

**DISEÑO ÓPTIMO DE UNA LECHADA EXPANSIVA EVALUANDO DIFERENTES  
ADITIVOS A FIN DE PREVENIR LA FORMACIÓN DE MICRO-ANILLOS,  
APLICACIÓN A UN CAMPO COLOMBIANO**

**ANDREA CAROLINA PEREZ CARREÑO  
EDUARD ANDRES PUENTES MEDINA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DISEÑO ÓPTIMO DE UNA LECHADA EXPANSIVA EVALUANDO DIFERENTES  
ADITIVOS A FIN DE PREVENIR LA FORMACIÓN DE MICRO-ANILLOS,  
APLICACIÓN A UN CAMPO COLOMBIANO**

**ANDREA CAROLINA PEREZ CARREÑO  
EDUARD ANDRES PUENTES MEDINA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Directora**

**Ph. D ZULY HIMELDA CALDERÓN CARRILLO**

**Co-director**

**Cristian Andres Escarraga Yepes  
Borehole Production Engineer en Schlumberger**

**Co-director**

**Sergio Acosta  
Especialista en Cementación en Ecopetrol**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **DEDICATORIA**

A Dios primero que todo, por llenarme de bendiciones, de sabiduría, de paciencia y por iluminarme en el camino en los momentos difíciles. Gracias por la vida, mi familia, mis amigos, las oportunidades y experiencias enriquecedoras, a todos aquellos que de una u otra forma, nunca han dejado de ser mi apoyo.

A mis padres Zoraida y Orlando, por su amor incondicional, sus consejos, por el esfuerzo y sacrificio que han hecho para mi bienestar. Gracias por el buen ejemplo que han sido para mi vida, por sus regaños oportunos que forjaron mi carácter. Su perseverancia y confianza en mí.

A mi hermana, que junto con sus acordes y melodías han sido compañera en las noches de traspasado. Gracias por estar presente y pese a los disgustos, gracias por ser mi mayor confidente.

A mis tíos María y Cesar por recibirme en su casa como una hija más cuando comience la universidad, a mis primas Lina e Isabel quienes están en mi corazón.

Andrés, por la paciencia y trabajo en esta etapa. Le deseo lo mejor en este nuevo ciclo. Gracias por enseñarme el valor del trabajo duro y ser ejemplo de honestidad y dedicación.

A mis amigas, Mayerly, Yuliana, Diana, porque aun y con el pasar del tiempo, en buenos y malos momentos, su amistad ha perdurado.

**Andrea Carolina Pérez Carreño**

A Dios que por más duros que se han tornado los tiempos, siempre he sentido tu amor incondicional y tu mano que jamás me ha dejado solo. Adicionalmente por haberme dado la gran oportunidad de compartir y disfrutar una vida tan apasionante junto a estas personas maravillosas que son mi familia.

A mi madrecita por tu incansable lucha y gran amor con la que te levantas cada día a continuar batallando por sacarnos adelante, siempre con enseñanzas, palabras de cariño y de valor para enfrentar la vida.

A mi viejo por esos buenos momentos que compartimos en cada viaje que realizamos, aprendiendo de la vida, con hermosos paisajes a nuestro alrededor y cultivando grandes recuerdos.

A Gordo por ser mi Hermano y por circunstancias de la vida mi padre a la vez, siempre con un consejo, con palabras de apoyo en cualquiera que fuese la situación. Por enseñarme a ver las cosas hermosas que trae cada día, por madrugar a entrenar cada vez más fuerte que es donde esta la ganancia y principalmente por darme tu amor incondicional en estos 23 años de vida siendo mi compañero de luchas y aventuras, que nunca has desfallecido en creer en mí y como dice nuestro lema "Somos los dos contra el Mundo".

A mi hermana porque siempre tener un punto de vista de la vida tan particular y poco común que me ha enseñado a defender mis ideales y luchar por lo que realmente quiero en la vida.

A mi tía Betty por estar siempre dispuesta a brindar un consejo cuando más lo necesitaba y además abrirme las puertas de tu hogar.

A David por compartir tantos momentos juntos, aprendiendo a vivir y rescatando lo mejor de nosotros mismos.

A Doña Betty, Doña Mónica, Janetsita y Doña Zoraida que a lo largo de estos años donde por cosas del destino no tuve la oportunidad de tener cerca a mi mamá, me acogieron en sus hogares con un gigantesco cariño de madres.

A Andrea por compartir buenos momentos en el camino y ser siempre sincera aun en contra de todos los preceptos.

A Summer la cavernícola que con su hermosa personalidad perruna y a pesar de no poder hablar, me ha enseñado cosas tan increíbles que jamás podre olvidar.

**Eduard Andrés Puentes Medina**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Doctora Zully Calderon por su gran ayuda al guiarnos en cada etapa de este proyecto, para que concluyéramos de la mejor manera posible.

Al ingeniero Daniel Daza zarate por tener siempre buena voluntad en apoyar nuestro proyecto, ayudando a establecer unas bases fuertes que soportaran toda la tesis.

Al Ingeniero Jorge Luis Arias por su apoyo incondicional y compartir con nosotros su invaluable conocimiento.

A los Ingenieros Sergio Acosta y Cristian Escarraga por creer en nuestro proyecto y generar aportes valiosos para llevar a cabo un trabajo real y excelente.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION .....	22
1. CEMENTO PORTLAND.....	24
1.1. GENERALIDADES .....	24
1.2. QUÍMICA Y CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	25
1.2.1. Resistencia a los sulfatos.....	25
1.2.2. Cambios de volumen durante el asentamiento.....	26
1.2.3. Efecto de la temperatura.....	27
1.2.4. Fraguado relámpago y fraguado falso. ....	27
1.2.5. Encogimiento del cemento.....	28
1.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS LECHADAS DE CEMENTO .....	28
1.3.1. Gravedad específica. ....	28
1.3.2. Peso volumétrico .....	30
1.3.3. Requerimiento de agua normal.....	30
1.3.4. Requerimiento de agua mínima.....	30
1.3.5. Densidad de la lechada.....	30
1.3.6. Rendimiento.....	31
1.3.7. Tiempo de espesamiento.....	31
1.3.8. Agua de mezcla .....	34
1.3.9. Fluido de mezcla.....	34
1.3.10. Reología.....	35

1.3.11. Viscosidad plástica.....	36
1.3.12. Punto de cedencia. ....	36
1.3.13. Resistencia a la compresión. ....	36
1.3.14. Agua libre.....	40
1.3.15. Temperatura Estática de fondo.....	41
1.3.16. Temperatura de circulación en fondo.....	42
1.4. ADITIVOS .....	43
1.4.1. Aceleradores.....	43
1.4.2. Extendedores.....	44
1.4.3. Densificantes. ....	44
1.4.4. Retardadores. ....	44
1.4.5. Agentes de pérdida de circulación.....	45
1.4.6. Agentes de control de filtrado. ....	45
1.4.7. Dispersantes.....	45
1.5. MEDICIÓN DE EXPANSIÓN Y ENCOGIMIENTO DE LECHADAS DE CEMENTOS.....	46
1.5.1. La prueba molde de anillo.....	46
1.5.2. La prueba de membrana.....	47
1.5.3. La prueba manga-cilíndrica.....	49
1.5.4. El Cha. ....	50
1.5.5. Método del frasco. ....	51
1.5.6. Prueba de expansión ASTM C-151-00. ....	52
1.6. EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE CEMENTACIÓN .....	53

