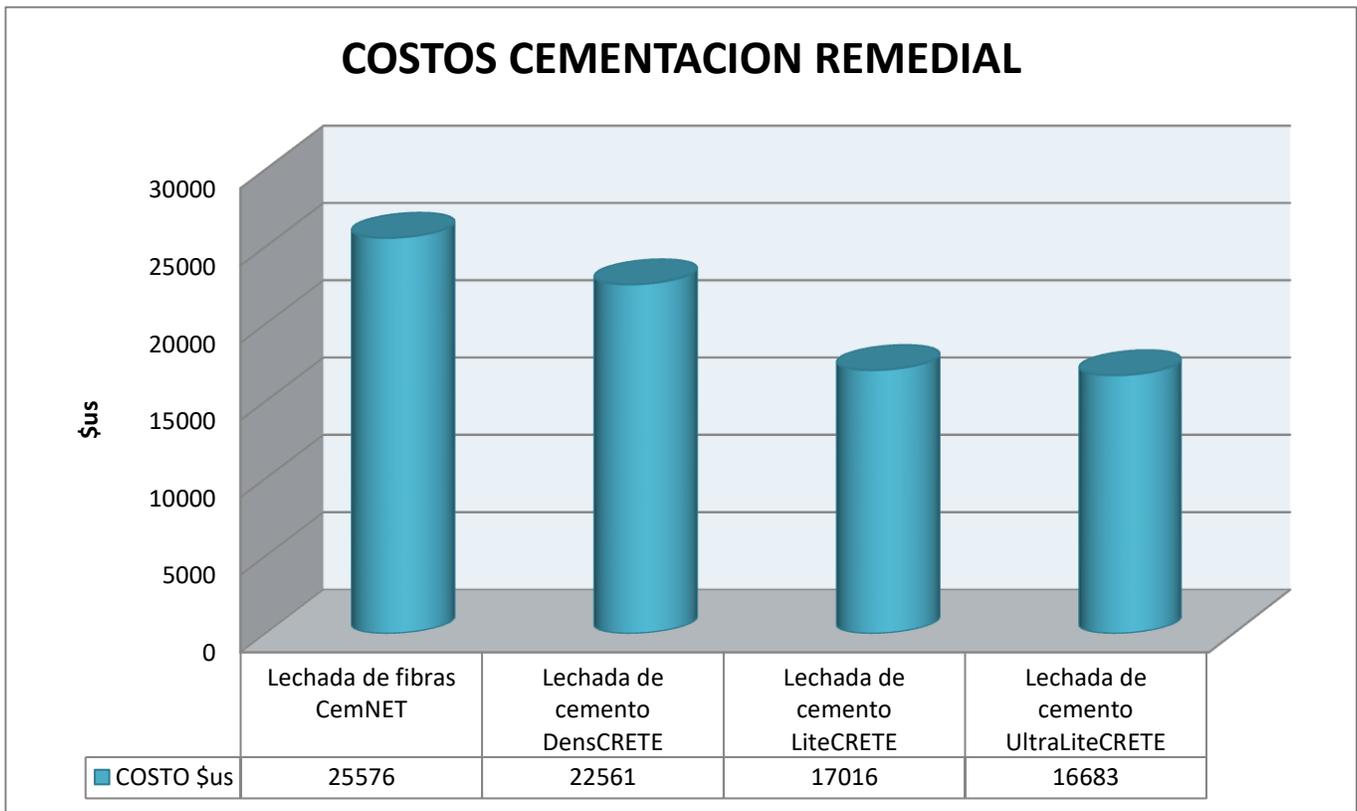
Se tiene un costo para la cementación remedial de:

**TABLA 7.11 Diferencia de Costos de Lechadas de Cemento**

<b>CEMENTACION REMEDIAL</b>	<b>COSTO (\$us)</b>
Lechada de fibras CemNET	25576
Lechada de cemento DensCRETE	22561
Lechada de cemento LiteCRETE	17016
Lechada de cemento UltraLiteCRETE	16683

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

**FIGURA 7.6 Diferencia de Costos de Lechadas de Cemento**



**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados**

Donde se puede observar que el costo de la cementación remedial DensCRETE resulta un valor menor (22561 \$us) que el cemento CemNET (25576 \$us), y los cementos LiteCRETE (17016 \$us) y UltraLiteCRETE (16683 \$us) son aún más menores.

### **7.3. Comparación y evaluación económica de la cementación**

Realizando la comparación económica entre la cementación convencional y la propuesta, se evaluarán los costos de cemento, aditivo y servicios de cementación.

El costo total de todos los tramos de servicios de cementación convencional es de 267420 \$us, sin embargo el costo total de cemento y aditivo es 545547 \$us. Ver las tablas 7.12 y tabla 7.13

