



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

MAESTRÍA EN PETRÓLEOS

**FORMULACIÓN DE UN CEMENTO ULTRALIGERO Y
ELÁSTICO CON EL USO DE MICROESFERAS DE VIDRIO
PARA LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS EN LOS
CAMPOS MADUROS DE LA CUENCA ORIENTE, DISEÑO
PARA EL POZO LG1**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER EN
PETRÓLEOS, MENCIÓN EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN E
INDUSTRIALIZACIÓN DE HIDROCARBUROS**

MARCO PATRICIO CAYO CHICAIZA

DIRECTOR: ING. VICTOR PINTO

Quito, octubre 2019

© Universidad UTE. 2019

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

TRABAJO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1715210926
APELLIDO Y NOMBRES:	CAYO CHICAIZA MARCO PATRICIO
DIRECCIÓN:	BELLAVISTA
EMAIL:	ldupato7@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	3324277
TELÉFONO MOVIL:	0997280871

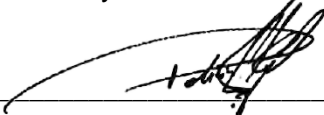
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	FORMULACIÓN DE UN CEMENTO ULTRALIGERO Y ELÁSTICO CON EL USO DE MICROESFERAS DE VIDRIO PARA LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETROLEROS EN LOS CAMPOS MADUROS DE LA CUENCA ORIENTE, DISEÑO PARA EL POZO LG1
AUTOR O AUTORES:	CAYO CHICAIZA MARCO PATRICIO
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	09/20/2019
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	VICTOR PINTO
PROGRAMA	PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO <input checked="" type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Magister en Petróleos, Mención en Procesos de Producción e Industrialización de Hidrocarburos
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	Alrededor del 70% del petróleo producido en Ecuador proviene de campos de más de 30 años de longevidad (Patrice Baby, 2014) , lo que centra el interés de la industria en los campos maduros. En el desarrollo de un campo maduro uno de los principales desafíos con que se enfrentan las operadoras son los bajos gradientes de fractura lo que limita el tipo fluido a usar durante la

etapa de perforación. En el proceso de perforación la fase de cementación es la última a ejecutarse antes que el pozo sea completado para producir, y uno de los principales riesgos durante la Cementación es el aportar con daño de formación y mermar la producción de petróleo. Además, es evidente la problemática por producción de fluidos no deseados debido a la falla-craqueo del cemento durante la vida productiva del pozo. Durante los últimos años se han aplicado varias técnicas de cementación en los campos maduros de Ecuador que involucra el uso de microesferas con las mismas en el país se ha llegado a densidades de hasta 12 ppg, la característica de estos cementos son su baja densidad y alto esfuerzo compresivo sin propiedades elásticas, también se ha llegado a densidades de 13 ppg con el uso de bentonita pero el alto requerimiento de agua que tiene este tipos de lechadas hace que el cemento tenga un bajo esfuerzo compresivo por ello solo son usadas como lechadas de relleno donde no exista zonas de interés o potencial producción, por ultimo hay la opción del cemento espumado con nitrógeno (Harms, 1983), en el país se han aplicado tecnologías con nitrógeno para estimular y limpiar pozos, además se registran trabajos con espaciadores espumados. En cuanto al cemento elástico hay una gran variedad de estudios para modificar sus propiedades mecánicas llegando a Módulos de Young de hasta 1000 Kpsi, en el país se reporta experiencia con cementos elásticos con las diferentes compañías cementadoras desde el año 2008 la característica de estos cementos es su bajo Modulo de Young a un peso de 16 ppg, por ello es un reto llegar a obtener un cemento no espumado de baja densidad y que posea propiedades

	<p>elásticas. Finalmente, se han identificado algunos aspectos para alcanzar una buena adherencia del cemento y los más impactantes son: centralización y movimiento de la tubería, velocidad anular, acondicionamiento del lodo, temperatura precisa, espaciadores y diseño del cemento. Finalmente, el impacto en costos de la tecnología no supera el 12% del costo total del proyecto de perforación de un pozo, esto hace viable su aplicación.</p>
<p>PALABRAS CLAVES:</p>	<p>Elasticidad, baja densidad, campo maduro, gradiente de fractura</p>
<p>ABSTRACT:</p>	<p>Around 70% of the oil produced in Ecuador become of fields of more than 30 years of longevity (Patrice Baby, 2014), which focuses on the interest of the industry in mature fields. In the development of a mature field one of the main factor found in operations is the low fracture gradient, which limits the type of fluid used during the drilling phase. During the drilling process, the cementation is the last stage and it is carryout before the well is completed to produce, so one of the main risks during the cementation is the contribution of damage to the formation and consequently decrease production. In addition, the production of unwanted fluids due to the failure-cracking of cement during the productive life of the well is another problem to be solved. During the last years several cementing techniques have been developed and applied in mature fields of Ecuador some of them include the use of microspheres with densities up to 12 ppg, the main characteristic of these cements are their low density and high compressive strength with poor elastic properties, it has also reached densities of 13 ppg with bentonite but the high water requirement of this</p>

	<p>slurry causes a low develop of compressive strength, for this reason this slurry is only used for no interest or potential productive zones. Finally, there is the option of foamed cement with Nitrogen (Harms, 1983), nitrogen technologies have been applied in country to stimulate and clean wells, in country there are only evidence of applications of foamed spacers. As for elastic cement there is a wide variety of studies to modify its mechanical properties reaching Young Modules up to 1000 Kpsi, in country is reported applications with elastic cements with different cementing companies since 2008, the main characteristic of these cements is its low Young Module at a weight of 16.5 ppg, so it is a challenge to get a non-foamed cement of low density with elastic properties. Finally, some aspects have been identified to achieve a good cement bond and the most striking are centralization and pipe movement, annular velocity, mud conditioning, precise temperature, spacers and cement design. Finally, the impact on technology costs does not exceed 12% of the total cost of a well drilling project; this makes its application viable.</p>
KEYWORDS	Elasticity, low density, mature field, fracture gradient

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: 

CAYO CHICAIZA MARCO PATRICIO

17152109206

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **CAYO CHICAIZA MARCO PATRICIO** CI 1715210926 autor del trabajo de titulación: **Formulación de un cemento ultraligero y elástico con el uso de microesferas de vidrio para la cementación de pozos petroleros en los campos maduros de la cuenca oriente, diseño para el pozo LG1**, previo a la obtención del título de **GRADO DE MAGISTER EN PETRÓLEOS, MENCIÓN EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE HIDROCARBUROS** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación de grado para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de titulación de grado con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 25 de octubre del 2019

f: 
CAYO CHICAIZA MARCO PATRICIO

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor, certifico que el presente trabajo de titulación que lleva por título **Formulación de un cemento ultraligero y elástico con el uso de microesferas de vidrio para la cementación de pozos petroleros en los campos maduros de la cuenca oriente, diseño para el pozo LG1** para aspirar al título de **GRADO DE MAGISTER EN PETRÓLEOS, MENCIÓN EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE HIDROCARBUROS** fue desarrollado por **MARCO PATRICIO CAYO CHICAIZA**, bajo mi dirección y supervisión, en la Maestría en Petróleos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y que dicho trabajo cumple con las condiciones requeridas para ser sometido a las evaluación respectiva de acuerdo a la normativa interna de la Universidad UTE.



VICTOR PINTO

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I.

1713106936

HALLIBURTON

AV AMAZONAS N37-29 Y VILLALENGUA, EDIFICIO EUROCENTER PISO 7, QUITO – ECUADOR
PBX 593.3.3971700 – Fax 593.2.226.1940

Quito, 20 de septiembre de 2019

CERTIFICADO

A quien interese:

Por medio de la presente certifico que el Sr **Cayo Chicaiza, Marco Patricio**, portador (a) del No. cédula **1715210926** realizó su proyecto de tesis en HALLIBURTON LATIN AMERICA S.R.L Ecuador con el tema ***“Formulación de un cemento ultraligero y elástico con el uso de microesferas de vidrio para la cementación de pozos petroleros en los campos maduros de la cuenca oriente, diseño para el pozo LG1”***

Adicional certificamos que estamos de acuerdo y satisfechos con la tesis y estudios realizados.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad. El (la) portador (a) del presente certificado puede hacer uso del mismo en la forma que crea conveniente.

HALLIBURTON LATIN AMERICA S.R.L.

HALLIBURTON LATIN AMERICA S.R.L.

RECURSOS HUMANOS

Rebeca Verduga
Human Resources

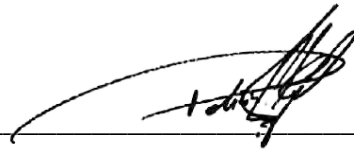


DECLARACION JURAMENTADA DEL AUTOR

Yo, MARCO PATRICIO CAYO CHICAIZA, portador(a) de la cédula de identidad N° 1715210926, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en ese documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

f: _____



MARCO PATRICIO CAYO CHICAIZA

1715210926

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. METODOLOGIA	7
2.1. FORMULACION CEMENTO ULTRALIGERO.....	7
2.1.1. SELECCIÓN DE ADITIVOS	7
2.1.2. DETERMINAR LA DENSIDAD DE LA LECHADA ULTRALIGERA	8
2.1.3. TIEMPO DE BOMBEABILIDAD.....	9
2.1.4. ESFUERZO COMPRESIVO.....	11
2.1.5. UCA-PRUEBA DESTRUCTIVA.....	12
2.1.6. ESFUERZO DE GEL ESTÁTICO – SGS.....	13
2.1.7. EMPRO-MÓDULOS ELÁSTICOS.....	14
2.2. PROCEDIMIENTO PARA DISEÑAR DEL PROGRAMA DE CEMENTACION	14
2.2.1. EVALUACION DE LA INFORMACION OBTENIDA.....	14
2.2.2. DETERMINACION DE PRINCIPALES RIESGOS.....	15
2.2.3. EVALUAR ESCENARIOS CON EL CLIENTE	16
2.3. PROPIEDADES MECANICAS	17
2.3.1. MEDICION DINAMICA	17
2.3.2. MEDICION ESTATICA – CEMENTO ULTRALIGERO	17
2.3.3. CÁLCULO DE LA REMANENCIA DEL CEMENTO.....	18
2.3.4. INPUTS PARA SIMULACION DE REMANENCIA	19
2.4. BUENAS PRÁCTICAS DE CEMENTACIÓN.....	22
2.4.1. ELABORACIÓN DE UN TABLERO DE MEDICIÓN.....	22
2.5. EVALUACION ECONOMICA	24
2.5.1. RENTABILIDAD.....	24
3. RESULTADOS	26
3.1. FORMULACION DEL CEMENTO ULTRALIGERO.....	26
3.1.1. ADITIVOS	26
3.1.2. RESULTADOS DE LAS PRUABAS DE LABORATORIO	27
3.2. ANALISIS Y RESULTADOS DE SIMULACIONES.....	30
3.3. REMANENCIA DEL CEMENTO.....	34

	PÁGINA
3.4. MATRIZ BUENAS PRACTICAS LG-1	38
3.5. EVALUACION ECONOMICA	40
3.5.1. COSTO DE LA TECNOLOGIA	40
3.5.2. ESCENARIOS DE PRODUCCION DEL POZO LG1	41
4. CONCLUSIONES	44
5. RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFIA	46
ANEXOS	47

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Parámetros usados para calibrar el Consitómetro HPHT	9
Tabla 2. Análisis de riegos	15
Tabla 3. Resultados de la densidad del sistema	26
Tabla 4. Esquema de bombeo para el pozo LG-1	31
Tabla 5. Resultados propiedades mecánicas (dinámicas y estáticas)	34
Tabla 6. Matriz aplicación buenas prácticas	38
Tabla 7. Costos estimados Cementación con Cemento Elástico-Pesado	40
Tabla 8. Costos estimados Cementación con Cemento Ultraligero	40
Tabla 9. Datos de los reservorios en el campo LG	41
Tabla 10. Cálculo de rentabilidad TIR	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Presión vs gravedad específica para varios escenarios	8
Figura 2. Balanza presurizada	8
Figura 3. Consistómetro HPHT	10
Figura 4. Analizador Ultrasónico de Cemento (UCA)	11
Figura 5. Equipo para probar el esfuerzo de forma mecánica	12
Figura 6. Moldes para muestras de Cemento	12
Figura 7. MACS II	13
Figura 8. Ventana operacional del pozo LG1	15
Figura 9. Celda de carga Triaxial	17
Figura 10. MPRO	18
Figura 11. Datos ingresados en iCem	21
Figura 12. Escenarios en iCem	22
Figura 13. Formulación del Cemento Ultraligero	26
Figura 14. Aditivos en base a volumen de lechada	27
Figura 15. Grafica de tiempo de bombeo	27
Figura 16. Grafica de resistencia a la compresión (UCA)	28
Figura 17. Grafica de esfuerzo de gel estático (SGS)	29
Figura 18. Grafica de módulo de Young y Relación de Poisson – método estático	29
Figura 19. Temperatura dinámica de los fluidos en fondo	30
Figura 20. Regeneración de la temperatura (Temperatura Estática)	30
Figura 21. Posición final de los fluidos	31
Figura 22. Densidad de circulación equivalente (ECD)	32
Figura 23. Visualización en 3D y Eficiencia de desplazamiento del pozo LG-1	32
Figura 24. Calculo del Stand-Off	33
Figura 25. Profundidad de las potenciales perdidas de circulación	33
Figura 26. Posición de fluidos después de una potencial pérdida	34
Figura 27. Simulación Software Elementos Finitos	35
Figura 28. Simulación Software Elementos Finitos	36
Figura 29. Simulación Software Elementos Finitos	36
Figura 30. Simulación Software Elementos Finitos	37
Figura 31. Simulación Software Elementos Finitos Resultados	37
Figura 32. IPR LG-1, Hollin Inferior	41
Figura 33. LG1 Forecast Hi - 04% decl	42
Figura 34. Recuperación de la Inversión pozo LG1	43

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1. Producción promedio por reservorios del campo LG	47
Anexo 2. Datos Petrofísicos del pozo LG1	47
Anexo 3. Petrofísica del pozo LG1, reservorio Ui	48
Anexo 4. Petrofísica del pozo LG1, reservorio Hollín inferior	48
Anexo 5. lechadas comunes en Formaciones de baja presión, comparadas con la lechada ultraligera	49
Anexo 6. Costos estimados para la Perforación del pozo LG-1.	50

RESUMEN

Alrededor del 70% del petróleo producido en Ecuador proviene de campos de más de 30 años de longevidad (Patrice Baby, 2014) , lo que centra el interés de la industria en los campos maduros. En el desarrollo de un campo maduro uno de los principales desafíos con que se enfrentan las operadoras son los bajos gradientes de fractura lo que limita el tipo fluido a usar durante la etapa de perforación. En el proceso de perforación la fase de cementación es la última a ejecutarse antes que el pozo sea completado para producir, y uno de los principales riesgos durante la Cementación es el aportar con daño de formación y mermar la producción de petróleo. Además, es evidente la problemática por producción de fluidos no deseados debido a la falla-craqueo del cemento durante la vida productiva del pozo. Durante los últimos años se han aplicado varias técnicas de cementación en los campos maduros de Ecuador que involucra el uso de microesferas con las mismas en el país se ha llegado a densidades de hasta 12 ppg, la característica de estos cementos son su baja densidad y alto esfuerzo compresivo sin propiedades elásticas, también se ha llegado a densidades de 13 ppg con el uso de bentonita pero el alto requerimiento de agua que tiene este tipos de lechadas hace que el cemento tenga un bajo esfuerzo compresivo por ello solo son usadas como lechadas de relleno donde no exista zonas de interés o potencial producción, por ultimo hay la opción del cemento espumado con nitrógeno (Harms, 1983), en el país se han aplicado tecnologías con nitrógeno para estimular y limpiar pozos, además se registran trabajos con espaciadores espumados. En cuanto al cemento elástico hay una gran variedad de estudios para modificar sus propiedades mecánicas llegando a Módulos de Young de hasta 1000 Kpsi, en el país se reporta experiencia con cementos elásticos con las diferentes compañías cementadoras desde el año 2008 la característica de estos cementos es su bajo Modulo de Young a un peso de 16 ppg, por ello es un reto llegar a obtener un cemento no espumado de baja densidad y que posea propiedades elásticas. Finalmente, se han identificado algunos aspectos para alcanzar una buena adherencia del cemento y los más impactantes son: centralización y movimiento de la tubería, velocidad anular, acondicionamiento del lodo, temperatura precisa, espaciadores y diseño del cemento. Finalmente, el impacto en costos de la tecnología no supera el 12% del costo total del proyecto de perforación de un pozo, esto hace viable su aplicación.