1.6.1. CBL (Cement Bond Log).....	55
1.6.2. VDL (Variable Density Log).....	57
1.6.3. Índice de Adherencia. ....	58
1.6.4. Registros ultrasónicos.....	58
1.6.6. Trabajo con buena cementación.....	67
1.6.7. Canal de lodo.....	68
1.7. MICRO-ANILLOS.....	69
1.7.1. Efectos del micro-anillo en el CBL. ....	69
1.7.2. Micro-anillo húmedo.....	70
1.7.3. Micro-anillo Seco .....	71
2. ADITIVOS EXPANSIVOS PROPUESTOS .....	73
2.1. POLVO DE ALUMINIO .....	73
2.2. SAL .....	75
2.2.1. Efecto de la sal en la Expansión.....	75
2.2.2. Efecto de la temperatura.....	76
2.2.3. Efecto de la presión. ....	77
2.3. BENTONITA .....	78
2.4. ÓXIDO DE MAGNESIO .....	79
2.5. SULFATO DE CALCIO DI-HIDRATADO .....	80
2.6. CAL ANHIDRA.....	80
2.7. SULFATO DE SODIO .....	83
2.8. ÓXIDO DE MAGNESIO CALCINADO .....	87
3. GENERALIDADES DEL CAMPO .....	91

3.1. ROCA GENERADORA .....	94
3.2. ROCA RESERVORIO.....	94
3.3. ROCA SELLO .....	94
3.4. TRAMPAS.....	95
3.5. ANTECEDENTES DE CEMENTACIÓN.....	95
3.6. APLICACIÓN DE LECHADA EXPANSIVA .....	96
4. DISEÑO DE CEMENTACIÓN.....	99
4.1. PARÁMETROS DEL DISEÑO .....	99
4.2. ESTADO MECÁNICO.....	100
4.3. BUENAS PRÁCTICAS Y RECOMENDACIONES DE CEMENTACIÓN ....	101
4.4. INTERVALOS DEL POZO .....	102
4.5. CÁLCULOS VOLUMÉTRICOS .....	103
4.5.1. Volumen de lechada .....	103
4.5.2. Volumen anular.....	103
4.5.3. Exceso .....	103
4.5.4. Traslape.....	103
4.5.5. Cement on TOL .....	104
4.5.6. Shoe Track.....	104
4.5.7. Volumen detrás del Pump Down Plug .....	104
4.5.8. Volumen Total.....	104
4.5.9. Rendimiento de la lechada (pie <sup>3</sup> /saco).....	105
4.5.10. Sacos de cemento requeridos .....	106
4.6. VOLUMEN DE DESPLAZAMIENTO.....	106

4.6.1. Desplazamiento con Drill Pipe 5” .....	106
4.6.2. Desplazamiento con HWDP 5” .....	107
4.6.3. Desplazamiento en el Liner 7” .....	107
4.6.4. Shoe Track.....	107
4.6.5. Volumen Total.....	107
5. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO .....	108
5.1. SAL .....	110
5.2. OXIDO DE MAGNESIO CALCINADO .....	114
6. CONCLUSIONES .....	126
7. RECOMENDACIONES.....	128
BIBLIOGRAFÍA.....	129

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Componentes del Cemento Portland (Smith, 1990).....	24
Tabla 2. Relación de Agua de Mezcla con Tipo de Cemento, Profundidad y Temperatura Estática.....	34
Tabla 3. Umbrales de impedancia para la herramienta USI. (Nelson & Guillot, 2006).....	65
Tabla 4. Guia de interpretacion USI y CBL/VDL. (Nelson & Guillot, 2006) .....	66
Tabla 5. Efecto del Polvo de Aluminio en la expansión del cemento .....	74
Tabla 6. Efecto en la fuerza de compresión del polvo de aluminio .....	74
Tabla 7. Efecto expansivo del sulfato de sodio. ....	83
Tabla 8. Propiedades típicas de los cementos Portland API .....	109
Tabla 9. Especificaciones técnicas del cemento Petrolero clase G Argos .....	109
Tabla 10. Concentraciones de MgO .....	115
Tabla 11. Porcentaje de expansión lineal después de 30 días de fraguado a 150°F y 4,500 psi .....	119

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Frasco de Le Chatelier 250 cc .....	29
Figura 2. Balanza de Lodos y cementos presurizada para medir densidad de la mezcla .....	31
Figura 3. Consistómetro Atmosférico .....	32
Figura 4. Típica gráfica de espesamiento .....	33
Figura 5. Viscosímetro de Fann, real y en sección transversal.....	36
Figura 6. Prueba destructiva de Resistencia a la Compresión .....	37
Figura 7. Ultrasonic Cement Analyzer UCA.....	38
Figura 8. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva.....	39
Figura 9. Muestra sometida a prueba de Agua Libre .....	40
Figura 10. Prueba Split-ring .....	47
Figura 11. Esquema de la prueba de membrana.....	48
Figura 12. Manga cilíndrica para mediciones de expansión del cemento .....	50
Figura 13. Diagrama de aparato CHA.....	51
Figura 14. Flask Pipette set up .....	52
Figura 15. Prueba de expansión ASTM C-151-00 .....	53
Figura 16. Evaluación del trabajo de cementación .....	54
Figura 17. Configuración de la herramienta CBL-VDL.....	55
Figura 18. Fundamentos sónicos – CBL.....	56
Figura 19. Represetnacion de una señal completa de forma de onda de una herramienta CBL.....	57
Figura 20. Herramienta CET.....	60
Figura 21. Herramienta USI (Ultrasonic Imager).....	61
Figura 22. Respuesta ultrasónica a diferentes materiales en el anular.....	62
Figura 23. Efecto del micro-anillo con líquido y con gas en las mediciones del cemento, usando un diámetro de 4,7 in de diámetro, casing de 9 mm de espesor. ....	63

Figura 24. Mapas del USI (Ultrasonic Imager Tool) .....	64
Figura 25. Umbral de impedancia para distinguir entre gas (o microanillo seco), liquido y solido. ....	65
Figura 26. Registro USI y CBL-VDL con buena cementación.....	67
Figura 27. Registro USI y CBL-VDL canal de lodo. ....	68
Figura 28. Registro CVL-VDL y USI mostrando un micro-anillo húmedo alrededor de la tubería.....	70
Figura 29. Registro CVL-VDL y USI.....	71
Figura 30. Mapa USI con micro-anillo seco .....	72
Figura 31. Efecto de la Sal en el Cemento clase H, 35% Silica, 42% Agua, Sal, 3000 psi, 200°F.....	76
Figura 32. Efecto de la temperatura - Cemento Clase H, 35% silica, saturado en sal, 42% Agua, 3000 psi. ....	77
Figura 33. Efecto de la presión - Cemento Clase H, 35% silica, Saturado en sal, 42% agua, 200 °F. ....	78
Figura 34. Efecto de la presión sobre la expansión (cemento 50:50 cemento puzolana, Bentonita 2%, <i>Agua 5,75 GalSaco</i> , curado a diferentes presiones y temperatura de 100 °F .....	79
Figura 35. Izquierda, Celda de coeficiente de esquemático para la medición de expansión. Derecha, Maquina de pruebas mecánicas .....	81
Figura 36. Resultados de expansión confinada (estrés compresivo vs tiempo) para la hidratación de la mezcla cemento/ MgO a 85 °C. a). Diferentes cantidades de MgO. b) 14% bwoc de agente expansivo CaO/MgO .....	82
Figura 37. Efecto del Sulfato de sodio (Cemento – API clase A ( $C3A = 8,1\%$ ); <i>Agua 5,2galsaco</i> , fraguado a presión atmosférica y 80°F) .....	85
Figura 38. Efecto del sulfato de sodio (Cemento - 50:50 cemento puzolana; bentonita 2%, <i>Agua 5,7galsaco</i> , fraguado a presion atmosferica y 80°F).....	85
Figura 39. Efecto del Cloruro de Sodio (Cemento 50:50 cemento puzolana; Bentonita 2%; <i>Agua 5,75 gal/saco</i> , fraguado a presión atmosférica y 80°F) .....	86