**TABLA 7.12 Control de costos**

<b>CUENTA</b>	<b>ACTIVIDAD PERFORACIÓN</b>	<b>AFE APROBADO</b>	<b>COSTO SAP</b>
730201001	PROGRAMA PERFORACION Y EVAL.	29.700	336.815
730201002	CONTRATO EQUIPO PERFORACION	29.700	20.821
730201003	CONTRATOS ADICIONALES	29.700	
730201004	ESPECIFICACION COMPRA MATERIAL	29.700	915
730201099	OTROS-PRELIMINARES	29.700	
<b>PRELIMINARES</b>		<b>148.500</b>	<b>358.551</b>
730202004	MANTENIMIENTO	200.000	
730202099	OTROS-OBRA CIVILES	50.000	160
<b>OBRA CIVILES</b>		<b>250.000</b>	<b>160</b>
730203001	TARIFA DIARIA	10.812.900	10.637.539
730203002	MOV/DESMOVLIZACION	1.750.000	900.000
730203099	OTROS-EQUIPO DE PERFORACION	370.000	15.335
<b>EQUIPO DE PERFORACION</b>		<b>12.932.900</b>	<b>11.552.874</b>
730204001	PERSONAL	199.500	14.391
730204002	ALQUILER EQUIPO Y VEHICULOS	25.935	276.156
730204003	SERVICIO DE ALIMENTACION	21.546	5.583
730204004	COMBUSTIBLES Y COMUNICACIONES	50.000	
730204005	SEGURIDAD	10.408	4.706
730204099	OTROS-CAMPAMENTO BASE	30.000	
<b>CAMPAMENTO BASE</b>		<b>337.389</b>	<b>300.836</b>
730205001	SERV/CEMENTACIONES	672.006	267.420
730205002	SERV/REGISTRO DE PERFORACION	2.224.530	3.008.003
730205003	PUNZADO O BALEO		434.826
730205004	PRUEBAS DE FORMACION	850.000	2.049.666
730205005	SERV./INGENIERIA DE LODOS	201.722	555.879
730205006	MUD LOGGING	840.915	615.870
730205007	CORONEO	70.000	55.468
730205008	ESTIMULACION		251.933
730205009	SERVICIO DE ENTUBACION	765.100	525.607
730205010	CONSULTORES DIRECCIONAL	1.376.950	675.798
730205011	ALQUILER HTAS DIRECCIONAL	7.546.705	3.801.293
730205012	CONSULTORIA DE PESCA	100.000	
730205013	HERRAMIENTAS DE PESCA	200.000	124.655
730205014	HERRAMIENTAS DE PERFORACION	334.258	476.258

**FUENTE: Informe final del pozo SBL X7**

**TABLA 7.13 Control de costos**

<b>CUENTA</b>	<b>ACTIVIDAD PERFORACIÓN</b>	<b>AFE APROBADO</b>	<b>COSTO SAP</b>
730205015	AIR DRILLING	841.515	802.426
730205016	CONTROL DE SÓLIDOS	1.238.338	1.035.011
730205017	MANEJO DE DESECHOS TDU	900.000	816.737
730205020	SERVICIO DE ALIMENTACION	538.650	707.852
730205021	INSPECCION DE TUBERÍA	51.854	220.530
730205022	ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO	60.000	96.088
730205023	SAFETY & SECURITY		5.917
730205024	SLIKE LINE		36.387
730205025	COILED TUBING- TUBERÍA FLEXIBLE		124.607
730205027	PROTECTORES DE CAÑERÍA	715.500	39.090
730205028	REGISTRO GYRODATA	195.000	
730205029	TORQUEADO DE BRIDAS	140.000	9.817
730205030	SOLDADURA DE CABEZAL		28.974
730205031	OPERACIÓN LINER HANGER		155.681
730205032	HTAS APERTURA VENTANAS EN CSG.	110.000	652.681
730205033	CONSULT. APERTURA VENTANAS CSG.	41.800	201.491
730205036	EQUIPO CONTRA INCENDIOS	241.800	63.907
730205037	SERVICIO DE HOOK HANGER	200.000	104.948
730205038	CONSULTOR HOOK HANGER		
730205099	OTROS-SERVICIOS	105.200	255.465
<b>SERVICIOS</b>		<b>20.561.843</b>	<b>18.200.285</b>
730206003	CABEZAL DE POZO	85.000	85.412
730206004	TREPANOS	1.365.000	1.674.408
730206006	MATERIAL DE LODOS	2.277.000	2.679.412
730206007	CEMENTO Y ADITIVOS	1.020.000	545.547
730206009	TUBULARES	3.952.438	283.592
730206010	ACCESORIOS Y REVEST. CAÑERÍA	1.365.000	4.185.583
730206011	MAT. PARA PRUEBA DE POZO		
730206012	SARTA DE PRUEBAS		1.711
730206014	SARTA DE PRODUCCION		460.583
730206015	EQUIPO SUBSUPERFICIAL DE PROD.		30.346
730206019	HOOK HANGER		
730206099	OTROS MATERIALES	145.000	35.046

**FUENTE: Informe final del pozo SBL X7**

Por otra parte los costos de cemento y aditivos obtenido mediante el análisis de selección de tecnologías (DensCRETE) para el tramo liner de 7" del Ramal Superior es 11.651 \$us y de servicios 10.910 \$us.

En función al volumen total de cementación convencional del Pozo SBL-X7 se observa que el tramo Liner 7 Ramal Superior es 62 Bbl, y tuvo un porcentaje de volumétrico de 3.1%, que se detalla en la siguiente tabla 7.14

**TABLA 7.14 Control de costos**

<b>CAÑERÍA</b>	<b>Lechadas de cemento convencional</b>	<b>Bbl</b>	<b>% Vol.</b>	<b>Costos por tramo cemento y aditivo (\$us)</b>	<b>Costos por servicios de cementación (\$us)</b>	<b>Costo total por tramo (\$us)</b>
<b>30"</b>	Lechada de relleno	0	0	0	0	0
	Lechada principal	150	7,4	40272	19741	60012
<b>20"</b>	Lechada de relleno	437	21,5	117325	57511	174836
	Lechada principal	246	12,1	66046	32375	98420
<b>13 3/8"</b>	Lechada de relleno	535	26,3	143636	70408	214044
	Lechada principal	110	5,4	29533	14476	44009
<b>9 5/8"</b>	Lechada de relleno	267	13,1	71684	35138	106822
	Lechada principal	150	7,4	40272	19741	60012
<b>Liner 7" Inferior</b>	Lechada de relleno	0	0	0	0	0
	Lechada principal	75	3,7	20136	9870	30006
<b>Liner 7" Superior</b>	Lechada de relleno	0	0	0	0	0
	Lechada principal	62	3,1	16646	8159	24805
<b>Total</b>		2032	100	545547	267420	812967