Palabras Clave: elasticidad, baja densidad, campo maduro, gradiente de fractura

ABSTRACT

Around 70% of the oil produced in Ecuador become of fields of more than 30 years of longevity (Patrice Baby, 2014), which focuses on the interest of the industry in mature fields. In the development of a mature field one of the main factor found in operations is the low fracture gradient, which limits the type of fluid used during the drilling phase. During the drilling process, the cementation is the last stage and it is carryout before the well is completed to produce, so one of the main risks during the cementation is the contribution of damage to the formation and consequently decrease production. In addition, the production of unwanted fluids due to the failure-cracking of cement during the productive life of the well is another problem to be solved. During the last years several cementing techniques have been developed and applied in mature fields of Ecuador some of them include the use of microspheres with densities up to 12 ppg, the main characteristic of these cements are their low density and high compressive strength with poor elastic properties, it has also reached densities of 13 ppg with bentonite but the high water requirement of this slurry causes a low develop of compressive strength, for this reason this slurry is only used for no interest or potential productive zones. Finally, there is the option of foamed cement with Nitrogen (Harms, 1983), nitrogen technologies have been applied in country to stimulate and clean wells, in country there are only evidence of applications of foamed spacers. As for elastic cement there is a wide variety of studies to modify its mechanical properties reaching Young Modules up to 1000 Kpsi, in country is reported applications with elastic cements with different cementing companies since 2008, the main characteristic of these cements is its low Young Module at a weight of 16.5 ppg, so it is a challenge to get a non-foamed cement of low density with elastic properties. Finally, some aspects have been identified to achieve a good cement bond and the most striking are centralization and pipe movement, annular velocity, mud conditioning, precise temperature, spacers and cement design. Finally, the impact on technology costs does not exceed 12% of the total cost of a well drilling project; this makes its application viable.

Keywords: elasticity, low density, mature field, fracture gradient

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Campo maduro por definición es aquel que ha sobrepasado un nivel de producción que fue previsto originalmente en su plan de producción, también muchos autores lo clasifican como campo maduro aquel que ha producido por más de 10 años. Existen varias maneras de definir a un campo maduro la más aceptada y conocida define a un campo maduro como aquel que ya ha recuperado el 70% de su reserva 2P, la otra definición relaciona la madurez a la longevidad de los pozos y las instalaciones; también existe otra en la que la madurez se les asigna a campos que han producido por muchos años de manera limitada por razones económicas de productividad o complejidad (Aguilar, 2015)

Los campos de Ecuador son muy variados, especialmente en campos donde esté presente la formación Hollín que por su fuerte empuje hidráulico (empuje de fondo) presenta altas presiones, pero en campos maduros donde también hay presencia de formaciones débiles (depletadas) hay una ventana muy ajustada entre gradiente de fractura y presión de poro, aquí es donde hay oportunidad para aplicar tecnologías para minimizar riegos de pérdida y que sostengan la presión de fondo del reservorio.

Tecnologías actuales para cementar un campo con formaciones débiles:

Cemento Espumado. – El cemento espumado proporciona beneficios particulares en los pozos geotérmicos debido a su menor conductividad térmica y otras propiedades mecánicas mejoradas. Abajo se detallan ciertas características principales de este cemento espumado:

- Diseñado de baja permeabilidad.
- Bajo módulo de Young
- Propiedades mecánicas mejoradas para hacer que el sello sea resistente
- Menores valores de conductividad térmica
- Bajas densidades
- Flexibilidad de densidad variable
- Uso de equipos especiales para generar Nitrógeno, mantener la densidad deseada además de un surfactante

El cemento espumado se ha usado históricamente para reducir la densidad de la lechada. En el país hoy en día no se ha aplicado esta tecnología pese a las ventajas que tiene la limitante es el equipo a ser usado.

Uso de aditivos que aligeren el cemento. – Uno de los principales aditivos que ayudan a disminuir la densidad de una lechada de cemento es la Bentonita, la bentonita es un mineral de arcilla coloidal compuesto principalmente de esmectita, también puede contener minerales como el cuarzo, el feldespato y la calcita. En agua dulce, la bentonita se hincha a aproximadamente 10 veces su volumen original. La bentonita en cementación es muy importante y los volúmenes son altamente usados en lechadas de cemento Lead con densidades que van desde 13 a 15 ppg. Un cemento Lead o de relleno no compromete el aislamiento de zonas de interés por lo que no es importante el desarrollo de alto esfuerzo compresivo además por el costo bajo de la lechada no tiene aditivos que le brinden elasticidad al cemento.

Uso de microesferas. – se utiliza una esfera de vidrio hueca diseñada para ser utilizada como agente reductor de densidad para fluidos de perforación y cementos. La forma esférica ofrece una serie de beneficios importantes, que incluyen una menor viscosidad y un mejor flujo. La composición de vidrio de borosilicato de sosa-cal químicamente estable hace prácticamente insolubles en agua o aceite. Aquí algunos beneficios:

- Baja densidad. Tecnología de cementos ligeros ofrecen un rango versátil de densidades potenciales, lo que permite a los operadores maximizar los retornos y reducir la necesidad de trabajos correctivos.
- Tixotrópico. por naturaleza este tipo de lechadas son tixotrópicas, lo cual es beneficioso cuando se cementa en áreas de potencial pérdida de circulación e influjos.
- Tiempos de transición más rápidos. Estas lechadas pueden diseñarse con tiempos de transición cortos cuando se requieren diseños enfocados a aislar zonas alta presión de gas o alto empuje de agua de fondo, esto deriva en pozos con alto potencial de flujo de gas (GFP).
- Esfuerzo Compresivo. Esta lechada ligera desarrolla una resistencia a la compresión a bajas densidades y a cualquier temperatura, y superan las características de rendimiento de las lechadas convencionales en las mismas condiciones.

En Ecuador se han cementado pozos con densidades de hasta 12 ppg caracterizándose por su alto esfuerzo a la compresión, pero sin embargo no poseen propiedades elásticas. El uso de este tipo de lechada se ha identificado en los campos Lago Agrio, Drago, Tarapoa y bloque Sur especialmente en las arenas M1 y U. El presente trabajo se basó en el uso de microesferas como un mecanicismo económico y simple para obtener una lechada de cemento de bajo peso y adicionando propiedades elásticas, para lo cual se establecieron objetivos generales y específicos.

Objetivo General

- Formular un cemento ultraligero de densidad 7.5 ppg con el uso de esferas de vidrio y que además sea capaz de resistir esfuerzos de fondo de pozo de hasta 10K psi sin llegar a fallar

Objetivos Específicos

- Realizar el diseño teórico de una Cementación que contemple: cálculos volumétricos, ECD, visualización en 3D, Eficiencia de desplazamiento y Standoff con la información del pozo LG1, usando una lechada de Cemento ultraligero
- Simular una lechada ultraligera en un software de elementos finitos con el fin de verificar su estado de remanencia después de aplicarla a los diversos esfuerzos durante la completación y vida productiva de un pozo.
- Establecer buenas prácticas de Cementación en los campos maduros de la Cuenca Oriente

METODOLOGIA

2. METODOLOGIA

2.1. FORMULACION CEMENTO ULTRALIGERO

2.1.1. SELECCIÓN DE ADITIVOS

Los aditivos que son considerados para este tipo de lechada fueron escogidos en base a la necesidad del reservorio, al ser una lechada de baja densidad y elástica se contempla usar una gran variedad de aditivos para conseguir las características deseadas.

Aditivos para controlar la migración de gas. - pese a que no es un pozo de gas se adicionó este aditivo básicamente para bajar el tiempo de transición de la lechada proveyendo así un tiempo adecuado antes que fragüe el cemento para controlar el acuífero potente de la formación Hollín.

Aditivos para control de agua libre. - para este tipo de lechadas de bajo peso donde la concentración de agua y esferas es alta es muy importante controlar el agua libre, evitar la división de fases en estado estático.

Control de filtrado. - fue necesario la adición de control de filtrado ya que al tener expuestas arenas con mediana y alta permeabilidad puede ocasionar una deshidratación de cemento y fragüe prematuro.

Silicalita. – debido a la baja concentración de Cemento hace necesario la incorporación de aditivos que mejore el desarrollo de esfuerzo compresivo, por eso es importante una alta concentración de Silicalita.

Elastómero. - en alta concentración brindó al cemento propiedades elásticas, modificando el módulo de Young y relación de Poisson.

Fibra. - ayudó a incrementar los esfuerzos tensiles en el cemento, es parte de las propiedades mecánicas modificadas.

Esferas de vidrio. - este material además de bajar la densidad de la lechada de cemento ayudó a mejorar el desarrollo de esfuerzo compresivo, se requirió un porcentaje alto para conseguir los resultados deseados. Existen varios tipos de esferas, resaltamos esferas en base a material puzolanico y esferas huecas de vidrio, siendo las ultimas las más estables a los cambios de presión en términos de gravedad específica, para el presente trabajo se ha elegido las esferas de vidrio 10K.

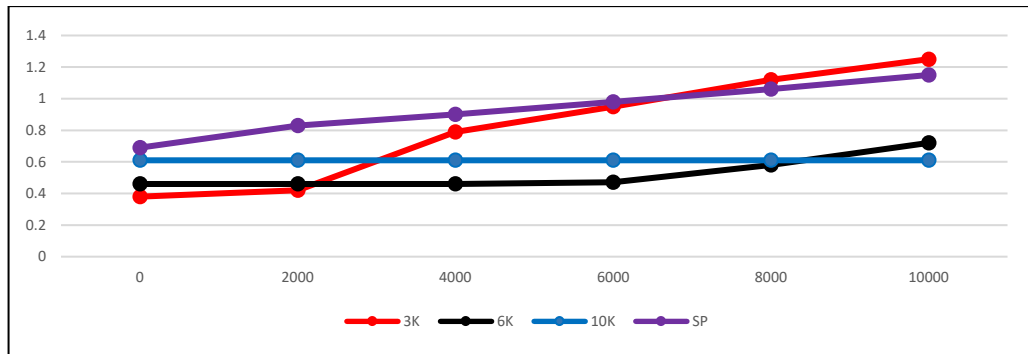


Figura 1. Presión vs gravedad específica para varios escenarios

2.1.2. DETERMINAR LA DENSIDAD DE LA LECHADA ULTRALIGERA

Material y Equipo:



Figura 2. Balanza presurizada

Especificaciones: 1.0- 2.20 gr/cm³.

Procedimiento:

Calibración. - la calibración de la balanza se realizó colocando agua en la copa

- La copa para muestra se llenó a un nivel ligeramente abajo del borde superior de la copa (aproximadamente 6 mm ± 0.5 mm).
- Se colocó la tapa con la válvula 'check' en posición abierta. Se presionó la tapa hacia abajo dentro de la boca de la copa, hasta que la superficie haciendo contacto entre la falda exterior de la tapa y el borde superior de la copa.
- Se usó la bomba para presurizar, se sumergió la nariz del ensamblaje de la bomba en la lechada, con el vástago en posición completamente hacia el interior del cilindro. Entonces el pistón se

impulsó hacia arriba, succionando con esto la lechada y a la vez se llenó de fluido el cilindro.

- d) Se leyó la densidad de la lechada
- e) Para desfogar la presión, se empujó la válvula hacia abajo, reconectando el ensamblaje de la bomba a la válvula y presionando la bomba hacia abajo en el cilindro.

2.1.3. TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

Equipo y Materiales:

Consistómetro Presurizado. - El aparato comúnmente usado consta de un cilindro rotatorio contenedor de lechada, equipado con una paleta estacionaria, todo encerrado en un cilindro de acero capaz de simular las condiciones de temperatura y presión del pozo. El contenedor de la lechada. gira a una velocidad de 150rpm +/-15. El espacio entre el contenedor de la lechada y la pared del recipiente a presión deberá se llenaron completamente con aceite mineral.

Calibración. - Un dispositivo de carga de peso aplicada al resorte produce una serie de deformaciones al resorte equivalentes a valores de consistencia que pueden ser usados para calibración, definidos por la siguiente ecuación:

$$T = 78.2 + 20.02 Bc \quad \text{EC [1]}$$

Donde:

T = Torque o deformación del resorte en g-cm.

Bc = Consistencia expresada en Unidades Bearden

Los pesos son usados para aplicar torque o deformación al resorte del potenciómetro, usan el radio de la armazón del potenciómetro como un brazo de palanca. Al aplicársele un peso al potenciómetro, el brazo de contacto es desplazado generándose una señal eléctrica en voltios (DC), la que será registrada y usada para determinar los grados Bc.

Tabla 1. Parámetros usados para calibrar el Consistómetro HPHT

Calculo del Torque equivalente g*cm	Peso en gramos ±0.1	Consistencia Calculada de la lechada Bc
260	50	9
520	100	22
780	150	35
1040	200	48
1300	250	61
1560	300	74
1820	350	87
2080	400	100

Nota: Para potenciómetros con un radio diferente, una tabla apropiada con tolerancias equivalentes deberá ser desarrollada.



Figura 3. Consistómetro HPHT

Procedimiento

1. Ensamblado y llenado de la copa de lechada.
 - a) Se limpió y lubricó el interior de la copa o cilindro incluyendo las roscas.
 - b) En la parte superior de la copa se insertó el stop-ring de acero, haciéndolo descansar sobre la ceja interior de la copa.
 - c) Se insertó y aseguró el soporte del diafragma con la rosca respectiva.
 - d) Se aseguró la flecha con el disco y barra guía.
 - e) Se colocó la tapa inferior y el tapón de la misma en la copa, para verificar que la paleta gire libremente.
 - f) Se destapó la copa y se invirtió su posición original para llenarla con la lechada, dejando 6mm libre entre la cima del cemento y el borde del cilindro.
 - g) Se colocó la tapa del cilindro y el tornillo, asegurándose de que la paleta ha quedado centrada. Limpiar todo el cemento de la superficie de la copa.
 - h) Re chequeó la paleta, para asegurarse que gire libre y suavemente.
 - i) Se introdujo el cilindro de la lechada dentro del Consistómetro.
2. Inicio de la prueba.
 - a) Colocó y llenó el cilindro la lechada sobre la mesa rotaria dentro del pozo de prueba, se encendió el motor y se colocó el potenciómetro

sobre la copa, verificando que este haya encajado perfectamente bien sobre la barra guía del eje de la paleta, entonces se inició el llenado con aceite el pozo de prueba. Se insertó el sensor de temperatura a través del orificio central de la tapa del pozo.

3. Control de presión y temperatura.
4. Tiempo bombeable
 - a. Determinación de la cédula de prueba
 - b. Mezclado de la lechada en la superficie. - por el contenido de esferas en alta concentración, la lechada es premezclada en el consistometro para simular las condiciones de tiempo y temperatura. El tiempo y la temperatura de la lechada en la superficie (TSS) fueron estimados de acuerdo a datos obtenidos del campo.

2.1.4. ESFUERZO COMPRESIVO

Este es un procedimiento de prueba no destructiva mediante el uso de un equipo sónico. El aparato transmite una señal sónica a través del cemento que está siendo probado. La señal de tiempo de tránsito para las propiedades del cemento puede ser correlacionado con el tiempo y el desarrollo del esfuerzo compresivo.



Figura 4. Analizador Ultrasónico de Cemento (UCA)

Procedimiento:

1. Se preparó la muestra de lechada de cemento de acuerdo a la API 10B-2 / ISO 10426-2
2. Se siguió las instrucciones operativas y precauciones de seguridad de acuerdo al manual del fabricante del Ultrasonic Cement Analyzer. (Manual Chandler, Model 4265P Pressure Control Unit Operating Manual; Model 5270 Data Acquisition and Control Software).

3. Tiempo de curado, aplicación de temperatura y presión por el periodo que duro la prueba 48 hrs.
4. Se realizó el reporte de datos que es presentado en la sección de resultados.

2.1.5. UCA-PRUEBA DESTRUCTIVA

La lechada de cemento se curó en un molde, se dejó reposar durante el tiempo requerido, se retiró el molde y se trituró en una prensa, que mide la fuerza requerida para romper la muestra. Esta fuerza se convierte luego en una fuerza por área, (como psi), en función del área de la superficie de la muestra en contacto con uno de los platos de carga de la prensa.

Abajo en la fig. 5 se puede ver el quipo usado para esta prueba, así como los moldes donde se realizaron los cubos de cemento para que sean destruidos en la prensa.



Figura 5. Equipo para probar el esfuerzo de forma mecánica



Figura 6. Moldes para muestras de Cemento

2.1.6. ESFUERZO DE GEL ESTÁTICO – SGS

La prueba de esfuerzo o resistencia al gel estático (SGS), determina las características del esfuerzo del gel desarrolladas en un fluido estático bajo condiciones de presión y temperatura.