Figura 40. Efectos de aditivos en la expansión (Cemento API Clase A – Agua 5,2 gal/saco; fraguado a presión atmosférica y 80 °F).....	86
Figura 41. Expansión lineal – Cemento Clase G .....	88
Figura 42. Expansión lineal del óxido de Magnesio con cambio de tiempo (Saidin, Sonny, & Nuruddin, 2008).....	88
Figura 43. Porcentaje de Expansión Lineal de Oxido de Magnesio con cambio de presión. ....	89
Figura 44. Porcentaje de expansión lineal del Oxido de Magnesio con cambio la temperatura.....	90
Figura 45. Cuenta Llanos Orientales (Agencia Nacional de Hidrocarburos) .....	92
Figura 46. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca de los Llanos Orientales (Agencia Nacional de Hidrocarburos) .....	93
Figura 47. Cemento Expansivo, mejora en la adherencia del cemento .....	98
Figura 48. Estado mecánico pozo tipo .....	100
Figura 49. Efecto de la Sal en el Cemento clase G, 35% Silica, 42% Agua, Sal, 3000 psi, 200°F.....	111
Figura 50. Interpolación de Temperatura Cemento API Clase G.....	112
Figura 51. Efecto de la presión sobre la sal.....	113
Figura 52. Ajuste de las temperaturas .....	113
Figura 53. Porcentaje de expansión teórico para el Cemento clase H, 35% Silica, 42% Agua, 4500 psi, 150°F.....	114
Figura 54. Porcentaje de expansión lineal del Oxido de Magnesio con cambio la temperatura.....	116
Figura 55. Efecto de la presión en el cemento a temperatura constante .....	117
Figura 56. Efecto de la presión para el $MgO$ .....	117
Figura 57. Efecto de la temperatura a 4500 psi .....	118
Figura 58. Porcentaje de expansión del Oxido de Magnesio con el tiempo a 150°F y 4500 psi.....	119
Figura 59. Efecto de la temperatura y concentración de $MgO$ en la resistencia de la compresión del cemento .....	121

Figura 60. Efecto de la temperatura y concentración de sal en la resistencia a la compresión a 24 horas después de fraguado .....	121
Figura 61. Efecto de la temperatura y concentración de la sal en la resistencia a la compresión a 48 horas después del fraguado. ....	122
Figura 62.Efecto de la concentración de la sal en la resistencia a la compresión. ....	123
Figura 63. Efecto de adición de Agua en un Cemento Expansivo saturado con NaCl.....	124

## RESUMEN

**TITULO: DISEÑO ÓPTIMO DE UNA LECHADA EXPANSIVA EVALUANDO DIFERENTES ADITIVOS A FIN DE PREVENIR LA FORMACIÓN DE MICRO-ANILLOS, APLICACIÓN A UN CAMPO COLOMBIANO\***

**AUTORES: ANDREA CAROLINA PEREZ CARREÑO  
EDUARD ANDRES PUENTES MEDINA\*\***

**PALABRAS CLAVES Micro-Anillo; Casing; Lechada de Cemento; Aditivos; Pozo petrolero; Presión, Temperatura.**

En este trabajo de grado se investigan diferentes aditivos que pueden ayudar a reducir los problemas de integridad de pozo en cuanto a migración de fluidos a través del cemento presente entre el casing y la formación, debido a la creación de micro-espacios o técnicamente llamado micro-anillos, debido a prácticas incorrectas de cementación o por el comportamiento normal de los aditivos de la lechadas de cemento cuando están sometidos a condiciones de presión y temperatura de fondo de pozo.

En primer lugar se describe todo lo relacionado con características especiales de las lechadas expansivas, equipos de medición de la expansión, herramientas y técnicas utilizadas para la detección de micro-anillos. Seguidamente se propone un listado de aditivos encontrados en la literatura y el mercado que cumplen con los requerimientos exigidos para la cementación de un pozo tipo, donde finalmente por medio de un proceso de selección y de acuerdo a sus características, se estudian a fondo eligiendo el mejor aditivo para optimizar los resultados de la cementación de pozos petroleros.

Sin embargo al concluir el trabajo de grado, el resultado final es una propuesta en base a la información técnica y teórica investigada, que tendrá la necesidad de ser llevada a una etapa experimental, si el objetivo fuese su directa implementación.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímicas, Escuela Ingeniería de Petróleos, Director Nicolas Santos

## ABSTRACT

**TITULO: OPTIMAL DESIGN OF AN EXPANSIVE SLURRY EVALUATING DIFFERENT ADDITIVES TO PREVENT THE FORMATION OF MICRO-RINGS, APPLICATION TO A COLOMBIAN FIELD<sup>\*</sup>**

**AUTORES: ANDREA CAROLINA PEREZ CARREÑO  
EDUARD ANDRES PUENTES MEDINA<sup>\*\*</sup>**

**KEYWORDS: Micro-Ring; Casing; Slurry; Additives; Oil well; Pressure, Temperature.**

In this degree work different additives that can help to reduce the problems of integrity of the well as to fluid migration through the cement available between the casing and the formation were researched, due to the creation of micro-spaces or technically called micro-rings due to incorrect cementing practices or by normal behavior of additives in cement slurries when these were subjected to conditions of temperature and pressure downhole.

First, it was described everything about special features of expansive slurry, expansion measurement equipments, tools and techniques used for the detection of micro-rings. Then, it was proposed a list of additives found in the literature and the market that meet the requirements demanded for the cementation of a typical well, which finally through a selection process and according to their characteristics, these were thoroughly studied choosing the best additive to optimize the results of cementing oil wells.

However, concluding the degree work, the end result is a proposal based on the technical and theoretical research information that will need to be taken to an experimental stage, if the objective were their direct implementation. Additionally it is necessary to perform an economic evaluation to successfully implement this project in a Colombian field.

---

<sup>\*</sup> Degree work

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physical-Chemical, Petroleum Engineering School, Director Nicolas Santos

## INTRODUCCION

Actualmente en Colombia y en el mundo entero, paralelamente al avance tecnológico, se han desarrollado métodos, técnicas y procedimientos para lograr producir los campos de manera segura y sostenible al corto y largo plazo.

Siendo la cuenca de los Llanos Orientales el foco principal de explotación petrolera en el país, cada día se continúa con la premisa de encontrar nuevas alternativas a fin de promover el óptimo desarrollo de los pozos que se perforan, es por esto que al momento de identificar un problema técnico que en principio puede parecer insignificante, como lo es la creación de Micro-Anillos en la cementación final del pozo y que a largo plazo suele generar problemas de integridad que en relativamente corto tiempo se materializan en gastos de operaciones de cementación remedial, se postula este proyecto como una posible solución al problema en cuestión. Al día de hoy en la cuenca de los llanos orientales se establece que en promedio de 6 de cada 10 pozos, presentan problemas de integridad debido a la baja calidad en la cementación.

Por lo tanto este trabajo de investigación postula a la cementación con lechadas expansivas como una alternativa para que en lugar de realizar operaciones de cementación remedial, se logre prevenir la formación de micro-anillos y asegure una cementación eficiente en la mayoría del tiempo productivo de los pozos. Por otra parte en esta tesis se describe primero todo lo relacionado con características especiales de las lechadas expansivas, equipos de medición de la expansión, herramientas y técnicas utilizadas para la detección de micro-anillos. Seguidamente se propone un listado de aditivos encontrados en la literatura y el mercado que cumplen con los requerimientos exigidos para la cementación de un pozo tipo, donde finalmente por medio de un proceso de selección y de acuerdo a

sus características, se estudian a fondo eligiendo el mejor aditivo para optimizar los resultados de la cementación de pozos petroleros.

Sin embargo al concluir el trabajo de grado, el resultado será una propuesta en base a la información técnica y teórica investigada, que tendrá la necesidad de ser llevada a etapa experimental, si el objetivo fuese su directa implementación.