**FUENTE: Elaborado con base a cálculos realizados.**

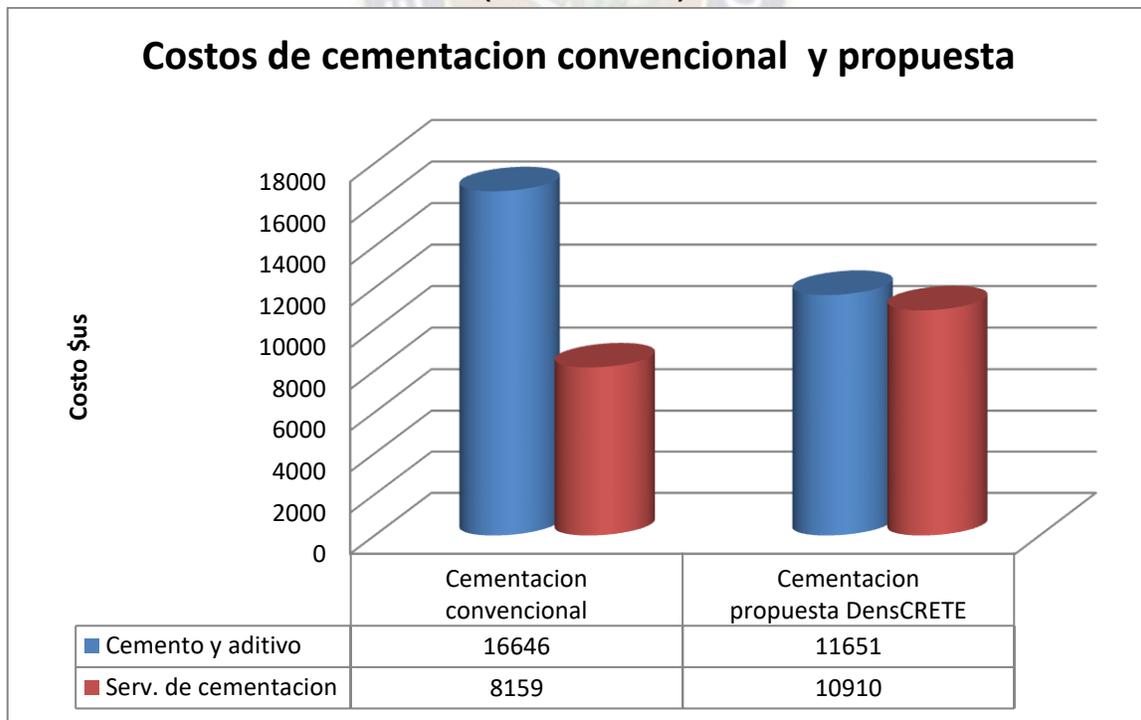
Con los valores obtenidos de la anterior tabla 7.14 se realizara la siguiente comparación de cementación convencional con la cementación propuesta.

**TABLA 7.15 Costos de la cementación convencional y propuesta (DensCRETE)**

	<b>Costo Cementación Convencional (\$us)</b>	<b>Costo Cementación propuesta DensCRETE (\$us)</b>
<b>Cemento y aditivo</b>	16646	11651
<b>Servicio de cementación</b>	8159	10910
<b>Total</b>	24805	22561

**FUENTE:** Elaborado con base a cálculos realizados

**FIGURA 7.7 Costos de la cementación convencional y propuesta (DensCRETE)**



**FUENTE:** Elaborado con base a cálculos realizados

Con la comparación obtenida de la figura 7.7, se observa que el costo de la cementación propuesta DensCRETE del tramo liner de 7" del Ramal Superior es de 22561 \$us, sin embargo el costo de la cementación convencional del tramo liner 7" es 24805 \$us.

Teniendo la diferencia entre estos resultados es de 2244\$us como utilidad.



## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los objetivos planteados, se darán las conclusiones y recomendaciones que se determinarán de acuerdo a los resultados obtenidos.

#### 8.1. CONCLUSIONES

.Se realizó el diagnóstico geológico estratigráfico del pozo SBL-X7 se identificaron las profundidades en las cuales la formación Huamampama presenta micro fracturas naturales, ocasionando problemas de presiones sub-normales, inestabilidad y pérdidas de circulación.

Con el análisis del Registro Caliper y Gamma Ray del Liner 7" Ramal Superior, se determinó que la cementación fue de mala calidad con presencia de gas-condensado, deficiente consistencia y adherencia entre el cemento y formación.

Se analizó el estado de la cementación primaria del pozo, mediante un análisis de ingeniería, llegando a determinar las características y propiedades de las nuevas tecnologías de cementación disponibles, donde se determinó que la lechada de cemento DensCRETE resulta ser la más apropiada para ser aplicada en el pozo SBL-X7 debido a las propiedades y características que presenta.

Se logró diseñar la estructura final de la cementación remedial propuesta para mejorar el aislamiento zonal del tramo Liner de 7" utilizando la nueva tecnología de lechada de cemento DensCRETE.