La prueba de resistencia de gel estático (SGS) determina el tiempo que la lechada permanecerá en estado fluido y qué tan rápido se desarrollará el gel en condiciones de pozo simulado.

Equipos:

El FANN MACS II es el método preferido para todas las pruebas de SGS.



Figura 7. MACS II

Procedimiento. -

1. Comprobaciones previas al arranque del equipo
2. Montaje y llenado de la copa con lechada
3. Se mezcló la lechada de cemento y se llenó la copa del SGS.
4. (NOTA: si la copa se llena desde arriba, todos los huecos en la celda deben llenarse con cemento. Ver fotos)
5. Se bajó la copa dentro de la celda y se aseguró que la copa esté bloqueada en su posición. Llena la celda con agua.
6. "Celda de carga". Se aseguró que el orificio de la celda del termocupla esté cubierto con una toalla para evitar que salga agua a chorros.
7. Se instaló la termocupla se aprieta con una llave de 5/8".
8. "Finalizar" Las líneas se purgaron con aire y el motor comienza a girar.

9. El sistema se presurizó a la condición de presión inicial, por defecto a 250 psi
10. Cuando se completa el acondicionamiento, la computadora se inició en cero y comenzó la prueba de fuerza de gel.

2.1.7. EMPRO-MÓDULOS ELÁSTICOS

El diseño de la celda del analizador Chandler MPRO es similar al del equipo UCA, excepto que la celda se colocó dentro del equipo en forma horizontal. Los transductores que generan y reciben ondas de corte y de compresión son diferentes de los transductores estándar utilizados en el analizador UCA para medir la resistencia. La alineación de estos transductores es crítica para el analizador Chandler MPro. Este sistema también requiere un control de presión más estrecho que el sistema estándar de UCA. La celda se llenó con una mezcla de cemento y se programaron rampas de calor y presión. Se utiliza agua para aplicar presión sobre la muestra de cemento. La salida de datos a una computadora incluye velocidades de compresión, corte y lecturas de presión y temperatura. El módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el módulo de volumen se calculan a partir de las velocidades de onda de compresión y de corte. El límite superior de temperatura es de 400 ° F y el límite superior de presión es de 10000 psi.

2.2. PROCEDIMIENTO PARA DISEÑAR DEL PROGRAMA DE CEMENTACION

2.2.1. EVALUACION DE LA INFORMACION OBTENIDA

Información proveída por el cliente, en la gráfica inferior se puede observar que las zonas más propensas a inestabilidad son las lutitas desde el tope de Napo hasta la Caliza A (colapso=11.3 ppg), seguido de las lutitas que están en la base de la arenisca U y en la base de la arenisca T, en donde se estima un gradiente de colapso máximo de 10.6 ppg y 10.7 ppg respectivamente.

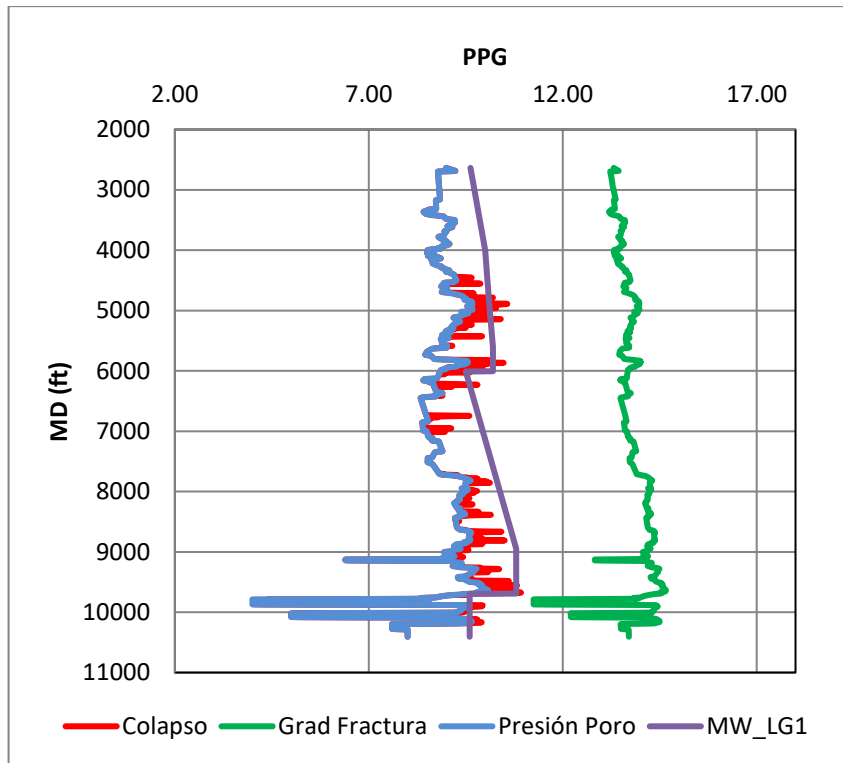


Figura 8. Ventana operacional del pozo LG1

Con los datos de la gráfica #8 se procederá a realizar la construcción del diseño del pozo en el simulador, se deberá mantener el ECD en la ventana de gradiente de fractura y presión poral, por ello no es factible el uso de fluidos pesados ya que a 9800 pies hay zonas muy débiles que podrían fallar durante la cementación.

2.2.2. DETERMINACION DE PRINCIPALES RIESGOS

Después de la evaluación de toda la información proveída por el cliente se lista los principales riegos para el trabajo de cementación de la sección de producción, los cuales van a ser mitigados diseñando un programa de Cementación que cubran todos ellos:

Tabla 2. Análisis de riegos

Riesgo	Impacto	CPR	Mitigación del Riesgo	CPR	Plan de Contingencia
Pérdida de circulación	Presiones anormalmente altas. Estallido de casing. Fractura y pérdida de cemento a formación.	2	Correcto diseño de cementación (Caudales/Densidad de fluidos) bajo gradiente de fractura. Diseñar el programa de cementación tomando en cuenta escenarios de pérdidas.	3	Bajar el caudal de desplazamiento para reducir el ECD y evitar o disminuir las pérdidas.
Empaquetamiento anular	Presiones anormalmente altas. Pérdida de circulación. Gran longitud de cemento dentro de	2	Circulación y limpieza del pozo, al menos 2 fondos arriba y verificar retornos en zarandas. Verificación de parámetro correctos del lodo para circulación. Circulación al mismo caudal que el de	3	Si el empaquetamiento se da durante la cementación, bombear hasta asentar tapón a mínimo caudal posible. Presión máxima de bombeo dependerá de la presión de expansión del

	casing. Fractura		desplazamiento. Movimiento de la tubería con rotación y/o reciprocación.		colgador y del estallido del casing
Canalización del cemento	Mal aislamiento zonal. Contaminación del cemento en el anular.	2	Acondicionamiento del lodo. Jerarquía reológica. Centralización adecuada en las zonas objetivo y sus intercalaciones. Verificar estado del Caliper del hueco abierto.	3	Cementación remedial.
Canal en el cemento entre zonas con diferente presión	Pobre Calidad de Cemento en las zonas de interés	2	Diseño de cemento con tiempo de transición controlado. Utilizar la temperatura correcta para el diseño	3	Cementación remedial.
Incertidumbre de tamaño del agujero	El cemento Tail no alcanza a cubrir el objetivo superior y no se logra un buen cemento en esta zona.	2	Correr caliper de 6 brazos para el cálculo de volúmenes de cemento. Simulación de posición de fluidos con varios diámetros de agujero y verificar condiciones seguras.	3	Desconectar a la brevedad posible el setting tool tensionando hasta su máxima capacidad de ser necesario. Cementación Remedial.
Cemento Frágil Craqueo del cemento durante su vida productiva	Comunicación con zonas indeseables, alta producción de agua	2	Diseño del cemento con materiales que provean elasticidad	3	Cementación remedial.

Fuente. - Análisis de riesgos Halliburton

2.2.3. EVALUAR ESCENARIOS CON EL CLIENTE

El análisis de riegos es evaluado con el cliente para acordar la mejor opción para cementar el pozo, además de las afectaciones en los resultados finales, después de la aprobación de los términos generales del diseño por el cliente se procede a realizar la propuesta técnica.

2.3. PROPIEDADES MECANICAS

2.3.1. MEDICION DINAMICA

Equipo: Celda Triaxial (Confiada o no Confinada)

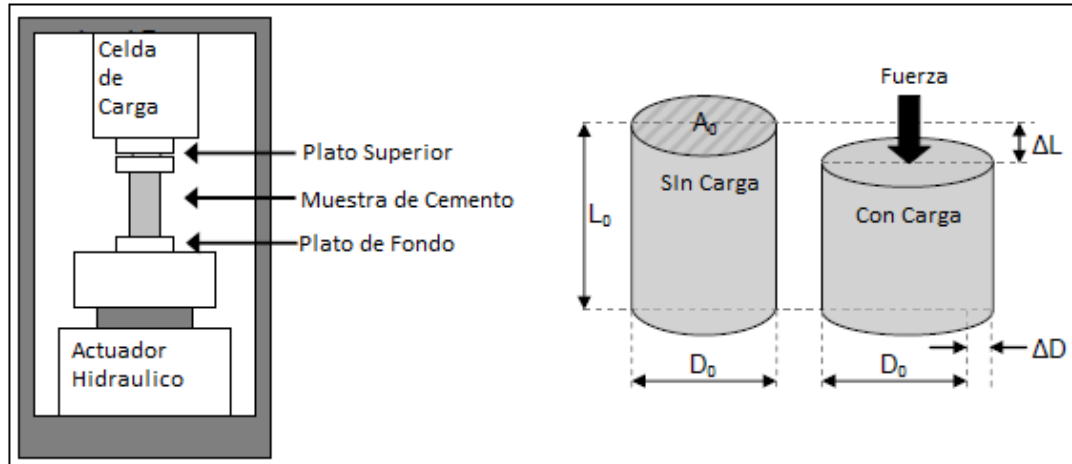


Figura 9. Celda de carga Triaxial

Las pruebas dinámicas se realizaron a tres tipos de lechadas de Cemento Elástico de 16 lpg de densidad, el proceso básicamente fue aplicar una fuerza sobre una muestra de cemento a través de la acción hidráulica. A medida que se realizó la prueba la fuerza aumenta gradualmente hasta que el cemento ha fallado, o se ve la máxima fuerza posible. Se realizaron mediciones de la fuerza, la deformación axial (ΔL) y la deformación diametral (ΔD) por medio de la celda de carga, extensómetros axiales y extensómetros radiales, respectivamente. A partir de esta información fueron determinados los parámetros de tensión (σ), deformación axial (ϵ_a), deformación lateral (ϵ_l), módulos de Young (YM) y relación de Poisson (PR), así como la resistencia a la compresión no confinada (UCS)

2.3.2. MEDICION ESTATICA – CEMENTO ULTRALIGERO

Con la finalidad de comparar los resultados de las pruebas dinámicas con una metodología más simple y con disponibilidad local se usó el método estático, en el cual se corrieron pruebas con la lechada Ultraligera.

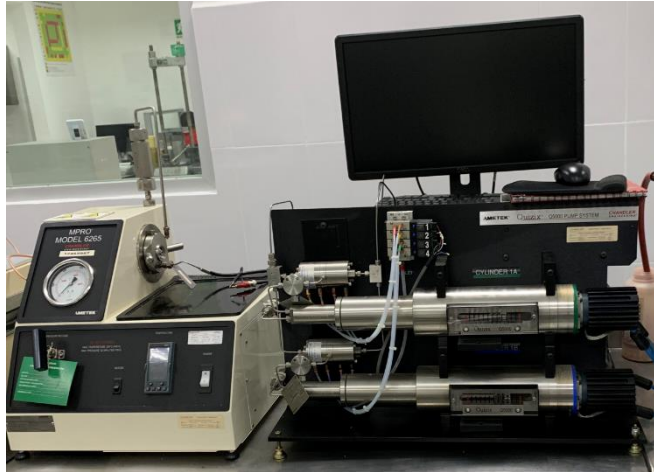


Figura 10. MPRO

Este método se ha basado en la correlación del tiempo de tránsito de las ondas de compresión a través del cemento y en la correlación de la velocidad de la onda con las resistencias a la compresión mediante trituración utilizando una carga mecánica en muestras curadas de forma idéntica a condiciones ambientales. Las ondas de corte ultrasónicas se han utilizado durante muchos años para medir las propiedades mecánicas dinámicas, así como para estudiar las propiedades del cemento en etapas iniciales. En aplicaciones de yacimientos petrolíferos, se han utilizado como parte de las herramientas de registro acústico para muchos concreto de roca en condiciones no destructivas.

El diseño de la celda del analizador Chandler MPRO es similar al del equipo UCA, excepto que la celda se colocó dentro del equipo en forma horizontal. Los transductores que generan y reciben ondas de corte y de compresión son diferentes de los transductores estándar utilizados en el analizador UCA para medir la resistencia. La alineación de estos transductores es crítica para el analizador Chandler MPRO. Este sistema también requiere un control de presión más estrecho que el sistema estándar de UCA. La celda se llenó con una mezcla de cemento Ultraligero y se programaron rampas de calor y presión. Se utiliza agua para aplicar presión sobre la muestra de cemento. La salida de datos a una computadora incluye velocidades de compresión, corte y lecturas de presión y temperatura. El módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el módulo de volumen se calculan a partir de las velocidades de onda de compresión y de corte. El límite superior de temperatura es de 400 ° F y el límite superior de presión es de 10000 psi.

2.3.3. CÁLCULO DE LA REMANENCIA DEL CEMENTO

Se realiza el cálculo de la remanencia del Cemento para la lechada Ultraligera además de las lechadas de 16 lpg elásticas, con ello se plantea realizar una

comparación de resultados y probar que realmente la lechada ultraligera soporta altas cargas durante la vida productiva del pozo.

Se prueban tres métodos de falla del cemento debido a la carga mecánica y térmica:

- Grietas radiales que pueden permitir la migración radial y vertical del fluido.
- Despegue del cemento, lo que puede permitir la migración vertical del fluido.
- Deterioro por cizallamiento del cemento que puede permitir la migración de fluidos generalizada debido a un aumento significativo de la permeabilidad del material.

La remanencia del cemento, se define como una medida de cuánta vida útil o capacidad, de la capacidad original, se deja en el material para resistir el fallo, generalmente capacidades de remanencia menores a 50% son indicativos que el cemento está muy cercano a fallar.

2.3.4. INPUTS PARA SIMULACION DE REMANENCIA

Gradiente de estrés vertical (por encima de la primera formación). – Pendiente que representa la distribución del estrés total vertical in situ sobre la profundidad desde la superficie hasta la parte superior de la primera formación ingresada. El gradiente de estrés vertical está relacionado con la densidad del material/formación. El gradiente de estrés se expresa en [unidad de estrés] / [unidad de longitud] y se asume constante en toda la profundidad de cada formación. El rango típico para un gradiente de estrés vertical es de 0.5 a 1.2 psi / ft, con un valor nominal de 1.0 psi / ft.

Estrés vertical (a una profundidad dada). – El estrés vertical es la fuerza aplicada a la formación en la dirección vertical, que puede resultar en deformación (o tensión). Se expresa en unidades de psi / ft. Es una medida del peso del material de la formación anterior. El rango típico para un gradiente de estrés vertical es de 0.5 a 1.2 psi / ft con un valor nominal de 1.0 psi / ft.

Estrés horizontal máximo. – El estrés horizontal máximo es una relación entre el estrés total horizontal in situ máximo y el estrés total vertical in situ máximo. El cálculo utilizado para determinar este valor es el estrés principal horizontal máximo dividido por el estrés vertical. Los valores típicos varían de 0.5 a 1.1, con un valor predeterminado de 1.0 a menudo asumido.

Estrés horizontal mínimo. – El mínimo estrés horizontal es una relación entre el mínimo estrés total horizontal in situ y el máximo estrés total vertical in situ. El cálculo utilizado para determinar este valor es el mínimo estrés principal horizontal dividido por el estrés vertical. Los valores típicos varían de 0.5 a 1.1, con un valor predeterminado de 1.0 a menudo asumido. El valor de

mínimo estrés horizontal debe ser menor o igual que la relación de máximo estrés horizontal.

Azimut con el norte. - El azimut es el ángulo entre la proyección de la dirección del pozo en el plano horizontal y la dirección del norte, positiva hacia el este. El rango de definición del azimut de pozo es $[0, 360]$. NOTA: el azimut del pozo solo se puede definir si la inclinación del pozo es diferente de 0 grados.