## 1. CEMENTO PORTLAND

### 1.1. GENERALIDADES

El cemento Portland, ha sido el principal constituyente para llevar a cabo trabajos de cementación de pozos petroleros, obtuvo su nombre de su similitud con una roca de construcción que se encontró en la isla de Portland, cerca de las costas de Inglaterra.

La composición química del cemento varia, pero en general, está compuesto de diferentes porcentajes de materiales presentes en la **¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia..**

Tabla 1. Componentes del Cemento Portland (Smith, 1990)

Componente	Formula	Designación estándar
<b>Aluminato tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
<b>Silicato tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
<b>Silicato dicálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
<b>Ferro-aluminato tetracálcico</b>	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Fuente: Smith, D. K. Cementing. Society of Petroleum Engineers. Second Edition. United State of America. Society of Petroleum Engineers Inc. 1990.

Las normas API se refieren a clase de cemento; mientras que las normas ASTM a tipo de cemento. Los cementos clase A, B y C son productos obtenidos de la molienda del Clinker del cemento Portland, constan principalmente de silicatos de calcio y contienen una o dos formas de sulfato de calcio. Están diseñados para emplearse a 60 ft de profundidad como máximo. El cemento clase A o tipo I es

empleado cuando no se requieren propiedades especiales, el cemento clase B o tipo II en pozos donde se quiere moderada resistencia a los sulfatos, y finalmente el cemento clase C o tipo III se emplea cuando las condiciones requieran alta resistencia a la compresión temprana y puede tener alta o moderada resistencia a los sulfatos.

Los cementos clase D, E y F también conocidos como “cementos retardantes”, diseñados para ser usados en pozos más profundos. El efecto retardante de estos cementos va acompañado de una significativa disminución en cantidad de las fases que se hidratan más rápido ( $C_3S$  y  $C_3A$ ) e incrementa el tamaño de grano del cemento. Estas clases de cemento son raramente usadas actualmente.

Finalmente, los cementos clase G y H fueron desarrollados para ser utilizados con aditivos (aceleradores y retardadores) para cubrir un amplio rango de temperatura. Disponible en dos grados de resistencia a los sulfatos (alta o moderada resistencia), químicamente el G y el H son idénticos la diferencia está en el tamaño del grano, el H es más grande, como se evidencia por su menor requisito de agua<sup>1</sup>.

## **1.2. QUÍMICA Y CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND**

**1.2.1. Resistencia a los sulfatos.** La salmuera de fondo normalmente contiene sulfato de magnesio y sulfato de sodio, se pueden presentar efectos perjudiciales cuando estas sustancias reaccionan con algunos productos de la hidratación del cemento. Esta reacción de sulfatos con el hidróxido de calcio precipitado forma hidróxido de magnesio y el hidróxido de sodio forma sulfato de calcio. El sulfato de calcio puede reaccionar con los aluminatos para producir estrigita secundaria.

---

<sup>1</sup> NELSON, Op. cit., 46 pag.

Cuando la estringita se forma después que el cemento desarrolla resistencia a la compresión, ocurre una expansión. La expansión limitada puede ayudar al sello entre el cemento y el casing o formación; sin embargo, una expansión excesiva del cemento puede causar fractura del material e incluso daños al revestimiento<sup>2</sup>.

La presencia de  $C_3A$  en el cemento por encima del 8% hace que este no sea resistente a los sulfatos, incluyendo el sulfato de sodio y magnesio proveniente de salmueras naturales<sup>3</sup>.

**1.2.2. Cambios de volumen durante el asentamiento.** El volumen de “Bulk” es el volumen ocupado por un cierto peso de material seco incluyendo espacios vacíos entre las partículas sólidas. Mientras que el volumen absoluto es el ocupado por el mismo peso de material menos los espacios vacíos entre las partículas.

Cuando el cemento Portland reacciona con el agua, experimentan una disminución en el volumen neto. Es decir, disminuye el volumen absoluto. Esto ocurre porque la densidad absoluta de un material hidratado es mayor que los reactivos iniciales.

A pesar de la disminución en el volumen absoluto, las dimensiones externas del cemento fraguado, o el volumen de “Bulk”, se mantiene igual o incrementa levemente. Para conseguir esto, la porosidad interna del sistema incrementa.

A condiciones de fondo, una disminución en el volumen absoluto puede afectar la transmisión de la presión hidrostática de la formación y puede afectar la habilidad del cemento para prevenir la migración de fluido por el anular<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> Ibid. 40 pag.

<sup>3</sup> BEIRUTE, R. y TRAGESSER, A. “Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements under Actual well conditions” paper SPE 4091. August. 1973

<sup>4</sup> NELSON, Op. cit., 37 pag

**1.2.3. Efecto de la temperatura.** La temperatura es uno de los factores que más afectan la hidratación del cemento. A temperaturas bajas, la hidratación de los productos es la misma que la que ocurre en condiciones ambiente. Ciertos cambios ocurren en la microestructura y morfología de la fase C-S-H (Calcium Silicate Hydrate, por sus siglas en inglés) a altas temperaturas. El material se vuelve más fibroso. A temperaturas que exceden los 230 °F la fase C-S-H no es estable.

**1.2.4. Fraguado relámpago y fraguado falso.** Cuando el Clinker del cemento base (sin sulfatos de calcio) es mezclado con agua, el  $C_3S$  y el reacciona rápidamente, la temperatura aumenta y un endurecimiento irreversible ocurre seguido rápidamente de un Pseudo – fraguado. Este fenómeno es llamado un “fraguado relámpago”. La hidratación incontrolada del  $C_3S$  puede ser prevenida con la adición de sulfatos de calcio (usualmente yeso) durante la manufactura del yeso.

A temperaturas ambiente, la solubilidad del sulfato de calcio semi-hidratado es de aproximadamente dos veces la del yeso: por lo cual en la hidratación, la fase acuosa de la lechada se súper satura rápidamente con yeso. Para aliviar esta condición un supuesto yeso secundario es precipitado. Un marcado endurecimiento de la lechada, conocido como fraguado falso, es observado.

El fraguado falso es reversible solamente con una agitación vigorosa, sin embargo dicha agitación no puede ser realizada durante la mayoría de las operaciones de cementación, la adición de un dispersante puede ser suficiente para reducir el impacto reológico del fraguado falso.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Ibid., 38 pag

**1.2.5. Encogimiento del cemento.** El encogimiento químico del cemento o contracción química del cemento es un mecanismo básico durante la hidratación del cemento Portland. El volumen de los componentes hidratados como el agua y el cemento en polvo es mayor que el volumen de los productos hidratados. Este volumen contraído está referido a un encogimiento interno o un encogimiento químico total del cemento. El encogimiento químico puede ser medido por la colocación de la lechada de cemento en un yacimiento bajo libre acceso de agua. La cantidad de agua absorbida por el cemento durante la hidratación corresponde a la cantidad total de encogimiento químico. Estos experimentos frecuentemente guían a una subestimación del encogimiento total de cemento debido a la continua disminución de permeabilidad del cemento durante la hidratación, la cual dificulta el paso del agua a través del desarrollo de sistema de hidratos. El encogimiento químico total ha sido estimado en aproximadamente  $6.25 \text{ mL}/100\text{g}$  de cemento asumiendo un 100% de hidratación<sup>6</sup>.