Se formuló las cuatro tecnologías de lechadas: fibras CemNET, DensCRETE, LiteCRETE y UltraLiteCRETE con densidades 12,5 ppg, 16,34 ppg, 13,04 ppg y 11,867ppg respectivamente. Tales densidades no difieren en la concentración de los aditivos, sin embargo el balance de materia permite identificar la variación del rendimiento del cemento, requerimiento de agua y peso total por cada saco de cemento, correspondientes a cada lechada.

Se demostró que mediante la utilización de la lechada de cementación DensCRETE se tiene un resultado económico intermedio entre las demás tecnologías y es más eficiente en comparación con el uso de otras técnicas de cementación, por otro lado de acuerdo a la evaluación económica que se realizó con la cementación convencional se tiene que el costo de la cementación propuesta DensCRETE tiene un costo de 22561 \$us y el costo de la cementación convencional es 24805 \$us teniendo una diferencia de 2244\$us como ahorro garantizando además gastos futuros en trabajos de cementación remedial.

## **8.2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda ajustar las lechadas según requerimiento del pozo en volumen de lechada, reología, densidad adecuada, mayor tiempo de bombeabilidad del requerido, ajustar según temperatura del pozo.
- Se recomienda el uso de software para el análisis de esfuerzos compresivos del cemento, y equipos de laboratorio para un mejor diseño de las lechadas en función las características que se quiera cementar.
- Se recomienda tomar en cuenta la lechada DensCRETE como propuesta para ser aplicada en trabajos de cementación primaria, a fin de evitar cementaciones remediales que incrementen los costos del proyecto.

## BIBLIOGRAFIA

1. ÁLVAREZ HERRERA, María Camila, "Evaluación de los resultados de cementación de la sección intermedia de un pozo inyector de un campo en la cuenca llanos orientales por medio de la simulación del uso de la tecnología cabeza rotativa de cementación", Bogotá, Colombia; 2016.
2. ALBARRÁN FLORES, Diego, "Cementación de pozos petroleros en aguas profundas"; 2012.
3. ARCE, "Equipos y accesorios para la cementación." Recuperado el 13 de 10 de 2017, de <https://es.scribd.com/document/.../Equipos-Empleados-Para-La-Cementacion-de-Pozo>.
4. CORREA SALGADO, Edgar Alejandro, "Estudio de pozos candidatos para realizar cementación forzada en los pozos del campo SHUSHUFINDI de EP Petroecuador", Quito, Ecuador; 2012.
5. EPSOL; "Metodología en operaciones de cementación primaria y forzada utilizando nuevas tecnologías", Ecuador; 2009.
6. JACOME PATZMIÑO, Marco Adrian, "Diseño de Fracturamiento Hidráulico para la Optimización de la Producción en el Pozo FICT-2D", Ecuador, 2016.
7. LÓPEZ, Arturo, "Programa de Cementos Petroleros Pet-219 Cementos API"
8. LLUYTO LLUYTO, Ros," Cementación Dinámica para el Tramo Intermedio de 9 8/5 del Pozo SAL – 103I Del Campo San Alberto", La Paz, Bolivia, 2018.
9. Petrobras, Informe Final Pozo SBL- 7, Santa Cruz de la Sierra , Bolivia, 2012.
10. POCLÍN ALVIS, Helen, "Recuperación de hidrocarburos de horizontes productivos someros, en pozos con falta de aislamiento hidráulico usando técnicas de tubería flexible", Lima ,Perú, 2013.
11. Petrobras, Plan de Desarrollo Campo Sábalo, Bolivia, 2008.

12. Ministerio de Hidrocarburos y Energía, campos gasíferos y petrolíferos de Bolivia, La Paz diciembre 2011
13. OILFIELD REVIEWER; “Una red de seguridad para controlar las pérdidas de circulación”, 2004.
14. POCLÍN ALVIS, Helen Rossally, “Recuperación de hidrocarburos de horizontes productivos someros, en pozos con falta de aislamiento hidráulico usando técnicas de tubería flexible”, lima – Perú; 2013.
15. Schlumberger, Cementación de Pozos Petroleros Principios y Tecnologías, 2007.
16. Schlumberger, “Cementación Forzada Teoría y Cálculos Programa de Entrenamiento Acelerado para Supervisores de Pozo”.
17. Schlumberger, “Tecnología LiteCRETE Seminario de Cementación PEMEX Exploración y Producción”, 2003.
18. Schlumberger, “Evaluación de Cementaciones con Registros Sónicos”.
19. Schlumberger, “Perforación Direccional Manual de Entrenamiento” 1996.
20. Schlumberger, “Aditivos de Cementación- Programa de entrenamiento Acelerado para Supervisores de Pozo en IPM.”
21. YEPEZ CARRILLO, Nicolas, “Factibilidad de la cementación de zonas productoras con tecnología CemCRETE en los campos VHR y Cuyabeno”, Quito, Ecuador; 2012.

**ANEXOS**

## **ANEXO 1. Normas API para la cementación**

### **NORMAS API PARA LA CEMENTACION**

La norma API RP 10B perfila las prácticas recomendadas para las pruebas que se llevan a cabo con las lechadas de cemento para los pozos de petróleo, así como sus aditivos; estas pruebas se describen a continuación:

1. Determinación del contenido de agua en la lechada.
2. Determinación de la densidad.
3. Pruebas de resistencia a la compresión.
4. Determinación del filtrado.
5. Determinación del tiempo de bombeabilidad
6. Pruebas de permeabilidad
7. Determinación de las propiedades reológicas.