Datos ingresados para el pozo LG1:

Top MD (ft)	Top TVD (ft)	Pore Pressure (psi)	Reservoir Gradient (psi/ft)	Reservoir Density (ppg)	Fracture Pressure (psi)	Fracture Gradient (psi/ft)	Fracture Density (ppg)	Formation Name	Vertical Stress (psi/ft)	Max Horz Stress	Min Horz Stress	Azimuth With North (°)
9736.0	9503.8	4379.32	0.461	8.87	6951.61	0.731	14.08	Limestone	0.860	0.92	0.92	0.00
9776.0	9543.8	4258.93	0.446	8.59	6911.46	0.724	13.94	Limestone	0.860	0.92	0.92	0.00
9786.0	9553.8	1985.28	0.208	4.00	5583.60	0.584	11.25	Limestone	0.870	0.92	0.92	0.00
9871.0	9638.8	2002.94	0.208	4.00	5533.28	0.574	11.05	Sand	0.860	0.92	0.92	0.00
9881.0	9648.8	4746.89	0.492	9.47	7213.06	0.748	14.39	Sand/Clay	0.870	0.92	0.92	0.00
10006.0	9773.8	4711.91	0.482	9.28	7260.81	0.743	14.30	Limestone	0.867	0.92	0.92	0.00
10016.0	9783.8	2541.34	0.260	5.00	6200.87	0.634	12.20	Limestone	0.867	0.92	0.92	0.00
10081.0	9848.7	2558.20	0.260	5.00	6247.12	0.634	12.21	Sand/Clay	0.860	0.92	0.92	0.00
10091.0	9858.7	4681.14	0.475	9.14	7293.15	0.740	14.24	Shale	0.860	0.92	0.92	0.00
10191.0	9958.7	4444.07	0.446	8.59	7232.62	0.726	13.98	Sand/Clay	0.860	0.92	0.92	0.00
10196.0	9963.7	3933.87	0.395	7.60	6982.62	0.701	13.49	Sand/Clay	0.870	0.92	0.92	0.00
10281.0	10048.7	4050.95	0.403	7.76	7089.17	0.705	13.58	Sand/Clay	0.860	0.92	0.92	0.00
10286.0	10053.7	4178.32	0.416	8.00	7155.37	0.712	13.70	Sandstone	0.860	0.92	0.92	0.00
10480.0	10247.7	4258.94	0.416	8.00	7293.44	0.712	13.70	Sandstone	0.860	0.92	0.92	0.00

Figura 11. Datos ingresados en iCem

Fuente. - Software iCem de Halliburton

Adicional para verificar la respuesta del cemento a los diversos esfuerzos durante su vida productiva se detallan los datos para las operaciones tentativas de inyección, fracturamiento hidráulico, evacuación y producción:

Case: Liner 7 LG1 UTEV1

Use 2D Hydraulic Results Enter Simple Operational Parameters

Drilling Fluid	Spacer	Lead Cement	Displacement Fluid
Density: <input type="text" value="9.80"/> ppg	Density: <input type="text" value="8.33"/> ppg	Density: <input type="text" value="13.00"/> ppg	Density: <input type="text" value="9.80"/> ppg
	Top of Fluid: <input type="text" value="8816.7"/> ft	Top of Fluid: <input type="text" value="9191.8"/> ft	
<input checked="" type="checkbox"/> Use Tail Cement	<input checked="" type="checkbox"/> Use Completion Fluid Data	<input checked="" type="checkbox"/> Use Pressure Testing	
Density: <input type="text" value="7.90"/> ppg	Density: <input type="text" value="9.10"/> ppg	Testing Surface Pressure: <input type="text" value="7000.00"/> psi	
Top of Fluid: <input type="text" value="9735.0"/> ft		Testing Fluid Density: <input type="text" value="8.50"/> ppg	

Analysis Points

Operation Type	MD (ft)	TVD (ft)	Pre-Job Temperature (°F)	Casing Fluid Pressure (psi)	Casing Fluid Temperature (°F)	Pore Pressure (psi)
Injection	10286.0	10053.7	203.00	1000.00	156.00	4000.00
Fracture/Kill	10286.0	10053.7	203.00	7000.00	156.00	4000.00
Evacuation/Unload	10286.0	10053.7	203.00	0.00	156.00	4000.00
Production	10286.0	10053.7	203.00	1000.00	156.00	4000.00

Figura 12. Escenarios en iCem

Fuente. - Software iCem de Halliburton

Con el fin de evaluar el peor escenario se ha modelado un Fracturamiento hidráulico con 10000 psi de presión, es un escenario muy agresivo ya que generalmente en los campos de Ecuador se han realizado fracturamientos hidráulicos con no más de 7000 psi.

2.4. BUENAS PRÁCTICAS DE CEMENTACIÓN

2.4.1. ELABORACIÓN DE UN TABLERO DE MEDICIÓN

La metodología usada para evaluar la correcta aplicación de las buenas prácticas en la cementación del liner de producción en el pozo LG1 es mediante la revisión las etapas críticas durante y después del proceso:

- Factores del Pozo que influyen en el Diseño
 - Condición óptima del registro de caliper
 - Existencia de claro anular óptimo
 - Standoff mayor a 70% en las zonas productoras
 - GFP de la zona productora determinado y lechada de cemento diseñada de acuerdo al mismo.
 - Lechada de producción Elástica / simulaciones de remanencia
 - Análisis preliminar por escrito de los registros a hueco abierto
 - Uso de un simulador de temperatura para revisar el perfil de temperatura del pozo

- ECD en ventana de Gradiente de Fractura/poro con tolerancia mayor a 0.1 gr/cc
- Parámetros de laboratorio
 - Agua Libre - Cero
 - Tiempo Bombeable suficiente para el trabajo
 - Tiempo de transición menor a 30 min
 - YP Lodo<YP Espaciador<YP Lechada Relleno<YP Lechada Amarre"
 - EMPRO - Modulo de Young y Relación de Poisson acorde a parámetros de Cemento elástico
 - Compatibilidades entre fluidos
- Parámetros del Fluido de Perforación
 - Tipo de lodo, bajo contenido de sólidos
 - YP a BHCT según recomendación al momento de cementar:
 - Perfil de geles planos de 10s/10m y 30 m al momento de cementar
 - Filtrado del Lodo API<12 y HPHT<15
- Parámetros de los Espaciadores
 - Altura de Preflujo
 - Altura de Espaciador
 - Paquete de surfactantes compatibles para el tipo de lodo
 - Reacción Química de rompimiento del cake del lodo con el Preflujo en caso de lodo base agua
- Corrida de Tubería y Acondicionamiento del pozo
 - Circulación del pozo en frente a las zonas permeables
 - Perdidas de circulación/influjos durante la bajada de revestimiento, acondicionamiento de lodo.
 - Empaquetamiento durante la corrida del revestimiento/circulación
 - Presión de circulación vs Real similares
 - Circulación de 200% de la capacidad del anular después de sentar el colgador
 - Máxima Tasa de circulación previo a realizar la cementación
- Ejecución de la Operación
 - Ejecución del trabajo de acuerdo al programa original
 - Tiempo estático <5 min
 - Perdidas de circulación/influjos durante la cementación y/o después de efectuada la cementación
 - Empaquetamiento durante el trabajo de cementación
 - Reciprocación/Rotación de la tubería durante el trabajo de cementación
- Funcionamiento del Equipo de Flotación y Equipo Alternativo
 - Uso de Zapato flotador con puertos laterales de circulación
 - Funcionamiento correcto del Wiper Plug y Dardo

- Funcionamiento Correcto del Liner Hanger
- Longitud del shoetrack mayor a 80 ft
- Funcionamiento correcto del equipo de flotación, sostiene la presión diferencial
- Evaluación del Trabajo de Cementación
 - Resultados óptimos del registro de cementación
 - No se requiere de trabajo de cementación remedial

En el capítulo de resultados se mostrará la matriz con los valores que aplican para esta cementación, esto junto a los resultados de las simulaciones 2D y 3D (eficiencia de desplazamiento) aportan a visualizar los posibles resultados de la cementación.

2.5. EVALUACION ECONOMICA

2.5.1. RENTABILIDAD

Para evaluar la rentabilidad del proyecto se ha estimado los costos por la ejecución de la tecnología, esto incluye costos relacionados a los materiales, personal, equipos y su movilización.

Para calcular el precio de venta al cliente se ha tomado en cuenta una ganancia del 20% con lo que se obtiene el precio al cliente que genera esta tecnología de Cementación.

Para el análisis de rentabilidad se realiza por medio del cálculo de la tasa interna de retorno (TIR) para lo cual se ha realizado el análisis para tres años en el cual se establece el precio de barril de petróleo que el gobierno fijó para el presupuesto 2019, además un costo de producción de referencia de Petroamazonas:

- Precio barril de petróleo WTI: 50.05 usd/bbl
- Costo de producción: 8.22 usd/bbl
- TIR a ser alcanzada: 27%
- Zona productora: Hollín inferior
- BSW: 38%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS

3.1. FORMULACION DEL CEMENTO ULTRALIGERO

3.1.1. ADITIVOS

A continuación, se detalla el resultado de los aditivos que se usaron para el diseño de la lechada ultraligera:

GRS DE CEMENTO>>	182.79	ADITIVOS -> SACOS DE 94 Lb	Conc. (% / GPC)	Massa (Lb)	SG	VOL. ABS. (Gal/Lb)	VOL (Gal)
SÓLIDOS	182.79	Cemento	100%	110.25	3.2	0.04	4.13
	7.31	Sal	4%	4.41	1.9	0.06	0.29
	54.84	Silicalita	30%	33.08	2.3	0.05	1.72
	184.62	Microesferas de vidrio	101%	111.35	0.5	0.26	29.01
	0.73	Aditivo ctrl de Gas	0%	0.44	0.8	0.15	0.07
	0.73	Fibra	0%	0.44	2.6	0.05	0.02
	18.28	Elastomero	10%	11.03	2.0	0.06	0.66
	0.55	Ctrl agua libre	0%	0.33	1.4	0.09	0.03
LÍQUIDOS	0.18	Anti espumante	1%	0.01	0.9	0.13	0.00
	7.60	Ctrl Filtrado	40%	0.47	1.2	0.10	0.05
AGUA	16.22	Agua p/Cemento	44%	2.43	8.3	0.12	0.29
		Agua para Cal	150%	0.33	8.3	0.12	0.04
		Agua p/Microesfera	100%	5.57	8.3	0.12	0.67

Figura 13. Formulación del Cemento Ultraligero

Abajo se detalla el cálculo de las densidades de esta lechada en superficie y en fondo después que las esferas han colapsado:

Tabla 3. Resultados de la densidad del sistema

Masa:	280.13	Lb
Volumen:	36.97	Gal
Densidad Superficie:	7.58	Lb/Gal
Densidad en fondo:	7.9	Lb/Gal

En la lechada ultraligera las microesferas, así como el agua actúan como material ligero. Dado que la resistencia a la compresión del cemento está directamente relacionada con la relación cemento-agua, en el caso de la lechada ultraligera se puede observar en la Figura 13, las concentraciones de aditivos que se ha usado para obtener una lechada ultraligera con peso menor al del agua.

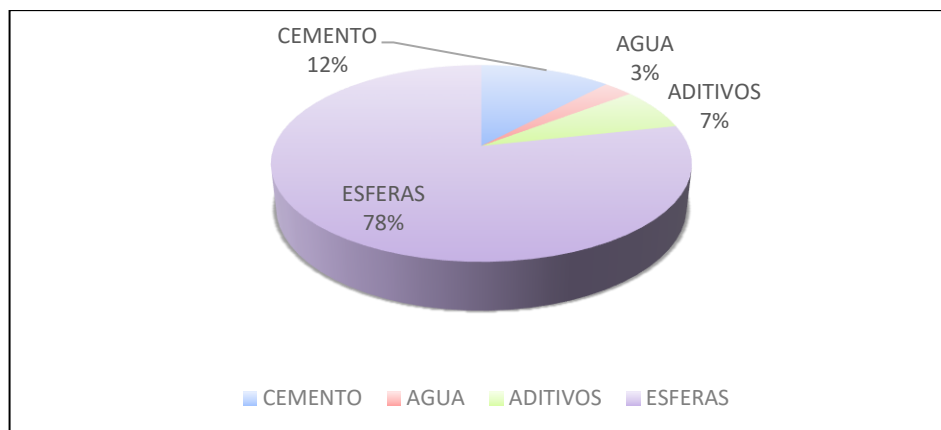


Figura 14. Aditivos en base a volumen de lechada

Como se reduce la relación agua, se incrementa el desarrollo temprano de la resistencia a la compresión, reduciendo también el tiempo WOC y se proporciona al cemento calidad a densidades más bajas que las disponibles con los diseños ligeros extendidos de agua más tradicionales.

3.1.2. RESULTADOS DE LAS PRUABAS DE LABORATORIO

Los resultados de la elaboración de las pruebas de laboratorio son las gráficas de los respectivos parámetros que se midieron en laboratorio.

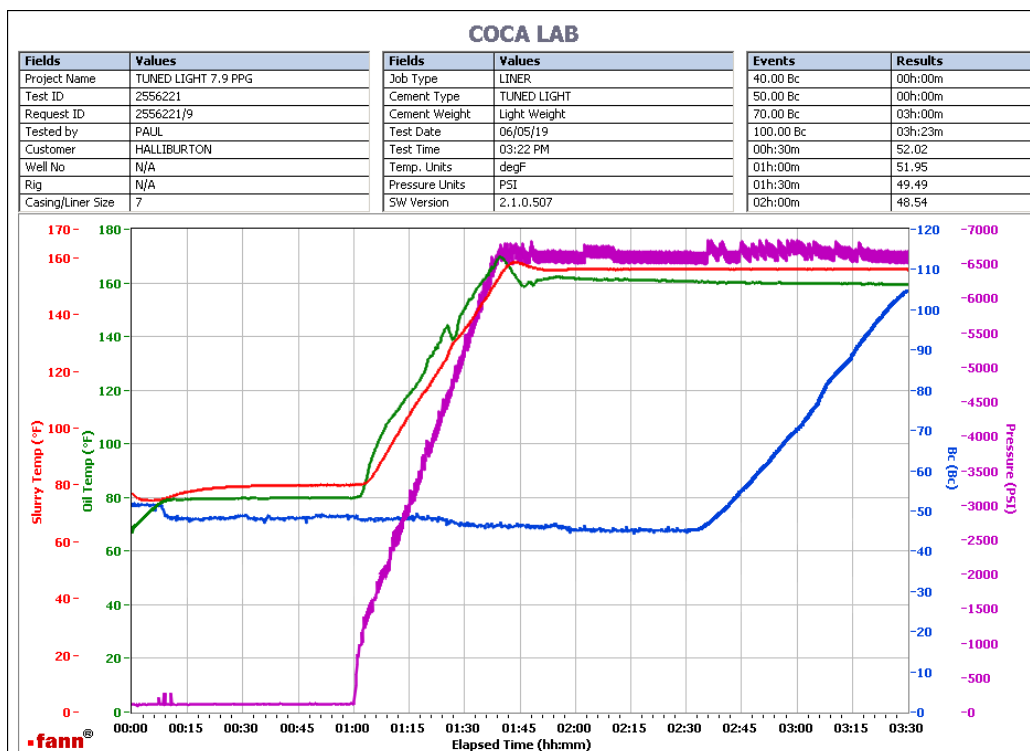


Figura 15. Grafica de tiempo de bombeo

El tiempo de bombeo de la lechada Ultraligera es de 3hr, tiempo suficiente para bombear al cemento al pozo y terminar el trabajo, tomando en cuenta que el tiempo calculado del trabajo es 2 horas tiene 1 hora de seguridad por contingencia, con esto aseguramos finalizar el trabajo con la lechada bombeable.