### 1.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS LECHADAS DE CEMENTO

**1.3.1. Gravedad específica.** Denota el peso por unidad de volumen, sin tomar en consideración otros materiales, tales como el aire o el agua; es decir, el peso de los granos de cemento específicamente. El método más utilizado para poder medir con gran exactitud es el método frasco de Le Chatelier, utilizando un matraz que lleva el mismo nombre como se puede observar en la Figura 1 en el cual el volumen desplazado por la muestra seca es leído directamente en el cuello del aparato, que posee una graduación para este efecto.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> BAUMGARTE, C. et al.; "Case Studies of Expanding Cement to Prevent Microannular Formation" paper SPE 56535 presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and exhibition held in Houston, Texas, October 3-6

<sup>7</sup> (Michaux, Nelson, & Vidick)

Figura 1. Frasco de Le Chatelier 250 cc



Fuente: Materiales para Laboratorio, matraz de Le Chatelier [en línea], [http://www.materialesdelaboratorio.net/portfolio/matraz-le-chatelier-gravedad-especifica]

Para poder hallar la gravedad específica se desarrolla el siguiente procedimiento matemático:

- La humedad higroscópica ( $W_h$ ) es la fracción del agua absorbida directamente de la humedad del aire, se calcula mediante la expresión:

$$W_h = \left( \frac{W_{sf} - W_s}{W_s} \right) * 100\% \quad \text{Ec. ( 1)}$$

Dónde:

$W_{sf}$ , es igual al peso de la muestra seca y enfriada (grs).

$W_s$ , es igual al peso de la muestra seca en caliente (grs).

- Calcular la gravedad específica ( $G_s$ ) de la muestra:

$$G_s = \left( \frac{W_{sf}}{V_d} \right) * \left( \frac{1}{\gamma_w} \right) \quad \text{Ec. ( 2)}$$

Dónde:

$V_d$ , volumen desplazado y leído directamente en el matraz ( $\text{cm}^3$ ).

$\gamma_w$ , peso específico del agua a  $4^\circ\text{C}$  ( $\text{grs}/\text{cm}^3$ ).

**1.3.2. Peso volumétrico.** Denota el volumen por unidad de masa. Se toma en consideración el aire contenido entre los granos de cemento.

**1.3.3. Requerimiento de agua normal.** Es el agua necesaria para mezclar con cemento, solo debe dar 11 Bc a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en porcentaje por peso de cemento.

**1.3.4. Requerimiento de agua mínima.** Denota el agua mínima para mezclar con cemento, debe dar 30 Bc a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en porcentaje por peso de cemento.

**1.3.5. Densidad de la lechada.** Es el peso de la mezcla del cemento con agua y está en función de la relación de agua por emplear. Básicamente el procedimiento para medir la densidad de una lechada de cemento es el siguiente: primero la lechada se vierte dentro de la copa presurizada de la balanza que se observa en la figura 2 luego se atornilla la tapa. A continuación se acopla un embolo presurizado con lechada a la tapa de la balanza hasta colapsar las burbujas de aire presentes en la muestra de lechada que contiene la copa. La balanza se coloca en el punto de apoyo del soporte, seguidamente se ajusta el peso

deslizante hasta que se equilibren los dos extremos de la balanza y por último se toma el valor de densidad ya sea en  $(lb/gal)$  o  $(gr/cm^3)$ <sup>8</sup>.

Figura 2. Balanza de Lodos y cementos presurizada para medir densidad de la mezcla



Fuente: Test Apparatus, Balanza de Lodos [en línea], [http://www.testapparatus.com/ProductShow\_380.html]

**1.3.6. Rendimiento.** Es el volumen de lechada obtenido al mezclar un saco de cemento con la cantidad deseada de agua y otros aditivos. Matemáticamente se define como la sumatoria de del volumen de los materiales (Cemento + Aditivos) más el Volumen de agua requerido.<sup>9</sup>

$$\begin{aligned} & \text{Rendimiento Lechada} \left( \frac{pc}{saco} \right) \\ & = \text{Vol. Aditivos} + \text{Vol. Cemento} + \text{Vol. Agua Requerida} \end{aligned} \quad \text{Ec. ( 3)}$$

**1.3.7. Tiempo de espesamiento.** De acuerdo a la norma API es el tiempo para alcanzar 100BC. Cuando el cemento alcanza esta consistencia no puede ser

<sup>8</sup> NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

<sup>9</sup> CPVEN, Seminario de cementación de pozos petroleros. Maracaibo (Venezuela). Octubre 2008.

desplazado en una tubería con presiones razonables de bombeo. Aunque el cemento adopta un estado no bombeable, no debe confundirse con el fraguado del cemento, el cual ocurre mucho tiempo después, al alcanzar entre 15-20 psi de resistencia. Generalmente para la medición de consistencia se utiliza un consistómetro atmosférico mostrado en figura 3.

Figura 3. Consistómetro Atmosférico

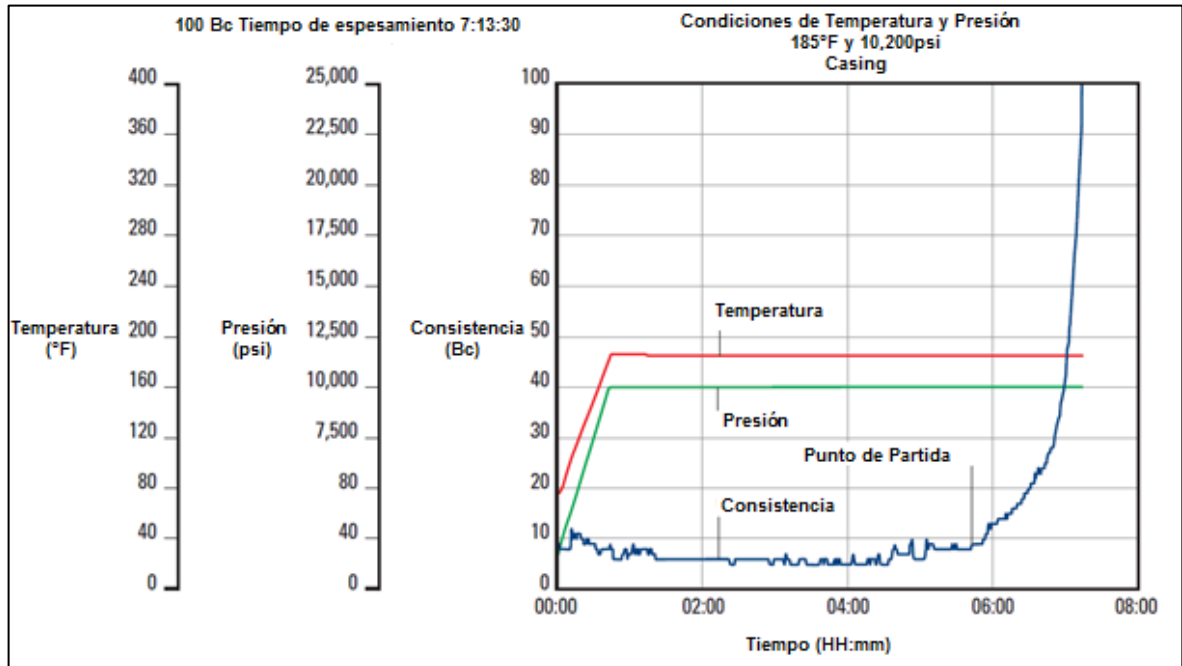


Fuente: Chadle Engineering- Atmospheric Consistometer [En línea],[ [citado 10 de diciembre de 2015] <http://www.chandlerengineering.com>]

La figura 4 muestra el desarrollo de una prueba típica de tiempo de espesamiento. Los perfiles de tiempo de espesamiento frecuentemente inician con un valle mostrando un periodo de baja consistencia que perdura por pocas horas. Seguidamente como la lechada inicia a colocarse en el pozo al mismo tiempo y proporcionalmente incrementa el valor de consistencia con una pendiente

pronunciada hasta alcanzar el valor de 100 Bc. El punto en cual inicia el incremento de consistencia se llama “punto de partida”.<sup>10</sup>

Figura 4. Típica gráfica de espesamiento



Fuente: Modificada de MICHAUX, M. NELSON, E. VIDICK, B and SAINT, F. Well Completion. Cement Chemistry and Additives. Oilfield Review. [En línea] <[http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors89/apr89/2\\_cement.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors89/apr89/2_cement.pdf)>

En la practica el tiempo de espesamiento se traslada a tiempo de bombeo, y es el tiempo que dispone el operador para colocar el cemento en sitio en el pozo. Para efectos operacionales el tiempo de espesamiento se determina en función de la operación más un tiempo de seguridad que tiene en cuenta cualquier imprevisto que se presente durante el bombeo.<sup>11</sup>

<sup>10</sup> NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

<sup>11</sup> CARTER, L.; WAGGONER, H. and GEORGE, C. Expanding Cements for Primary Cementing. Paper SPE 1235 presented at the 1965 SPE Annual Fall Meeting held in Denver, October 3-6.