#### **5.1.7. Normas para trabajos de cementación**

API SPEC 10 A (Especificaciones de cementos y materiales), norma de la industria que especifica el requisito de los cementos para pozos y los métodos de ensayo, brindando recomendaciones para las clases de cementos para pozos incluidos sus requisitos químicos y físicos y los procedimientos para las pruebas físicas.

ASTM C150-07 (Estándares y especificaciones para el cemento portland), trata sobre los 8 tipos de cemento portland, tipo I para cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo, tipo II para uso general más específicamente cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos, tipo III cemento incorporado de aire para los mismos usos del tipo I, tipo IV para cuando se desea bajo calor de hidratación tipo V para alta resistencia a los sulfatos tipo VI para cemento incorporado de aire tipo VII para cuando se

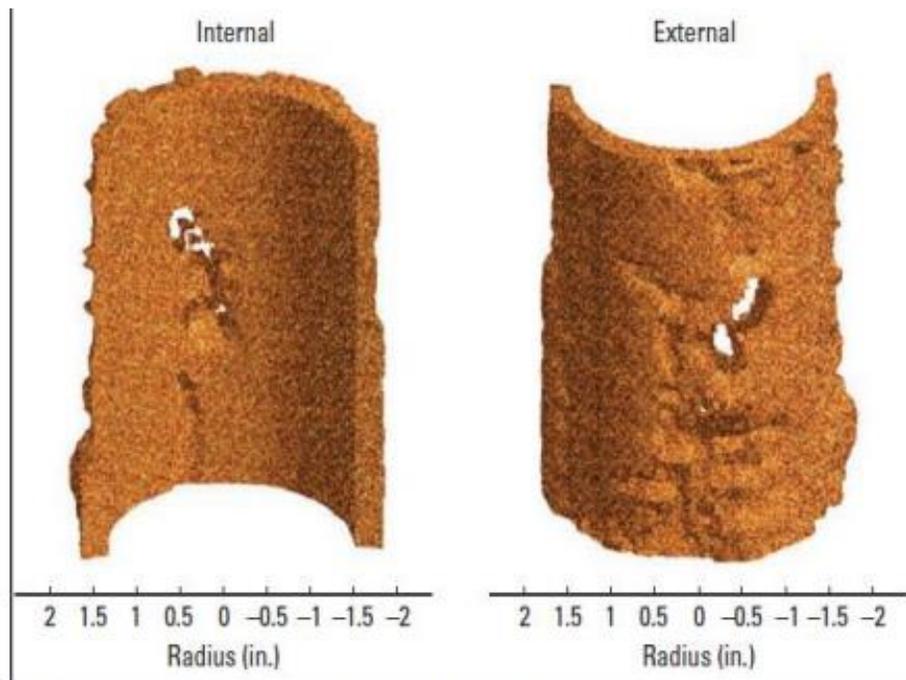
desea alta resistencia inicial, tipo VIII cemento incorporado de aire para los mismos usos del tipo II.

API RP 10F (Prácticas recomendadas para el desempeño y control de calidad de equipos).-norma internacional que describe las prácticas para evaluar el rendimiento de los equipos de cementación para las industrias del petróleo y del gas natural.

ASTM C 125 (Estándares en los usos de aditivos para el concreto), dosis de aditivos relacionados a un pequeño porcentaje de cemento.

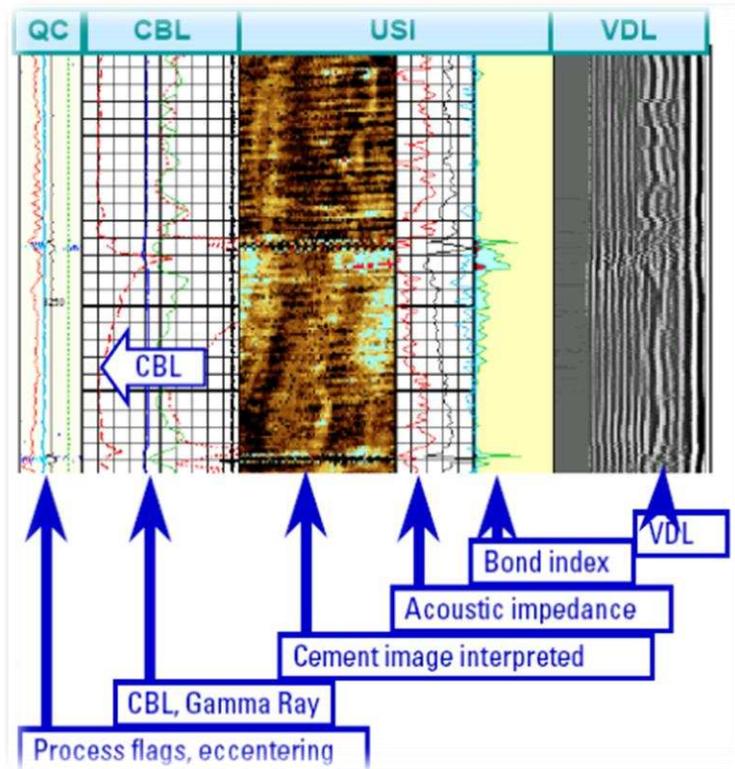
API RP 10 B, delinea las prácticas recomendadas para pruebas de laboratorio que se llevan a cabo con las lechadas de cemento para pozos de petróleo, así como sus aditivos.