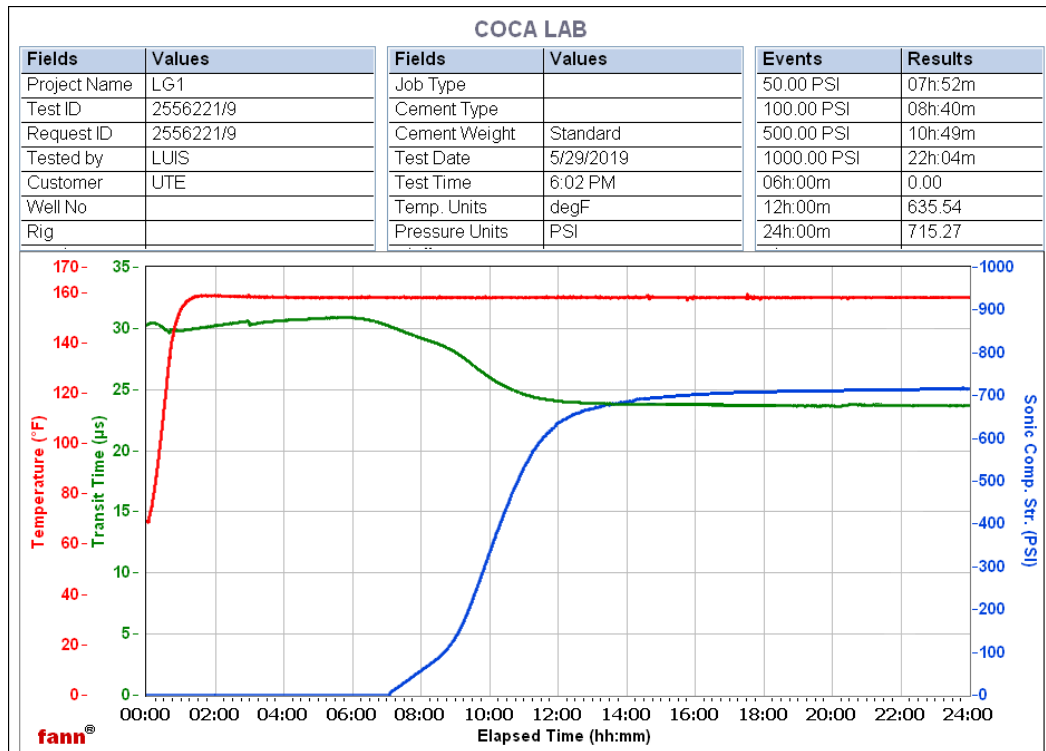


Figura 16. Grafica de resistencia a la compresión (UCA)

El esfuerzo compresivo UCA de la lechada ultraligero es bajo, no sobrepasa las 800 psi a las 24 horas, este efecto es típico de las lechadas ligeras, más adelante se va a demostrar que es más impactante la elasticidad comparado con la resistencia a la compresión.

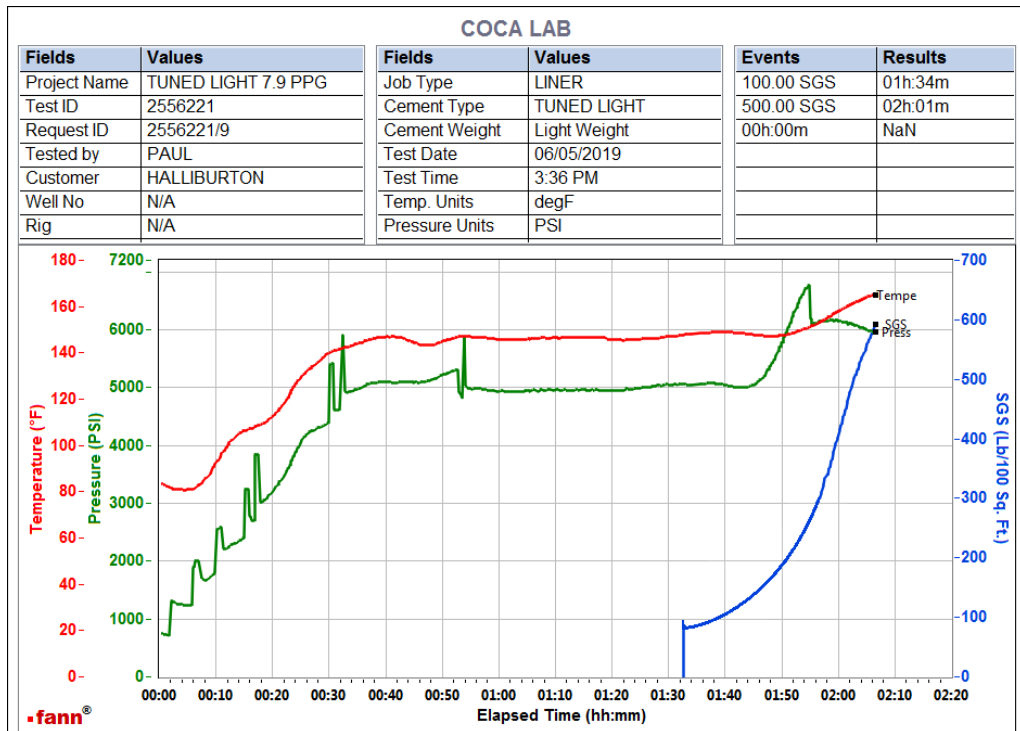


Figura 17. Grafica de esfuerzo de gel estático (SGS)

Referente a la carta de Gel Estático se puede visualizar que tenemos un tiempo de transición de 27 min, tiempo que está en el rango (>45min) para soportar la presión de un acuífero de alta presión (4000 psi).

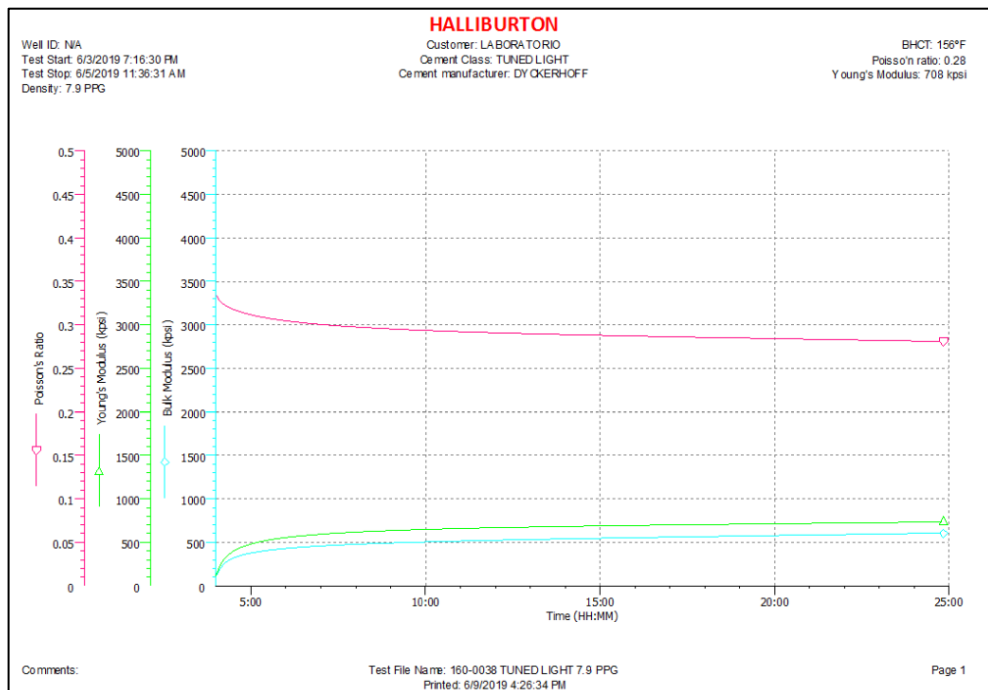


Figura 18. Grafica de módulo de Young y Relación de Poisson – método estático

La carta de propiedades mecánicas aporta un valor de Modulo de Young de 708K psi y una Relación de Poisson de 0.28, estos valores son muy similares

a los valores obtenidos con procedimientos directos de medición, razón por la cual se considera elástica a la lechada ultraligera.

3.2. ANALISIS Y RESULTADOS DE SIMULACIONES

A continuación, se detallan los resultados de la simulación de temperatura dinámica/estática para el pozo LG-1, se obtiene una temperatura de los fluidos (dinámica) de 115 F, este valor es muy importante al momento de realizar los diseños de laboratorio.

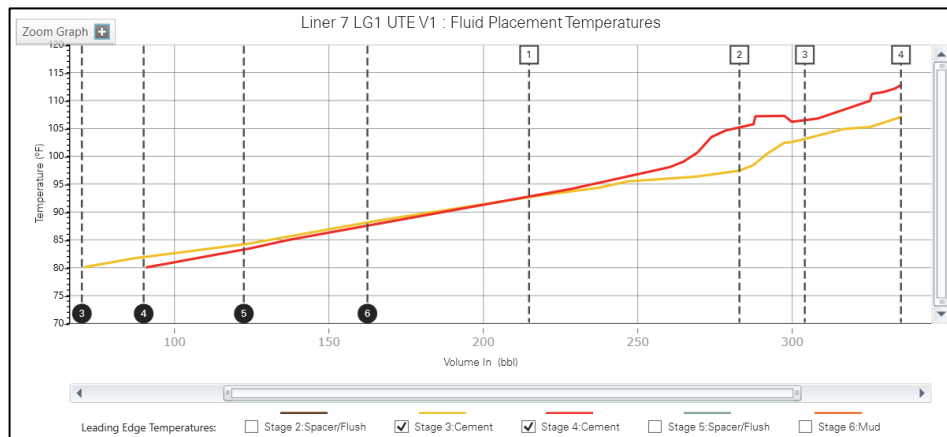


Figura 19. Temperatura dinámica de los fluidos en fondo

Fuente. - Software iCem Halliburton

En términos de temperatura estática se tiene a continuación en la figura 16 el tiempo que tarda en recuperar la formación la temperatura geotermal durante el bombeo del primer saco al último saco de cemento. En este caso tenemos una temperatura estática de 202 F para el ultimo saco, esta temperatura debemos usar para correr la prueba de esfuerzo compresivo (UCA)

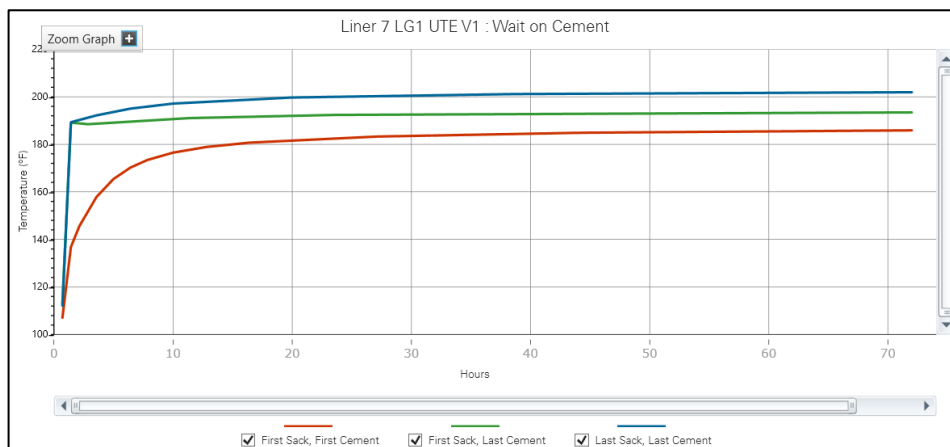


Figura 20. Regeneración de la temperatura (Temperatura Estática)

Fuente. - Software iCem Halliburton

Es de vital importancia tener datos ciertos de temperatura ya sea dinámica y estática, fragües prematuros o fragües retardados se puede experimentar si no se toma cuidado con estos cálculos.

Después de obtenida la temperatura y el diseño de lechada Ultraligera se procede a realizar los cálculos volumétricos y simulaciones de hidráulica, los volúmenes son calculados en base a cálculos básicos de áreas en el anular (hoyo-casing).

Tabla 4. Esquema de bombeo para el pozo LG-1

Fluido #	Tipo de Fluido	Nombre del Fluido	Densidad lbm/gal	Caudal bbl/min	Volumen (bbls)
1	Espaciador	TS III	10.5	8.0	70
2	Espaciador	Scavenger	12.0	5.0	20
	Cemento	Ultraligero	7.9	5.0	32
4	Agua	Agua	8.4	10.0	40
5	Lodo	Lodo	9.8	9.0	173

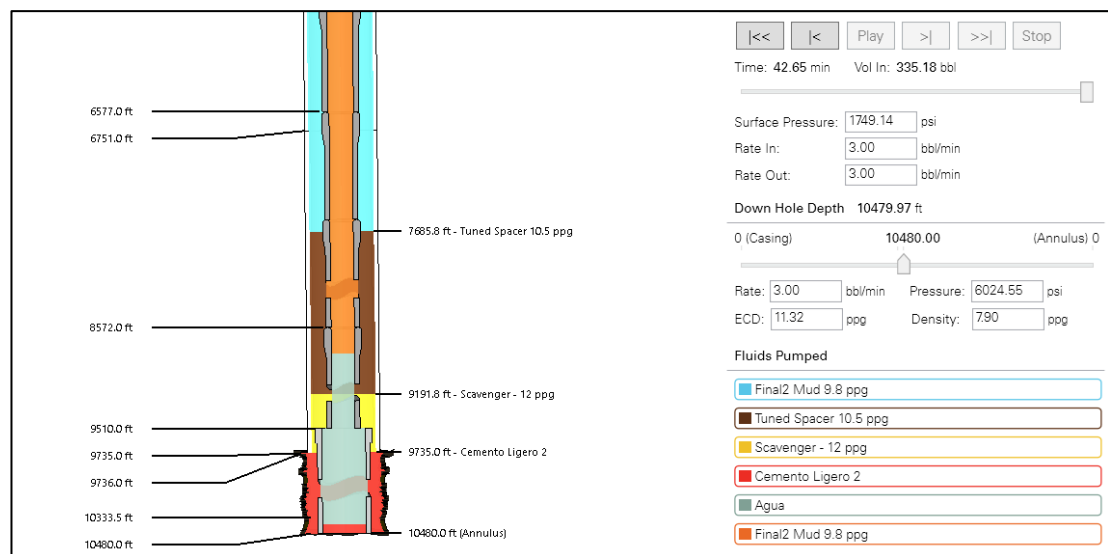


Figura 21. Posición final de los fluidos

Fuente. - Software iCem Halliburton

La posición final de fluidos es un dato teórico netamente volumétrico, para el caso del pozo LG-1 se cubre todo el hoyo de 8 ½” con lechada Ultraligera de 7.9 lpg el resto de fluidos quedan desplazados sobre el tope del liner al final del trabajo.

Para un mejor análisis que intervenga el efecto de las buenas practicas se podria ver mas adelante en los resultados de Eficincia de Desplazamiento.

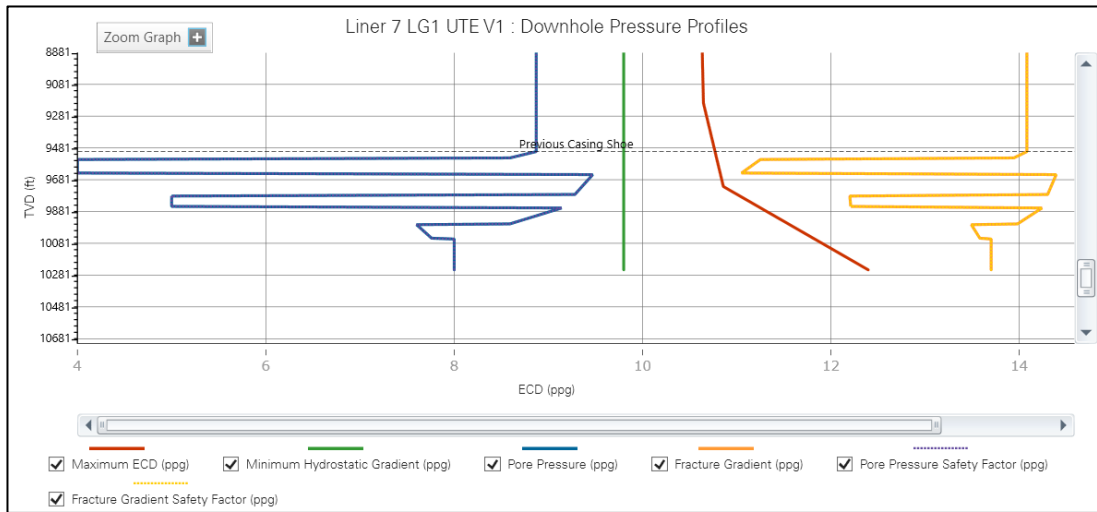


Figura 22. Densidad de circulación equivalente (ECD)

Fuente. - Software iCem Halliburton

Este diseño de los fluidos descritos no excede el ECD mínimo y máximo, se mantiene en la ventana permisible, con esto se asegura que no hay riesgos de perdidas durante el trabajo de cementación con la lechada ultraligera.

Por otro lado, en el módulo 3D se puede evidenciar como se posicionan los fluidos después de aplicar todas las buenas practicas, así mismo la eficiencia de desplazamiento, que es la medición de cuanto cemento recubre el anular.