**1.3.8. Agua de mezcla.** El agua de mezcla es la cantidad de agua, expresada en galones por saco de mezcla de cemento seco, antes de la adición de los aditivos líquidos y puede ser tanto agua dulce como agua salada. La cantidad de agua de mezcla usada para hacer una lechada de cemento puede observarse en la tabla 2. Estas cantidades se hallan teniendo en cuenta las siguientes necesidades principales:

- Tener una lechada que sea fácilmente bombeable.
- Hidratar todo el cemento con el fin de obtener una lechada de alta calidad y dureza después del fraguado.

Tabla 2. Relación de Agua de Mezcla con Tipo de Cemento, Profundidad y Temperatura Estática.

Clase de Cemento		Agua de Mezcla		Densidad de la lechada	Profundidad Recomendada	Temperatura Estática	
API	ASTM	Gal/s x	%H <sub>2</sub> O/ peso sx	(Lbs/gal )	Pies	°F	°C
<b>A</b>	Tipo I	5.2	46	15.6	0-600	170	77
<b>B</b>	Tipo II	5.2	46	15.6	0-600	170	77
<b>C</b>	Tipo III	6.3	56	14.8	0-600	170	77
<b>D</b>	Tipo IV	4.3	38	16.4	6,000-10,000	230	110
<b>E</b>	Tipo V	4.3	38	16.4	10,000-14,000	290	143
<b>F</b>	Tipo VI	4.3	38	16.4	10,000-16,000	320	160
<b>G</b>	Tipo VII	5.0	44	15.8	0-10,000	200	90
<b>H</b>	Tipo VIII	4.3	38	16.4	0-10,000	200	90

Fuente: NELSON, E.; BELL, D.; Schlumberger: Well cementing. San Etienne, France.

**1.3.9. Fluido de mezcla.** El fluido de mezcla es la cantidad total de aditivos líquidos más el agua de mezcla.

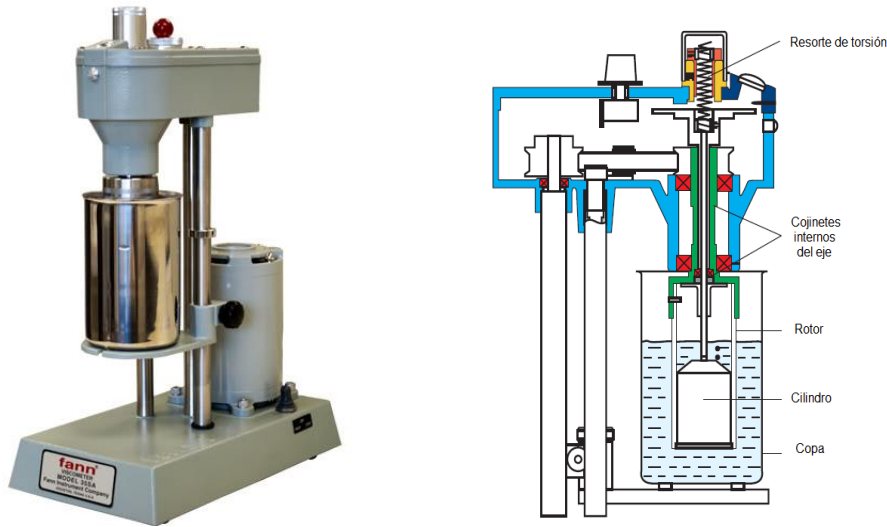
**1.3.10. Reología.** La reología define las propiedades de flujo de la lechada. Estas características se controlan con el fin de facilitar la mezcla, bombeabilidad y obtener las características deseadas del caudal del fluido. Los viscosímetros rotacionales de cilindro coaxial como se muestran en la figura 5 son los más utilizados para realizar mediciones reológicas a las lechadas de cemento. Inmediatamente después de mezclar la lechada, se vierte dentro del contenedor a condiciones de presión atmosférica o a una presión determinada según sea el caso. La temperatura del contenedor debe ser inicialmente la del ambiente para permitir el choque térmico de los aditivos sensibles a la temperatura. La lechada es calentada a la temperatura de prueba y agitada por 20min. Si se llevó a cabo un acondicionamiento de temperatura y presión previo, entonces debe ser refrigerada tan rápido como sea posible hasta 190°F antes de abrir el contenedor.

Después, la lechada es vertida inmediatamente dentro de la copa del viscosímetro pre-calentada hasta que el líquido alcance la línea de referencia. Con la manga rotatoria a la mínima velocidad, la copa es elevada hasta que el líquido alcance la línea inscrita en la manga. Esta operación minimiza la gelificación de la lechada y asegura una distribución uniforme de la mezcla. Después de que la temperatura de la lechada es conocida, se marca y se realizan repeticiones a diferentes velocidades.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> NELSON. Op cit.

Figura 5. Viscosímetro de Fann, real y en sección transversal.



Fuente: NELSON, E.; and GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

**1.3.11. Viscosidad plástica.** Pendiente de la línea de esfuerzo de corte / velocidad de corte por encima del punto de cedencia, además de dar un estimado de que tantos solidos contiene la lechada<sup>13</sup>.

**1.3.12. Punto de cedencia.** Mide la resistencia del fluido a fluir. En la medida en que la lechada contenga más sólidos, mayor será la viscosidad plástica. Cuando mejor sea la dispersión entre las partículas hidratadas de cemento, menor será el punto de cedencia.

**1.3.13. Resistencia a la compresión.** El esfuerzo de resistencia es la capacidad del cemento a oponerse a ser triturado (Resistencia a la Compresión (RC)) o desprendido (Esfuerzo de Tensión). Existe una relación experimental la cual concluye que se puede considerar el esfuerzo de tensión como un valor aproximado de 5% a 10% del esfuerzo de compresión.

---

<sup>13</sup> Universidad CEDIP. "Ingeniería de Cementaciones" [En línea] [citado 10 de diciembre de 2015] disponible en: . <<http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf>>

La mayoría de las autoridades en el tema concuerdan en que con 500psi de RC, es suficiente para continuar las operaciones de perforación, sostener el revestimiento, evitar a entrada de fluidos al anular y mantener confinados los fluidos de formación.

Generalmente las pruebas destructivas para medir la RC se someten cubos de 2 plg<sup>2</sup> de área a fraguar bajo presión ambiente o hasta 3,000psi (se determinó esta presión como máxima de forma experimental, ya que presiones >3,000psi no influyen significativamente en el desarrollo de la resistencia) y a Temperatura estática de Fondo. Luego por medio de una prensa se somete a esfuerzos compresivos hasta romper la muestra tal como se observa en la figura 6 Esta medición es puntual.<sup>14</sup>

Figura 6. Prueba destructiva de Resistencia a la Compresión



Fuente: THOMAS. J.et al; Expanding Cements for Improved Wellbore Sealing: Prestress Development Physical Properties, and Logging Response. SPE 170306. 2014.

---

<sup>14</sup> THOMAS. J.; MUSSO. S.; CHOUGNET. A.; ALLOUCHE. M.; Expanding Cements for Improved Wellbore Sealing: Prestress Development Physical Properties, and Logging Response. SPE 170306 presented at the 2014 SPE Deepwater Drilling and Completions Conference held in Galveston, Texas, September 10-11.