## ANEXO 2. Fuga en un Revestimiento



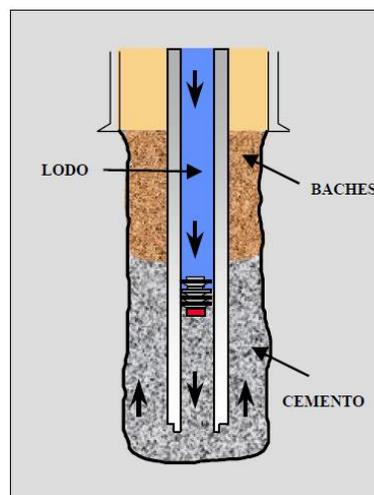
**FUENTE: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.**

### ANEXO 3. Combinación herramienta ultrasónica, CBL y VDL.



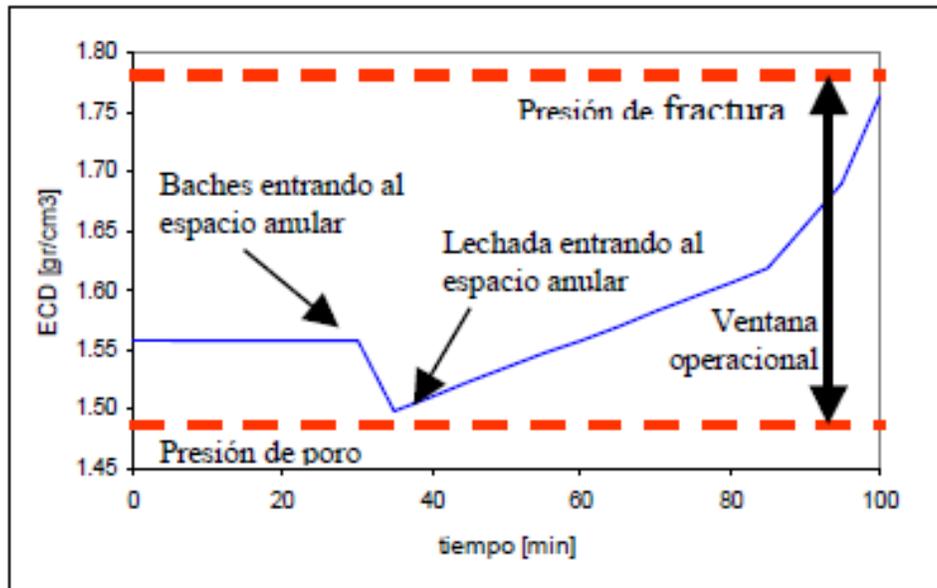
FUENTE: Crain's Petrophysical Handbook. 2009.