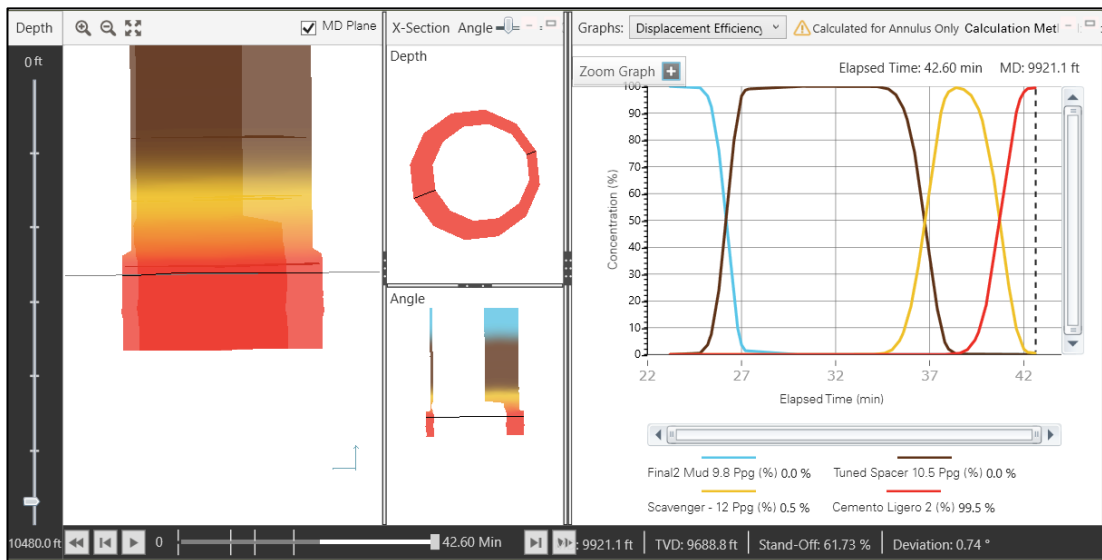


Figura 23. Visualización en 3D y Eficiencia de desplazamiento del pozo LG-1

Fuente. - Software iCem Halliburton

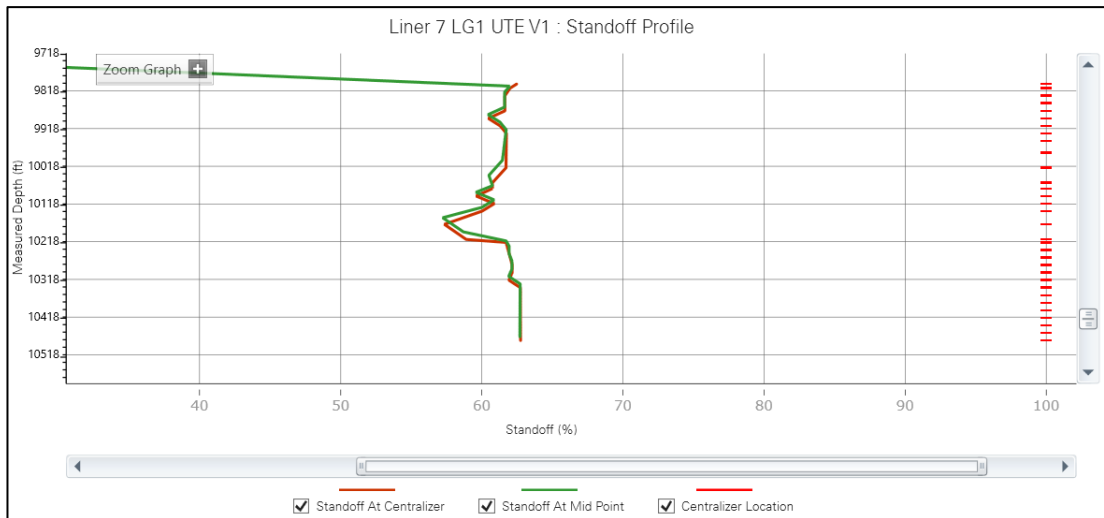


Figura 24. Calculo del Stand-Off

Fuente. - Software iCem Halliburton

La medición de la centralización de la tubería respecto al hoyo es un factor muy importante dentro de las buenas prácticas de cementación, para el caso del pozo LG-1 tenemos un valor promedio del 65% de stand-off, este número no es el óptimo, pero por condiciones del pozo en muchas ocasiones no es posible incrementarlo, en estos casos se puede compensar la baja aplicación de esta práctica con otra.

Escenario de pérdida: como ejercicio de simulación si se usan lechadas de peso mayor a 13 ppg se supone un evento de pérdidas del 80% en la base de las arenas U y T, con esto tenemos una fuerte afectación a los topes de los fluidos al fin del trabajo.

Anticipated Downhole Losses		Lost Circulation Summary
MD (ft)	Percent Loss (%)	Total Surface Returns: 4%
10081.0	80.0	
10196.0	80.0	

Figura 25. Profundidad de las potenciales pérdidas de circulación

Fuente. - Software iCem Halliburton

La pérdida en la base de la arena U tomó todo el escavenger mientras que la pérdida bajo la formación T no permitió subir la lechada tail hasta las zonas superiores. Más del 30% del hoyo queda sin cemento, así Basal Tena estaría descubierta lo que involucraría una cementación remedial, adicional al daño de formación que pueda generar el cemento perdido en las zonas inferiores.

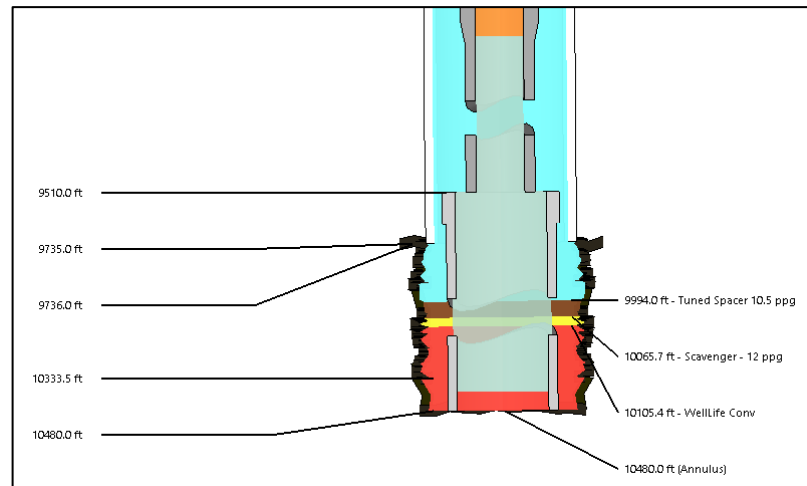


Figura 26. Posición de fluidos después de una potencial pérdida

Fuente. - Software iCem Halliburton

3.3. REMANENCIA DEL CEMENTO

A continuación, los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas para las diversas lechadas que se usan en Ecuador, estos resultados se los compara con los resultados de la prueba con método estático de la lechada Ultraligera:

Tabla 5. Resultados propiedades mecánicas (dinámicas y estáticas)

Tipo de Lechada	Esfuerzo Compresivo, (psi)	Esfuerzo a la Tensión (psi)	Módulo de Young (psi)	Relación de Poisson	Angulo de Fricción (grados)	Esfuerzo Compresivo (psi)
Elasticem 5%, 16.5 ppg	3937	371	7.70E+05	0.14	14.98	1547
Elasticem 10%, 16.5 ppg	4540	311	1.50E+06	0.19	32.00	1280
Expandacem, 16.5 ppg	4926	430	1.13E+06	0.18	20.40	1900
Ultraligera	700	-	0.708E+06	0.28	-	-

Los resultados de las tres primeras lechadas fueron realizados en el laboratorio de Halliburton en Duncan OK. mediante un método dinámico usando una celda triaxial, en la cual se pueden observar módulos de Young bajos y relación de Poisson en el rango de un material elástico, por otro lado, para este trabajo se realizaron ensayos estáticos en el equipo MPRO con la lechada Ultraligera, los parámetros que se obtuvieron son un módulo de Young más bajo aun que las otras lechadas y una relación de Poisson más elevada. Con estos resultados se puede comparar como cementos elásticos a los 4 sistemas, esto se va a corroborar con las simulaciones en el software de elementos finitos.

Se analizó el pozo LG1 en tres escenarios: una lechada pesada con 5% de elastómero, 10% de elastómero y una lechada pesada expansiva:

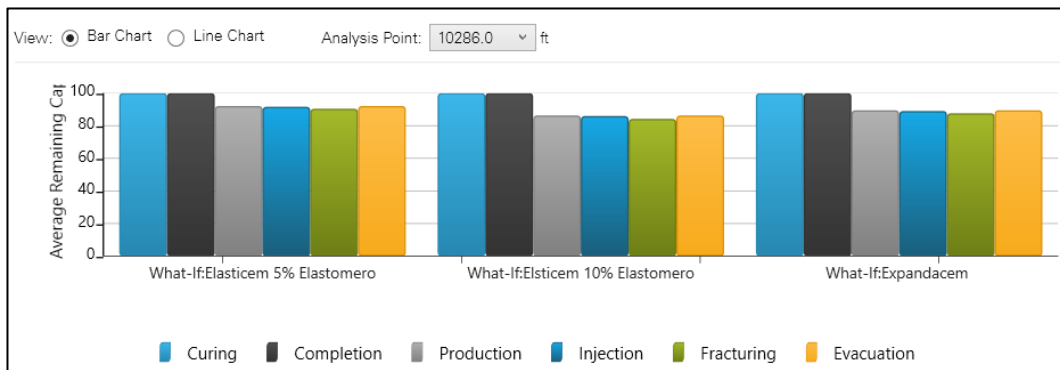


Figura 27. Simulación Software Elementos Finitos

Fuente. - Software iCem Halliburton

Se observa que las tres lechadas mantienen una capacidad de remanencia sobre el 80% en la etapa de curado, completación, producción, inyección, fractura y evacuación del pozo.

Al ser lechadas con alto peso se caracterizan por tener relativamente alto esfuerzo compresivo, pero para condiciones de gradientes de fractura muy elevados transfieren demasiada presión hidrostática lo que podría ocasionar falla de la formación débil con pérdida de fluido durante el trabajo de cementación.

En conclusión, las tres lechadas soportarían grandes estreses durante la vida productiva del pozo

Por otro lado, evaluando el posible escenario de falla de cada una de las lechadas pesadas tenemos por: craqueo, despegue al casing, despegue a la formación y desgaste del cemento.

La lechada pesada con 5% de elastómero durante el curado, completación, producción e inyección no presenta fallas por craqueo, hay buena adherencia al casing y formación, pero por desgaste presenta falla llegando al punto más bajo 62% de capacidad de remanencia durante una fractura hidráulica.

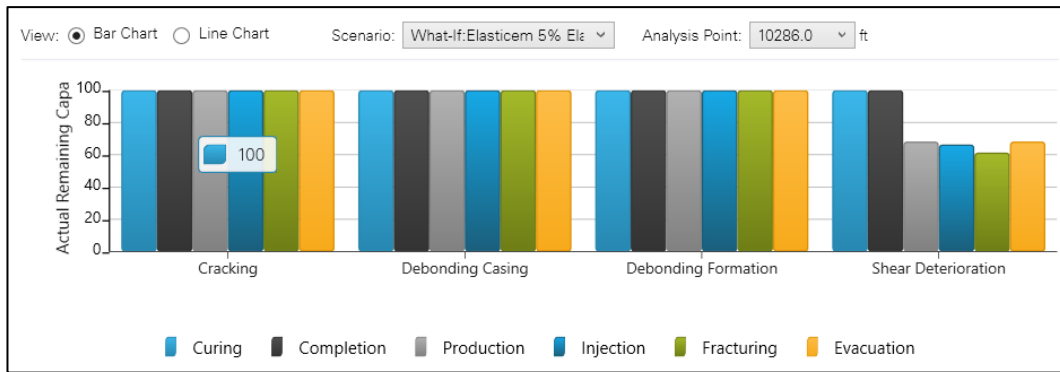


Figura 28. Simulación Software Elementos Finitos

Fuente. - Software iCem Halliburton

La lechada pesada con 10% de elastómero durante el curado, completación, producción e inyección no presenta fallas por craqueo, hay buena adherencia al casing y formación, de igual forma por desgaste presenta falla llegando al punto más bajo 38% de capacidad de remanencia durante una fractura hidráulica.

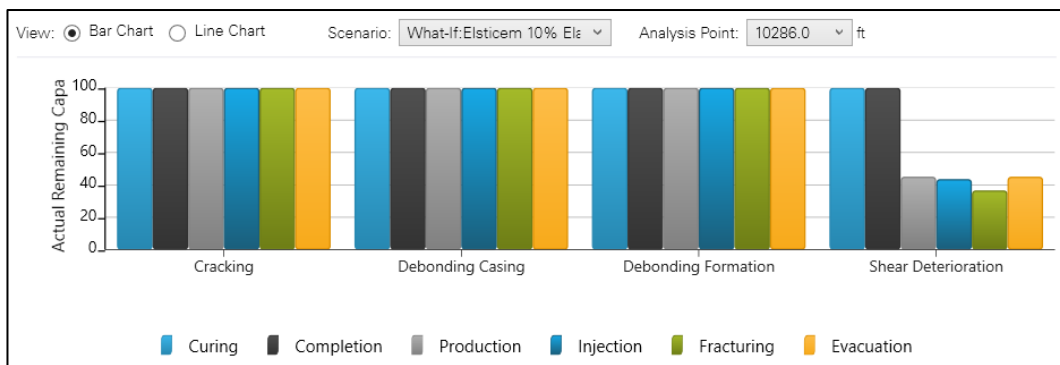


Figura 29. Simulación Software Elementos Finitos

Fuente. - Software iCem Halliburton

La lechada pesada con aditivos expansivos durante el curado, completación, producción e inyección no presenta fallas por craqueo, hay buena adherencia al casing y formación, y por desgaste presenta falla llegando al punto más bajo 55% de capacidad de remanencia durante una fractura hidráulica.

Como se puede evidenciar en la figura 30 los tres sistemas de cemento pesado y elástico soportan los diversos esfuerzos durante la vida de un pozo, se observa deterioramiento del cemento durante la etapa de fractura la más crítica. Se puede determinar que un cemento falla cuando tiene 0% de remanencia, en ningún caso llegamos a ese valor con la lechada pesada.

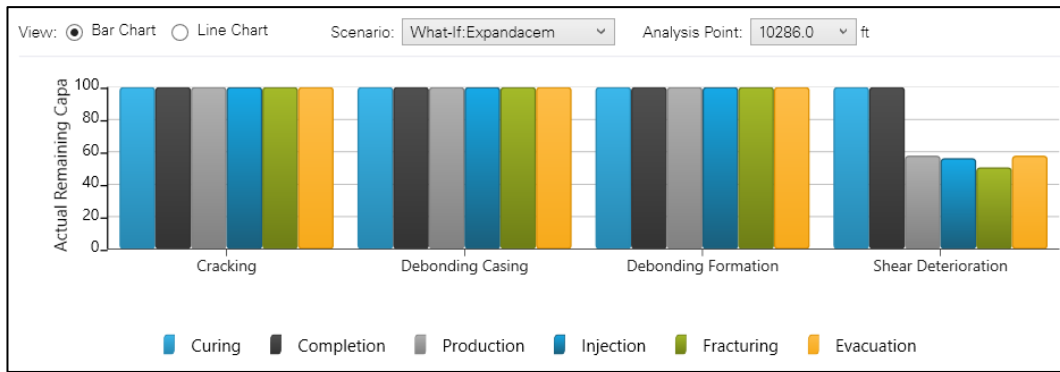


Figura 30. Simulación Software Elementos Finitos

Fuente. - Software iCem Halliburton

Ahora si comparamos a la lechada ultraligera – Elástica con un escenario usando una lechada convencional (YM, PR, D), se puede evidenciar que la lechada falla alcanzando 0% de capacidad de remanencia en todas las etapas de curado, completación, producción, inyección, fractura y evacuación.



Figura 31. Simulación Software Elementos Finitos Resultados

Fuente. - Software iCem Halliburton

La lechada ultraligera – Elástica durante el curado, completación, producción e inyección no presenta fallas por craqueo pese a su baja densidad, hay buena adherencia al casing y formación, por desgaste presenta falla llegando al punto más bajo 53% de capacidad de remanencia durante una fractura hidráulica. Con estos resultados se comprueba que pese al disminuir el peso a 7.5 ppg en superficie y 7.9 ppg en fondo aún se garantiza que el cemento soporte los diferentes esfuerzos durante su vida productiva. Adicional en el anexo 5 se resume un comparativo de lechadas de bajo peso y elásticas usando otras técnicas vs la lechada ultraligera aplicada en el pozo LG1.