También existen las pruebas no destructivas, como es el caso del UCA (Ultrasonic Cement Analyzer) Figura 7 el cual se basa en una correlación entre la velocidad de un pulso ultrasónico que viaja a través de la muestra de cemento y su esfuerzo compresivo. Los resultados de esfuerzos son determinados por una medición del cambio en la velocidad de una señal ultrasónica transmitida a través de la muestra de cemento al mismo tiempo que ésta se fragua a temperatura y presión de fondo de pozo.

Figura 7. Ultrasonic Cement Analyzer UCA

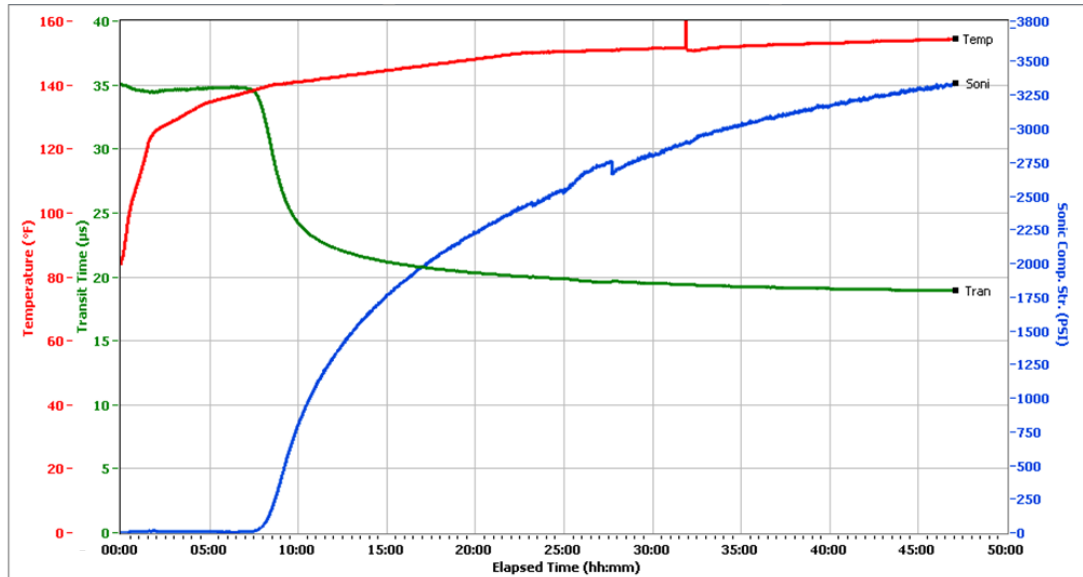


Fuente: Equipos de Laboratorio Fann, UCA 304A, [En Linea] [<http://www.fann.com/fann/products/oil-well-cement-testing/ultrasonic-testing/ipro-uca.page>]

Se puede observar en la figura 8 el resultado de la prueba del UCA donde se relacionan las variables mencionadas anteriormente como son temperatura, tiempo de transito de la señal ultrasónica y esfuerzo compresivo desarrollado a lo largo del tiempo de prueba, que para este caso es 24 Horas, se observa puntual y gráficamente la evolución del esfuerzo a la compresión cada ocho horas.

Figura 8. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva.

Events	Results
50.00 PSI	07h:59m
500.00 PSI	09h:14m
1000.00 PSI	10h:39m
2000.00 PSI	17h:16m
08h:00m	51.67
12h:00m	1304.56
16h:00m	1868.41
24h:00m	2480.80



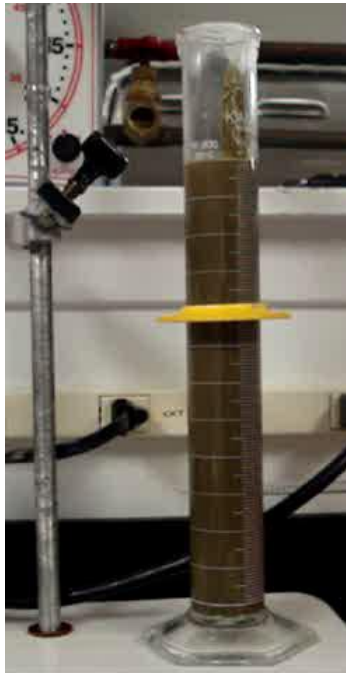
Fuente: Diseño de liner de producción pozo tipo. Propiedad de Ecopetrol

Para fines prácticos estas pruebas se realizan hasta 48 horas, donde ya el cemento ha alcanzado aproximadamente su máximo valor de resistencia a la compresión, a partir de este momento el aumento de esta propiedad es muy bajo. A nivel de campo se considera que esta prueba se realice hasta las 24 horas, en donde los cementos que usualmente se utilizan, ya han pasado su punto de máxima pendiente de crecimiento y ha comenzado su etapa de desarrollo lento. Algo importante que cabe resaltar es que los altos valores de resistencia a la compresión no necesariamente son los ideales, ya que en la última década se ha

demostrado que los cementos elásticos con menos resistencia a la compresión son más efectivos para mantener un buen aislamiento zonal a lo largo de tiempo.<sup>15</sup>

**1.3.14. Agua libre.** Cuando una lechada se deja reposar por periodo de tiempo después de ser colocada en el pozo, una cantidad de agua puede separarse de la lechada, migrando hacia arriba y acumulándose en el tope de la columna de cemento. Esta separación puede deteriorar el aislamiento zonal, generalmente en las partes de alta desviación del pozo. Las mediciones de agua libre se pueden llevar a cabo en el laboratorio, usando un cilindro graduado de  $250\text{ cm}^3$  mostrado en la figura 9 que simula el pozo.

Figura 9. Muestra sometida a prueba de Agua Libre



Fuente: Manual de operaciones de cementación. Talisman Energy. 2013

El procedimiento permite acondicionar la lechada a temperaturas y presiones elevadas. No se contempla la pérdida de fluidos. La duración de la prueba es de 2

---

<sup>15</sup> CPVEN. Op cit.

horas, medidas desde el momento en que se vierte la mezcla en el cilindro. Para temperaturas menores que 176 ° F, el tubo graduado es colocado en una cámara de pre-calentado. Para altas temperaturas, el tubo graduado es puesto en un pre-calentador lleno de aceite el cual eleva la presión lo suficiente para evitar el burbujeo. Para simular la desviación de los pozos, la mayoría de los operadores orienta el tubo con la muestra a un ángulo similar al del pozo.

El valor máximo de agua libre permitido por API es de 1.4% en una columna de 250  $cm^3$  de cemento. Pero en casos de pozos verticales o cementaciones de zonas presurizadas, el valor debe ser de cero en pruebas realizadas a temperatura circulante de fondo. Se puede aplicar la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de fluido libre.<sup>16</sup>

$$\% \text{ Fluido Libre} = \left( \frac{\text{Volumen de Fluido Libre}}{250 \text{ cc de lechada}} \right) * 100\% \quad \text{Ec. ( 4)}$$

**1.3.15. Temperatura Estática de fondo.** La temperatura estática de fondo (BHST. Bottom Hole Static Temperature), es la temperatura de la formación no perturbada en la profundidad final de un pozo. La formación se enfría durante la perforación y la mayor parte del enfriamiento se disipa después de 24 horas de condiciones estáticas, si bien teóricamente es imposible que la temperatura vuelva a las condiciones no perturbadas, esta temperatura se mide bajo condiciones estáticas después de haber transcurrido un tiempo suficiente para negar cualquier efecto de los fluidos en circulación. Para predecir la BHST se utilizan tablas, diagramas y rutinas de computación, como funciones de la profundidad, el área geográfica y varias funciones de tiempo. Generalmente, la BHST es más alta que la temperatura de circulación de fondo de pozo y puede ser un factor importante a la

---

<sup>16</sup> (Nelson & Guillot, Well Cementing, 2006).

hora de utilizar herramientas o tratamientos sensibles a la temperatura.<sup>17</sup> La forma más acertada de obtener un dato real de la BHST es por medio de registros eléctricos, sin embargo se puede determinar un valor muy cercano hallando el gradiente de temperatura por medio de la siguiente ecuación provista por la norma API:

$$\text{Gradiente de BHST } (^{\circ}\text{F}/100\text{pies}) = \left( \frac{\text{maxBHST} - 80\text{F}}{\text{TVD}/100\text{pies}} \right) \quad \text{Ec. ( 5)}$$

- La (*maxBHST*) es leída de las tablas de la norma API y aplica para profundidades >1,000 pies<sup>18</sup>.