### ANEXO 4. Desplazamiento de la lechada.



FUENTE: Perforación y Mantenimiento de Pozos PEMEX

**ANEXO 5. Densidad de circulación equivalente en el fondo del pozo.**



**FUENTE: Perforación y Mantenimiento de Pozos PEMEX**

**ANEXO 6. Accesorios en una cementación.**



Tapones superior e inferior



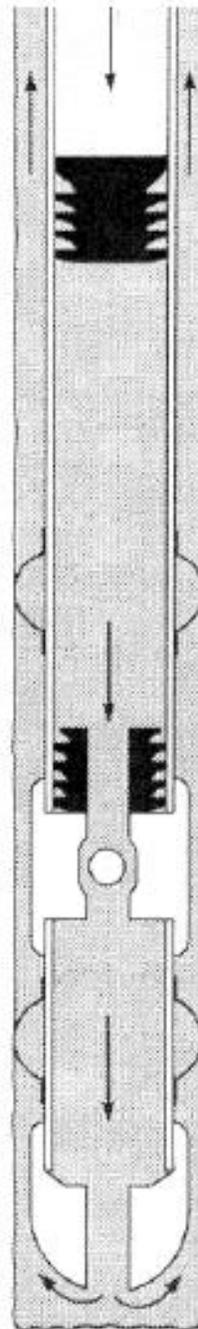
Centrador



Cople flotador

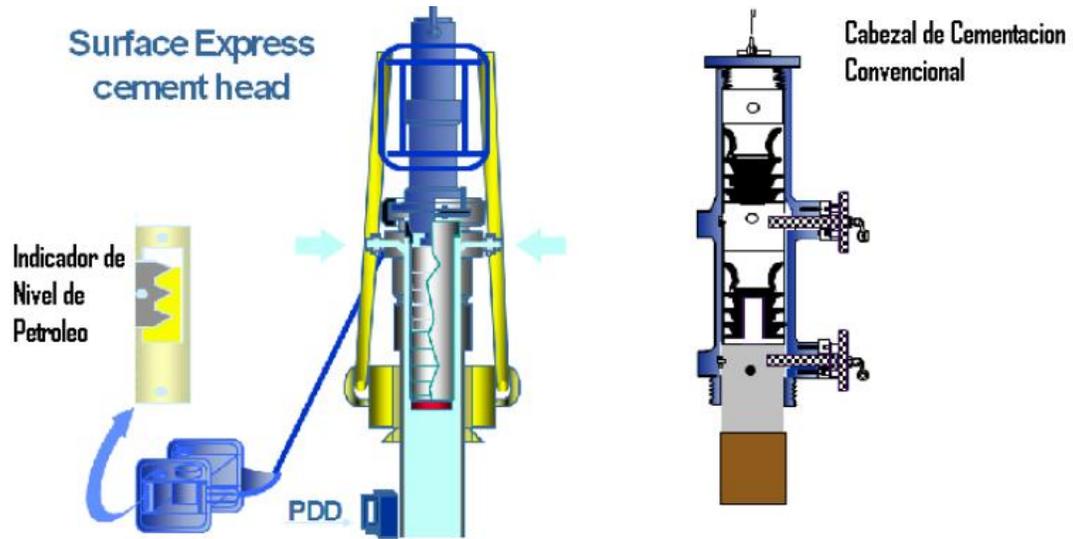


Zapata guía



**FUENTE: Perforación y Mantenimiento de Pozos PEMEX**

## ANEXO 7. Tipos de Cabezal de Cementación.



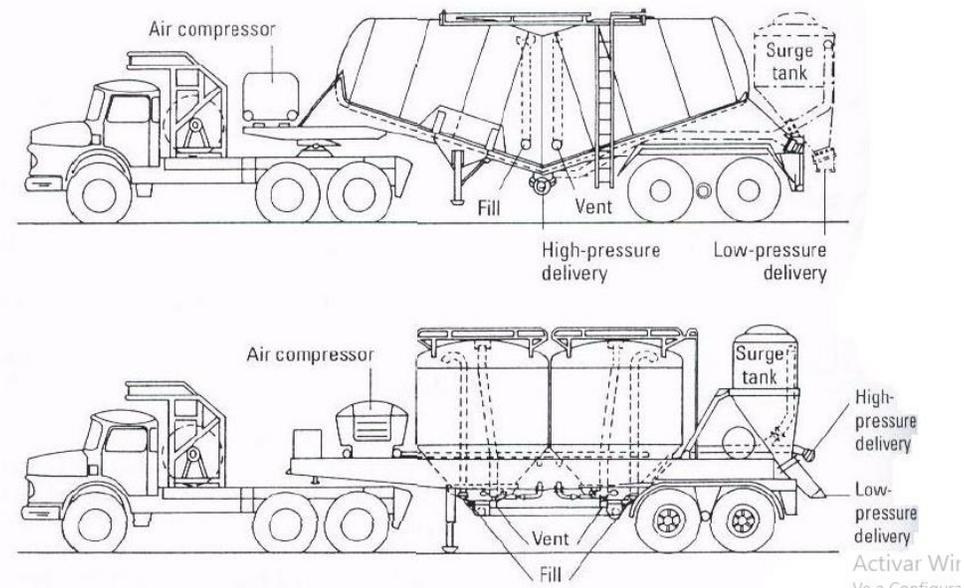
FUENTE: Well Cementing, ERICK B, NELSON

## ANEXO 8. Tapones.



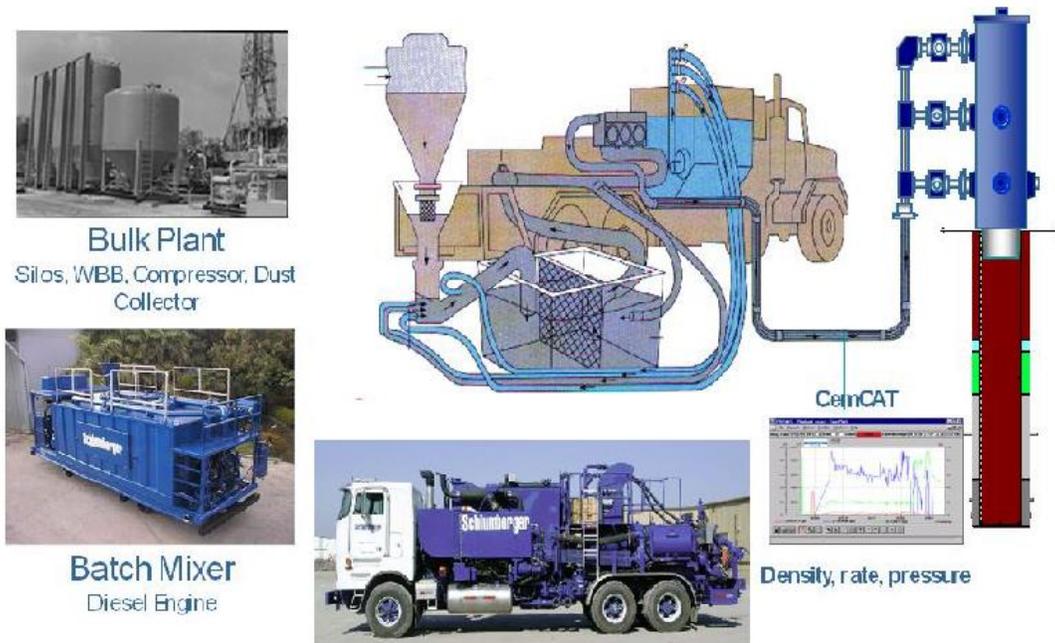
FUENTE: Well Cementing, ERICK B, NELSON.