3.4. MATRIZ BUENAS PRACTICAS LG-1

Tabla 6. Matriz aplicación buenas prácticas

Aplicación de Buenas Practicas Cementación para Campos Maduros				
Parametros	Medida Ideal	Puntaje ideal	Medida Actual	Puntaje Actual
Factores del Pozo que influyen en el Diseño				
Condición optima del registro de caliper	Si	150		150
Claro Anular Óptimo	1-1.5"	150	1.5"	150
Standoff del programa de centralización mayor a 70% en las zonas productoras	Si	150		150
GFP de la zona productora determinado y lechada de cemento diseñada de acuerdo al mismo.	Si	150		150
Lechada de producción Elástica / simulaciones de remanencia	Si	150		150
Se realizó un análisis preliminar por escrito de los registros de hueco abierto	Si	150		150
Uso de un simulador de temperatura y registros eléctricos para revisar el perfil de temperatura del pozo	Si	150		150
ECD en ventana de Gradiente de Fractura/poro con tolerancia mayor a 0.1 gr/cc	Si	150		150
Parámetros de laboratorio				
Agua Libre	0 Pozos Verticales 0 a 45 grados pozos Horizontales o altamente desviados	100		100
Tiempo Bombeable	>2 horas de Seguridad	100		100
Tiempo de transición	<30 min	100		100
YP a BHCT del fluido que desplaza mayor que el fluido desplazado YP Lodo<YP Espaciador<YP Lechada Relleno<YP Lechada Amarre	Jerarquia en Reologias	100		100
MPRO - Modulo de Young y Relación de Poisson acorde a parámetros de Cemento elástico	SI	100		100
"Compatibilidades entre fluidos Cemento/espaciador Cemento/lodo Espaciador/preflujo Lodo/preflujo Espaciador/Lodo"	Si	100		100
Parámetros del Fluido de Perforación				
Contenido de Solidos	Bajo contenido de solidos	150		150
"YP a BHCT según recomendación al momento de cementar: 0-45 grados inclinación, YP <15 45-60 grados inclinación, YP<20 60-85 grados inclinación, YP<28 85-90 grados inclinación, YP<30"	Si	150		150
"Perfil de geles planos de 10s/10m y 30 m al momento de cementar (e.g. 7/9/12), *Dependerá del ángulo de inclinación del pozo y el YP usado en el lodo"	Si	150		150
Filtrado del Lodo API<12 y HPHT<15	Si	150		150

Parámetros de los Espaciadores				
Altura de Preflujo	Mínimo 305 mts o 5 min de contacto	150		150
Altura de Espaciador	Mínimo 305 mts o 5 min de contacto	150		150
Paquete de surfactantes compatibles para el tipo de lodo	Si	150		150
Reacción Química de rompimiento del cake del lodo con el Preflujo en caso de lodo base agua	Si	150		150
Corrida de Tubería y Acondicionamiento del pozo				
Circulación del pozo en frente a las zonas permeables a medida que se corre el revestimiento en el hueco	Si	100		100
Perdidas de circulación/influjos durante la bajada de revestimiento, acondicionamiento de lodo.	No	100		100
Empaquetamiento durante la corrida del revestimiento/circulación	No	100		100
Presión de circulación vs Real similares	Si	100		100
Circulación de 200% de la capacidad del anular después de sentar el colgador	Si	100		100
Máxima Tasa de circulación previo a realizar la cementación	Igual a máxima tasa de flujo en anular simulada	100		100
Ejecución de la Operación				
Ejecución del trabajo de acuerdo al programa original	Si	200		200
Tiempo estático <5 min	Si	200		200
Pérdidas de circulación/influjos durante la cementación y/o después de efectuada la cementación	No	400		400
Empaquetamiento durante el trabajo de cementación	No	200		200
Reciprocación/Rotación de la tubería durante el trabajo de cementación	No	200		200
Funcionamiento del Equipo de Flotación y Equipo Alterno				
Funcionamiento correcto del Wiper Plug y Dardo	Si	150		150
Funcionamiento Correcto del Liner Hanger	Si	150		150
Longitud del shoe track mayor a 80 ft	Si	150		150
Funcionamiento correcto del equipo de flotación, sostiene la presión diferencial	Si	150		150
	Total para el puntaje ideal	5400	Total Trabajo	5400
Eficiencia para aplicar las Mejores Prácticas:				100%

3.5. EVALUACION ECONOMICA

3.5.1. COSTO DE LA TECNOLOGIA

El costo de cementación de producción representa no más del 14% de los costos totales del pozo, es una etapa crítica que afecta negativamente la producción del pozo si no se toman en cuenta los diversos factores de diseño a la medida de las necesidades del pozo.

Con la finalidad de realizar una comparación se tomó en cuenta los costos estimados de una cementación con un cemento elástico y pesado, el mismo que involucra el uso de los equipos básicos de cementación.

Tabla 7. Costos estimados Cementación con Cemento Elástico-Pesado

Cemento Elastico -Pesado			
Costo Materiales		Costos Servicios	
Espaciadores	\$ 32,100.00	Personal	\$ 10,000.00
Materiales	\$ 11,799.45	Movilizacion	\$ 6,000.00
		Equipos Esp	\$ 15,220.00
Sub Total	\$ 43,899.45	Sub Total	\$ 31,220.00
Costos Totales		\$ 75,119.45	
Revenue Estimado		\$ 166,660.95	

Fuente. - Costos estimados en el mercado de Cementación

Para un servicio con cemento ultraligero este involucra el uso de materiales especiales como son las esferas de vidrio y alta concentración de elastómero, además es necesario el uso de equipo adicional para la mezcla en pozo y mayor cantidad de personal.

Tabla 8. Costos estimados Cementación con Cemento Ultraligero

Cemento Ultraligero y Elastico			
Costo Materiales		Costos Servicios	
Espaciadores	\$ 32,100.00	Personal	\$ 12,000.00
Materiales	\$ 23,142.73	Movilizacion	\$ 7,000.00
		Equipos Esp	\$ 19,220.00
Sub Total	\$ 55,242.73	Sub Total	\$ 38,220.00
Costos Totales		\$ 93,462.73	
Revenue Estimado		\$ 181,085.79	

Fuente. - Costos estimados en el mercado de Cementación

La diferencia de usar la tecnología de cemento elástico ultraligero vs un cemento pesado representa un 9% de incremento, este valor es mínimo tomando en cuenta las ventajas que provee la tecnología al minimizar gastos asociados en: posibles re-trabajos, producción temprana de agua, pérdidas de fluido y daño de formación, estimulaciones.

El costo más representativo es el que está aportando la esfera de vidrio, es altamente recomendable usar el material (esfera) que provea mayor resistencia sin variación de su gravedad específica para obtener una lechada homogénea en densidad durante su bombeo y posicionamiento en fondo.

3.5.2. ESCENARIOS DE PRODUCCION DEL POZO LG1

El campo LG produce por más de 30 años y tiene una producción aproximada de 11,000 bbls de petróleo por día y produce de los reservorios Basal Tena, Hollín, U y T, actualmente tiene aproximadamente 50 pozos activos.

Para el pozo LG1 se tomó en cuenta los datos petrofísicos detallados en la tabla xxx con lo cual se ha establecido una curva IPR para el reservorio Hollín inferior.

Datos:

Tabla 9. Datos de los reservorios en el campo LG

Campo	Reservorio	API	Temperatura (F)	Rs, Pie ³ /bblIN	Pi, (Psi)	Presión de burbuja (psi)	Factor Volumétrico del Petróleo (Rby/bblIN)
LG	Basal Tena	27,0	194	198	3000	810	1.1863
LG	Napo U	28,0	204	120	4195	268	1.24
LG	Napo T	32,0	205	264	4200	770	1.219
LG	Hollin	28,0	208	188	4300	755	1.167

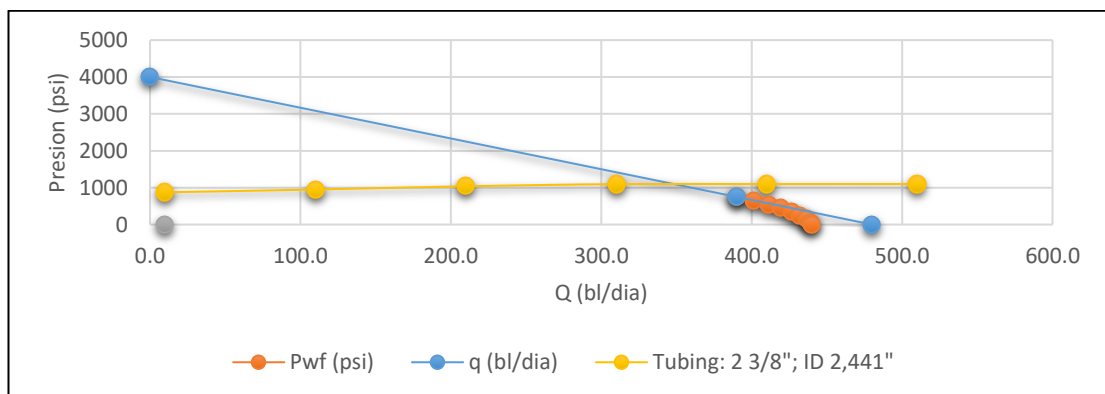


Figura 32. IPR LG-1, Hollin Inferior

Mediante la ecuación de Vogel, tenemos un Qmax de 480 bbls y un caudal estimado de 350 bbls con 1000 psi de Pwf, usando BES de 200Hz en tubería 2 3/8", si estimamos el BSW de la zona equivalente a 38% tendríamos una producción de petróleo de 216 BPPD.

Con los datos del campo se ha realizado una estimación de declinación del 0.4% con lo que en la Figura 27 se detalla la producción estimada hasta el 2027.

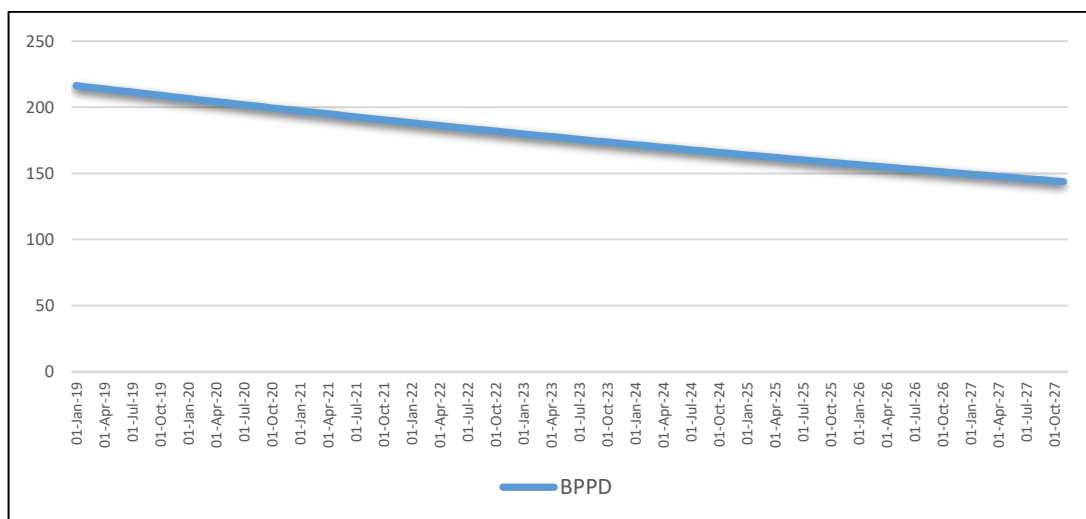


Figura 33. LG1 Forecast Hi - 04% decl

Tabla 10. Cálculo de rentabilidad TIR

Precio barril petróleo WTI	\$ 50.05
Costo Producción	\$ 8.22
Perforación del pozo	\$ (5,972,460.17)
Completación	\$ (907,313.23)
Fractura	\$ (500,000.00)
Actual VP	\$ (7,379,773.40)
Año 1 VP	\$ 3,035,373.87
Año 2 VP	\$ 2,485,707.58
Año 3 VP	\$ 7,260,397.60
NPV	\$ 5,401,705.65
TIR	27%

Con un TIR de 27% se detalla el estimado de ingresos por mes y por año (diagrama año sobre año A/A), así en el primer mes cubre el costo del trabajo de Cementación con Cemento Ultraligero y elástico y a los tres años cubre el costo completo de perforación, completación y un trabajo de Workover en el pozo LG-1.

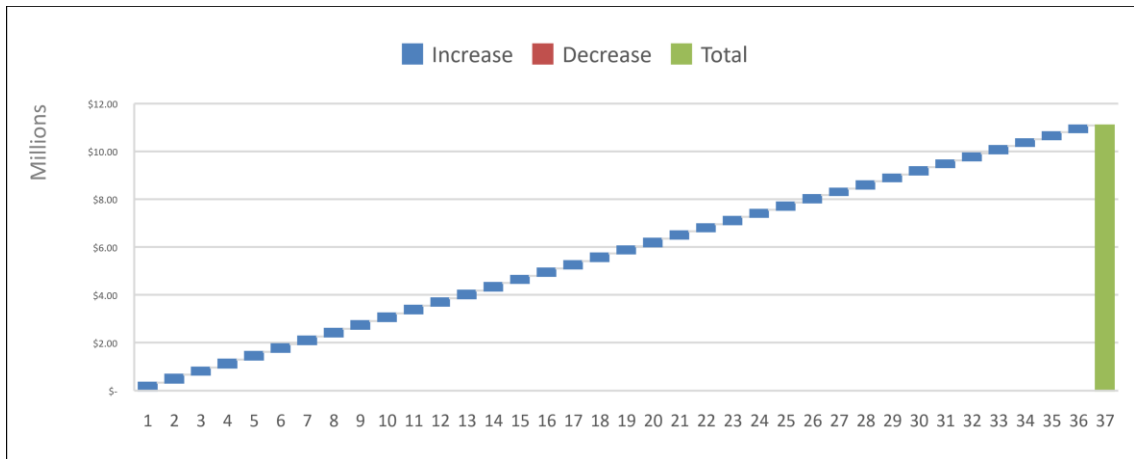


Figura 34. Recuperación de la Inversión pozo LG1

4. CONCLUSIONES

- Se ha logrado establecer un diseño de lechada ultraligera de peso 7.5 lpg en superficie y 7.9 lpg en fondo.
- Mediante una prueba estática se determinó el módulo de Young y relación de Poisson de la lechada Ultraligera, los valores obtenidos equivalen a un material elástico, YM: 708Kpsi, RP: 0.28
- Ante una ventana muy estrecha de gradiente de fractura y presión poral se realizaron los diseños de la cementación del pozo LG-1 utilizando fluidos de bajo peso.
- La remanencia del cemento es una medida óptima para evaluar la falla del cemento con el tiempo, el pozo LG-1 fue sometido a grandes esfuerzos y aun así el cemento permaneció remanente con valores similares si se hubiese utilizado el cemento pesado.
- Asumiendo pérdidas por circulación durante la cementación ocasionan una fuerte afectación para alcanzar los topes de cemento deseados, en este caso se ha simulado una pérdida de circulación del 70% llegando a disminuir el tope de cemento en 500 ft.
- Las buenas prácticas de cementación son vitales para conseguir un correcto aislamiento zonal, se ha realizado una compilación de las correctas prácticas de cementación y su influencia en los resultados para el pozo LG-1.
- La tecnología de lechada ultraligera apunta a hacer posible la terminación compleja de pozos donde es difícil espumar efectivamente el cemento, permitiendo la realización de técnicas de estimulación como la fracturación hidráulica como en el caso de LG-1 se aplicó en la simulación una presión de 10000 psi.
- Se ha comparado dos técnicas de medición de propiedades mecánicas, la dinámica y la estática, se compararon los resultados obtenidos de la lechada ultraligera con el método estático vs los resultados disponibles con el método dinámico.
- El equipo MRPO (Pruebas estáticas) es similar al del equipo UCA. El módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el módulo de volumen se calculan a partir de las velocidades de onda de compresión y de corte. El límite superior de temperatura es de 400 ° F y el límite superior de presión es de 10000 psi.
- El trabajo de Cementación usando lechada ultraligera y elástica representa un 9% más en costos comparado con la lechada elástica de alto peso, el costo de la cementación es pagado en el primer mes de producción del pozo, y el valor total de costos (Perforación, Completación y Workover incluido Fracturamiento) es cubierto en dos años considerando una tasa interna de retorno del 27%.

5. RECOMENDACIONES

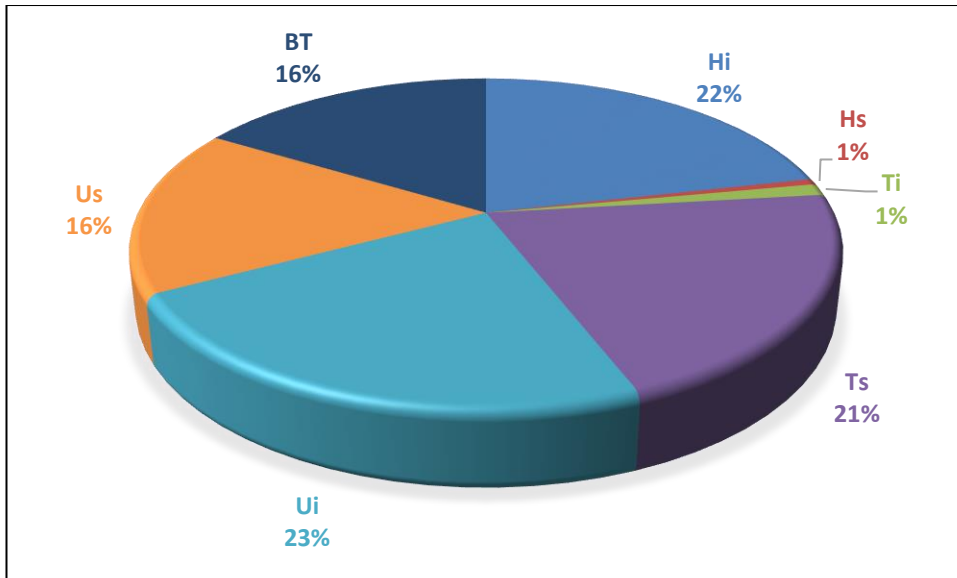
- Realizar un estudio completo de mecánica de rocas antes de perforar un pozo en un campo maduro, involucrar a ingeniería de cementación para establecer el mejor diseño considerando gradientes de fractura y presión poral.
- Verificar la correcta aplicación de esfera de vidrio de acuerdo a la presión deseada en fondo para evitar problemas de calidad.
- Aplicar simulaciones con escenarios de pérdidas durante la cementación para verificar el óptimo diseño y la afectación del Tope de Cemento en formaciones productoras.
- Tomar en cuenta la presión de rompimiento de las esferas de vidrio, la densidad en superficie es menor que la densidad en fondo, para el caso del pozo LG1 la densidad en superficie de 7.5 ppg, equivale en fondo a 7.9 ppg después de la ruptura de la esfera.
- Formular la lechada de cemento con mayor concentración de elastómeros que provean un módulo de Young relación de Poisson adecuados que brinden elasticidad al cemento.
- Con una prueba dinámica se obtienen datos más exactos, pero el análisis estático nos ayuda a determinar valores de Modulo de Young y Relación de Poisson mas rápido.
- Extender el Scord Card de buenas prácticas para pozos con otros retos, establecer una matriz por cada tipo de pozo.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, M. A. (2015). El Futuro de los campos maduros en Mexico: Un reto y una oportunidad. *ai Mexico*, 52.
- Allen, S. (1993). Why Control Cement Slurry Density? . *25324-MS SPEConference Paper*, 9.
- Bosma M, R. K. (1999). Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well . *SPE - Houston, Texas 3-6 October*, 17.
- Darbe R, G. C. (2008). Slurry Design Considerations for Mechanically Enhancement Cement System. *AA-DE-08DF-HO-06*, 8.
- Elmoneim, H. A.-A. (2000). Unique Ultra Light-Weight Cement Slurry Compositions for Use in Unique Well Conditions, Laboratory Evaluation, and Field Performance. *11486-MS SPE Conference Paper*, 9.
- Harms, T. a. (1983). Unique Ultra Light-Weight Cement Slurry Compositions for Use in Unique Well Conditions, Laboratory Evaluation, and Field Performance. *SPE* , 10.
- Hughes), P. S. (2016). High Compressive Strength, Ultra-Lightweight and Lightweight Cement – Formulated with Raw Material Locally Available in Saudi Arabia. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 25-28 April, Dammam, Saudi Arabia* , 16.
- M. D. Hudson (Schlumberger) | P. Sheperd (Schlumberger) | J. Ricci (Schlumberger). (2017). Flexible Cement Slurry Survives Multistage Hydraulic Fracturing Treatment. *SPE Unconventional Resources Conference, 15-16 February, Calgary, Alberta, Canada*, 6.
- Mukhalalaty, T. A. (1999). Increasing well life cycle by eliminating the multistage Cementer and utilizing a Light Weight High Performance Slurry . *53283-MS SPEConference Paper*, 12.
- Patrice Baby, M. R. (2014). *La Cuenca Oriente: Geologia y Petroleo*. Quito: Institut francais d'etudes andines.
- Paul M. McElFresh, V. C. (1982). Aplicacions of Foam Cement. *SPE*, 8.
- Petroleros, P.-P. y. (2015). *Technology Bulletin No. CMA-01-002 -Tuned-Light Low-Density Slurry System*.
- Thomas Heinold, R. L. (2003). Analysis od Tensile Strenght Test Methodologies For Evaluating Oil and Gas Well Cement System. *SPE*, 13.
- Timoshenko. (1970). *Theory of Elasticity* (Third edition ed.). Houston: McGraw-Hill.

ANEXOS

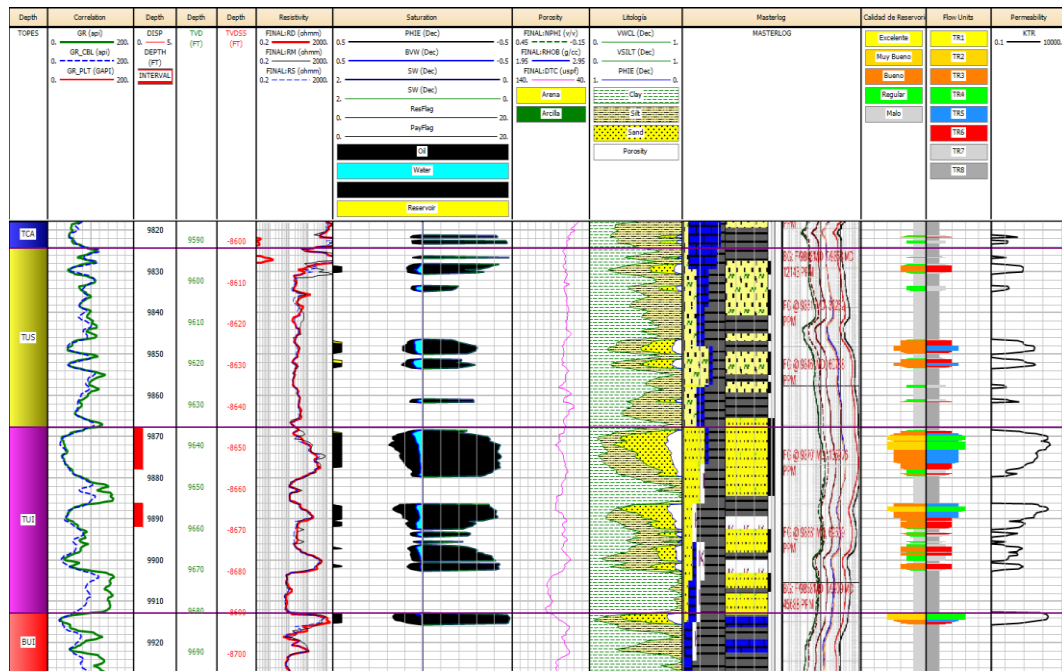
Anexo 1. Producción promedio por reservorios del campo LG



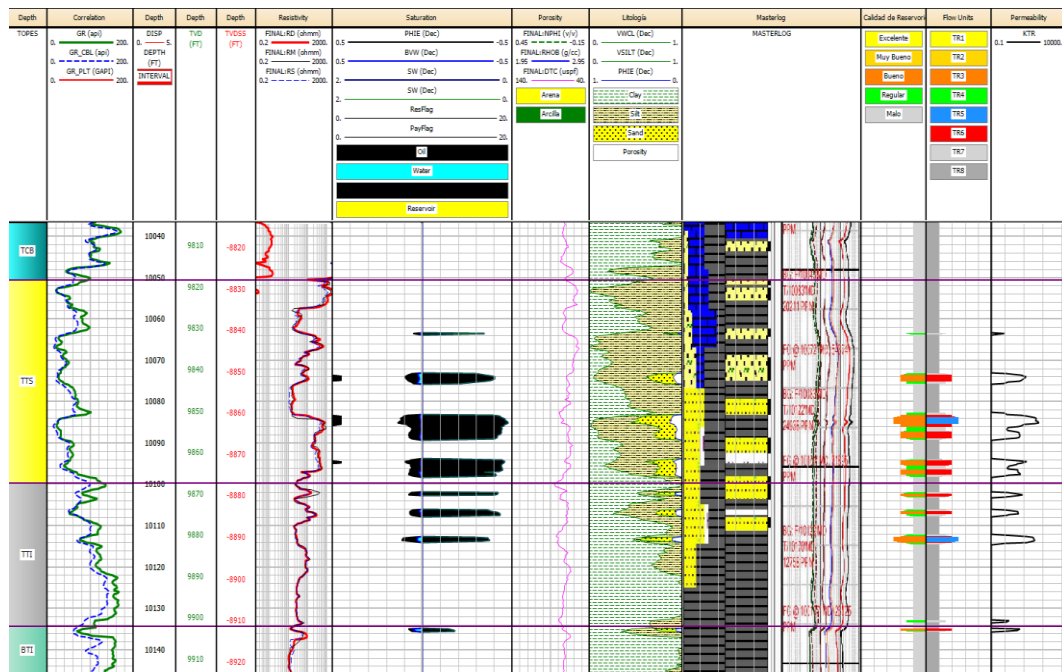
Anexo 2. Datos Petrofísicos del pozo LG1

Reservorio	Tope (Pies)	Base (Pies)	Espesor arena (Pies)	Av Phi	Av Sw	Av Vcl	Av K	Phi*H	PhiSo*H
TBT	9159.21	9193.81	34.6	---	---	---	---	---	---
TUS	9824.34	9867.71	43.37	0.097	0.414	0.253	33.231	0.46	0.27
TUI	9867.71	9912.88	45.17	0.129	0.216	0.195	200.74	1.74	1.37
TTS	10050.62	10099.79	49.17	0.105	0.119	0.105	45.995	0.42	0.37
TTI	10099.79	10134.45	34.66	---	---	---	---	---	---
THS	10220.42	10257.74	37.32	0.129	0.135	0.119	141.01	0.87	0.75
THSest	10257.74	10313.27	55.53	0.141	0.332	0.072	234.235	4.9	3.27
THSsello	10313.27	10331.22	17.95	0.098	0.25	0.167	35.479	0.15	0.11
THI	10331.22	10484	152.78	0.139	0.242	0.079	216.509	3.13	2.37

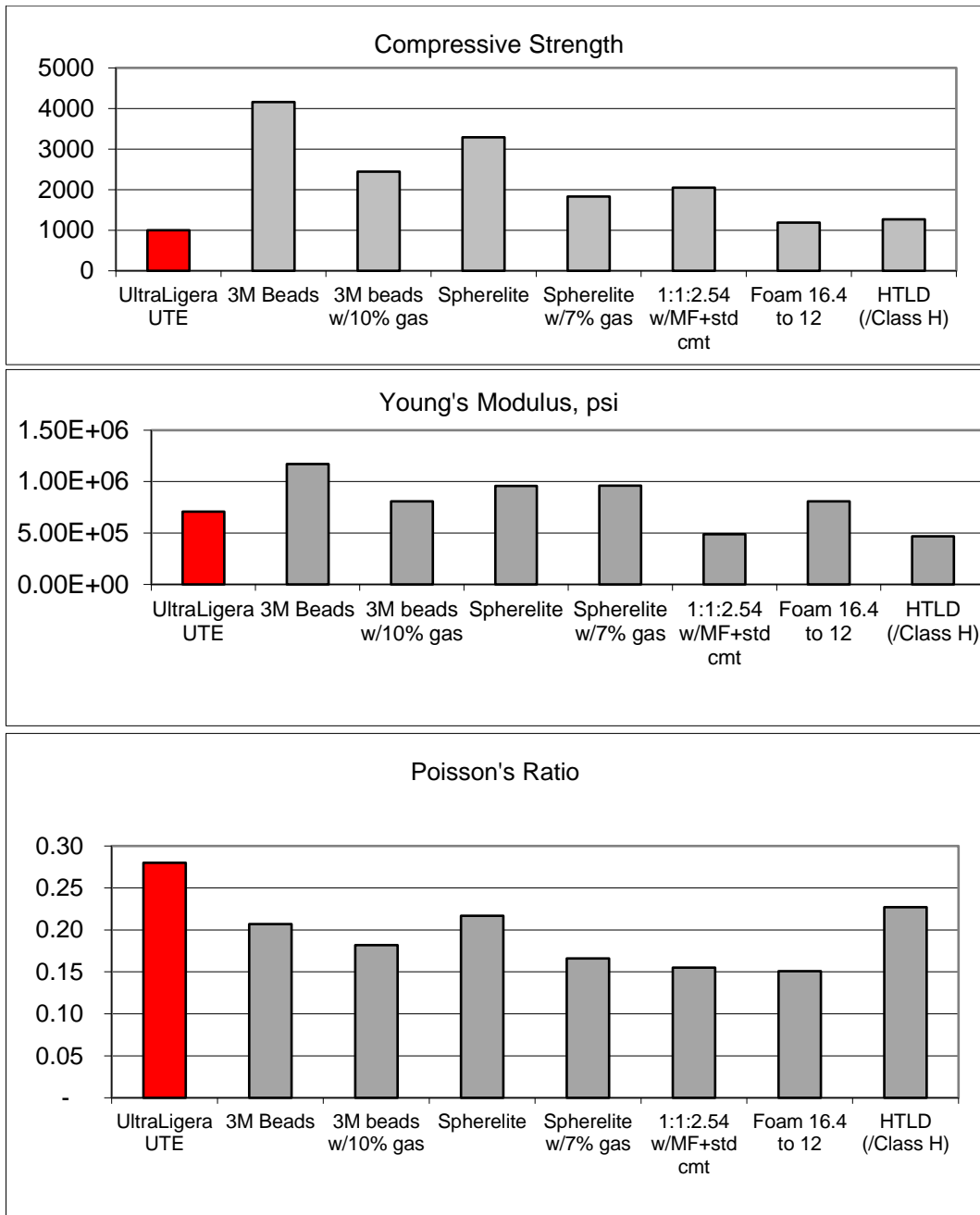
Anexo 3. Petrofísica del pozo LG1, reservorio Ui



Anexo 4. Petrofísica del pozo LG1, reservorio Hollín inferior



Anexo 5. lechadas comunes en Formaciones de baja presión, comparadas con la lechada ultraligera



Fuente. - Lechadas más comunes en Latino América – Estudio Halliburton 2011

Anexo 6. Costos estimados para la Perforación del pozo LG-1.

Pozo: LG1				Movilization	Surface 16"- 13 3/8"	Intermediate 12 1/4" - 9 5/8"	Production 8 1/2" - 7"	Total	
Days	40.5 days							Drilling	
Depth	10,410			20.0 days	9.9 days	11.8 days	8.8 days	50.5 days	
Código	Linea de Servicio	Descripción	\$ Unit Cost	\$ Unit Cost	\$ Unit Cost	\$ Unit Cost	\$ Unit Cost	\$ Unit Cost	
		Lodos	-	350,000.00	400,000.00	380,000.00	28%	1,130,000.00	32%
		Cementacion	-	150,000.00	150,000.00	180,000.00	13%	480,000.00	14%
		Registros y Canoneo	-	-	100,000.00	150,000.00	11%	250,000.00	7%
		Drilling	-	200,000.00	200,000.00	300,000.00	22%	700,000.00	20%
		Brocas	-	30,000.00	70,000.00	30,000.00	2%	130,000.00	4%
		Herramientas	-	-	-	150,000.00	11%	150,000.00	4%
		Gerenciamiento	100,000.00	200,000.00	200,000.00	150,000.00	11%	650,000.00	19%
		Subtotal	100,000.00	930,000.00	1,120,000.00	1,340,000.00		3,490,000.00	
		Subtotal Servicios Terceros	300,000.00	700,000.00	900,000.00	600,000.00		2,500,000.00	
		Total	400,000.00	1,630,000.00	2,020,000.00	1,940,000.00		5,990,000.00	

Fuente.- Resumen de costos proyectos integrados Petroamazonas campo LG.1