## ANEXO 9. Tipos Transporte de Cemento.



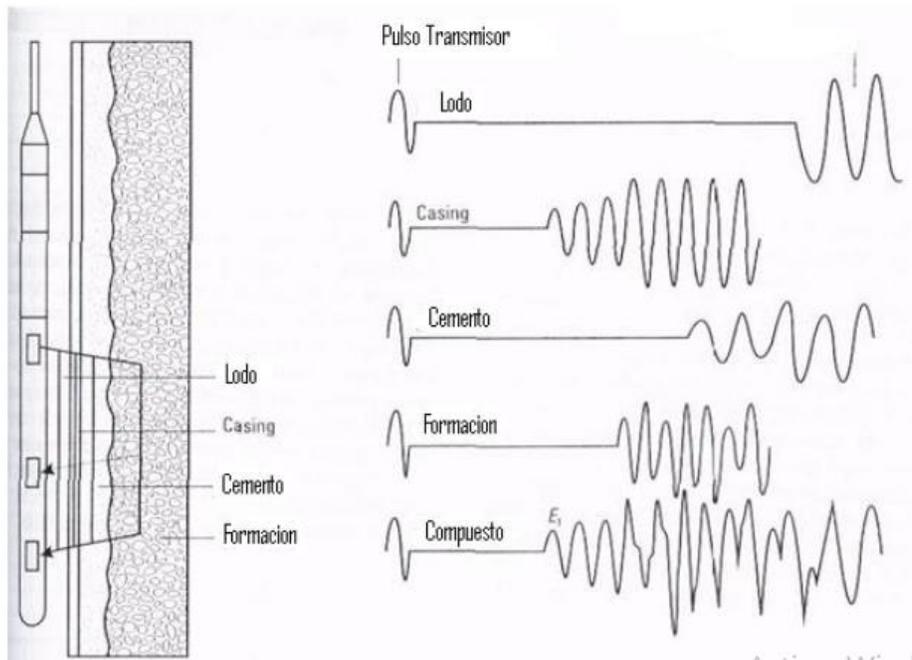
FUENTE: Well Cementing, ERICK B, NELSON.

## ANEXO 10. Esquema Completo de Equipo de Cementación de Schlumberger.



FUENTE: Well Cementing, ERICK B, NELSON.

## ANEXO 11. Esquema Completo de Equipo de Cementación de Schlumberger.



FUENTE: Well Cementing, ERICK B, NELSON.

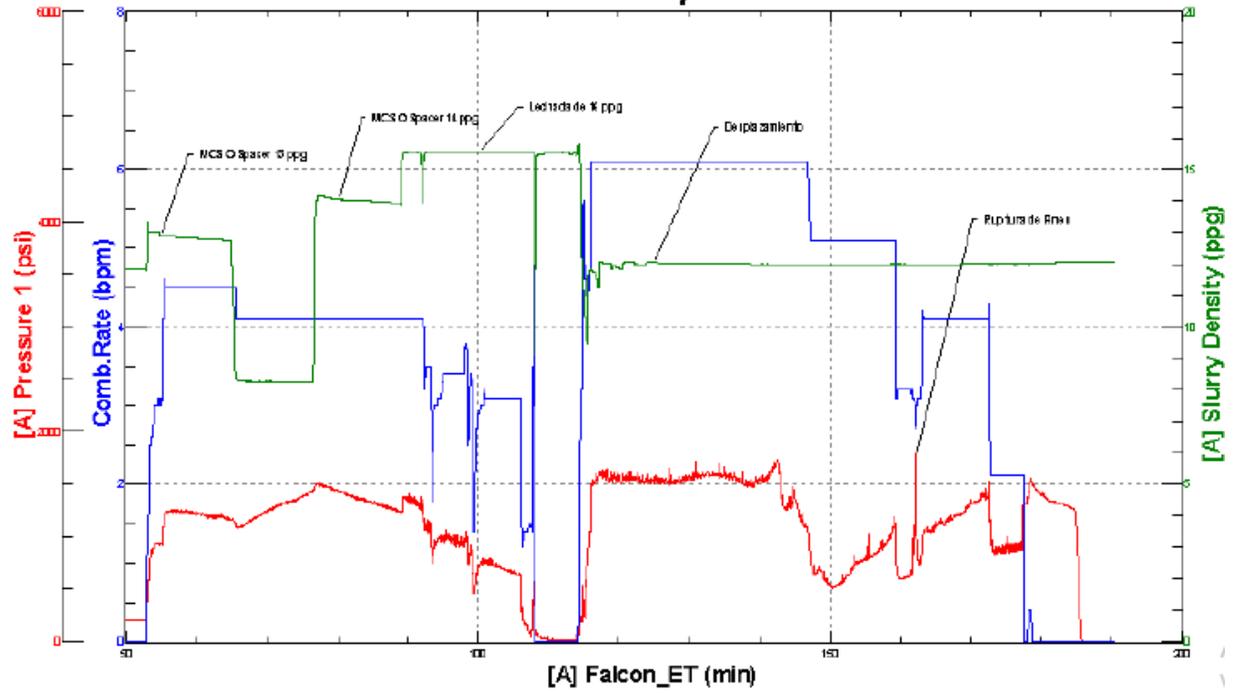
## ANEXO 12. Clasificación de aditivos para el cemento

Aditivos	Función
<b>Aceleradores</b>	Reducir el tiempo de fraguado
<b>Retardadores</b>	Prolongar el tiempo de fraguado
<b>Extendedores</b>	Disminuir la densidad de los sistemas de cemento y/o reducir la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto fraguado.
<b>Densificantes</b>	Incrementar la densidad de los sistemas de cemento.
<b>Dispersantes</b>	Reducir la Viscosidad de las lechadas de cemento.
<b>Agentes de Control De Pérdida De Fluido</b>	Controlar la pérdida de la fase acuosa de la lechada hacia la formación.
<b>Agentes De Control O De Pérdida De Circulación</b>	Controlar la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación o fracturas.
<b>Aditivos Especiales</b>	Controlar la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación o fracturas.

FUENTE: Bravo J. – Fuentes M. – Gomes F.,2010

# ANEXO 13. Cementación cañería 7" a 2500 m - Bombeo Colchones

## Liner 7" Rama Superior SBL-7



FUENTE: Informe Final Pozo SBL-7