**1.3.16. Temperatura de circulación en fondo.** Es la temperatura del fluido de circulación (BHCT- Bottom Hole Circulation Temperature) (aire, lodo, cemento o agua) registrada en el fondo del pozo después de varias horas de circulación. Esta temperatura es más baja que la temperatura estática de fondo de pozo. Por consiguiente, en ambientes extremadamente rigurosos, un componente o un fluido que no sea adecuado bajo condiciones estáticas de fondo de pozo pueden ser utilizados con gran cuidado en las condiciones de circulación. De un modo similar, un pozo de alta temperatura puede ser enfriado en un intento para permitir el funcionamiento de las herramientas de registro. La BHCT también es importante en el diseño de las operaciones de cementación de tubería de revestimiento porque el tiempo de fraguado del cemento depende de la temperatura. La BHCT y la temperatura estática de fondo de pozo (BHST) son parámetros importantes a la hora de colocar volúmenes grandes de fluidos de tratamiento en fondo de pozo,

---

<sup>17</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield vocabulary [en Línea] [citado 10 de diciembre de 2015] disponible en: [<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bhst.aspx>]

<sup>18</sup> CPVEN. Op cit

sensibles a la temperatura. 19 A partir de la siguiente expresión matemática se puede calcular un valor aproximado de la BHCT:

$$BHCT = 80 + \left( \frac{(0.00606 * TVD * GradBHST) - 10.0915}{1.0 - (0.1505 \times 10^{-4} * TVD)} \right) \quad \text{Ec. ( 6)}$$

- Al igual que la BHST la expresión matemática para el cálculo de la BHCT solo aplica para profundidades > 1,000pies<sup>20</sup>.

## 1.4. ADITIVOS

En la actualidad se han desarrollado una gran variedad de aditivos para la cementación de pozos petroleros, así mismo dichos aditivos cuentan con generosos rangos de operación de variables críticas como lo son la temperatura (en el caso de las bajas temperaturas que se experimentan en las zonas de permafrost en Alaska o en temperaturas tan altas como las que se experimentan en pozos en los que se esté implementando Combustión In situ), también rangos de presión (que van desde la presión atmosférica hasta 30.000 psi la cual es característicos de pozos ultra profundos). Además se han desarrollado más de 50 aditivos que se adaptan a situaciones específicas de cada pozo, lo cual me permite contar con una versatilidad de aplicación de estos productos y un rendimiento óptimo<sup>21</sup>.

**1.4.1. Aceleradores.** Son aditivos químicos mezclados con la lechada de cemento y tienen como objetivo reducir el tiempo requerido para que el cemento fraguado

---

<sup>19</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield vocabulary [en Línea] [citado 10 de diciembre de 2015] Disponible en: [<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bhct.aspx>].

<sup>20</sup> CPVEN. Op cit.

<sup>21</sup> SMITH, D. K.Cementing. Society of Petroleum Engineers. Second Edition. United State of America. Society of Petroleum Engineers Inc. 1990. Pag 18.

desarrolle suficiente resistencia a la compresión para permitir que continúen las operaciones de perforación. Los aceleradores se utilizan generalmente en aplicaciones superficiales en las que la temperatura es relativamente baja.

**1.4.2. Extendedores.** Un aditivo químico o material inerte utilizado para reducir la densidad o incrementar el rendimiento de una lechada de cemento. El incremento del rendimiento reduce el costo por volumen de la lechada de cemento, en tanto que la reducción de la densidad de la lechada reduce la presión hidrostática de la columna de cemento, lo que permite cementar y aislar con éxito las zonas débiles. Además, la reducción de densidad promueve la disminución de la resistencia a la compresión inmediata, por lo que se recomienda para efectos de prácticas de operación en campo, no exceder la concentración para que no llegue a dar un resultado de resistencia a la compresión inferior a  $35 \frac{kg}{cm^2}$ .

**1.4.3. Densificantes.** A las condiciones de altas presiones frecuentemente presentes en las grandes profundidades de los pozos, se requieren altas densidades. Para incrementar la densidad en una lechada de cemento, los aditivos deben (1) tener una gravedad específica en un rango de 4,5 a 5,0, (2) tener un requerimiento bajo de agua, (3) que no se reduzcan pronunciadamente los esfuerzos en el cemento y no interfiera con los registros de pozo, entre otros.

**1.4.4. Retardadores.** Un agente químico utilizado para incrementar el tiempo de fragüe de las lechadas de cemento para permitir el emplazamiento correcto. La necesidad de disminuir el tiempo de fraguado del cemento se incrementa con la profundidad debido al mayor tiempo requerido para ejecutar toda la operación de cementación y el efecto del incremento de la temperatura sobre el proceso de fraguado del cemento.

En ocasiones los retardadores no son completamente compatibles con los aditivos comerciales utilizados por las compañías de servicios, para esto se debe realizar

pruebas de compatibilidad anterior a la aplicación en el pozo, además cementos con alto contenido de agua requieren que se añada más cantidad de aditivo para lograr un tiempo de fraguado óptimo.

**1.4.5. Agentes de pérdida de circulación.** Las pérdidas de circulación se definen como la desviación de la ruta normal de los fluidos de perforación o completamiento a través de fracturas inducidas. Esto no debe ser confundido con la disminución del volumen resultado del filtrado, o del volumen requerido para llenar un nuevo hueco.

La pérdida de circulación se puede manejar de dos formas, una es reducir la densidad de la lechada y la otra es puentear o llenar con material de taponamiento dichas fracturas. En algunos casos se agrega nitrógeno al sistema de lodos para generar un aumento del volumen y poder limitar la circulación a través de los conductos de la fracturas.

**1.4.6. Agentes de control de filtrado.** Esta clase de aditivos son usados generalmente para prevenirla deshidratación de las lechadas de cemento y evitar un fraguado prematuro. En la mayoría de los casos los reductores de filtrado son productos derivados de Celulosa. El valor del filtrado estipulado por las normas API varía de acuerdo con el tipo de operación a realizar:

- ✓ Cementación de tubería de revestimiento: No mayor a  $200\text{cm}^3$
- ✓ Cementación de Liners: No mayor a  $50\text{cm}^3$
- ✓ Cementación Forzada: De 30 a  $50\text{cm}^3$

**1.4.7. Dispersantes.** El objetivo principal de los aditivos Dispersantes es el de reducir la viscosidad y dar propiedades de flujo al cemento, adicionalmente ayudan a obtener regímenes turbulentos con bajas tasas de bombeo y bajas

presiones, así reduciendo la fricción entre los granos y las paredes del hueco y directamente reduciendo la pérdida de circulación y posterior deshidratación.

## 1.5. MEDICIÓN DE EXPANSIÓN Y ENCOGIMIENTO DE LECHADAS DE CEMENTOS

Los métodos recomendados por la literatura son:

**1.5.1. La prueba molde de anillo.** La prueba de molde de anillo mide la expansión lineal bajo condiciones de libre acceso de agua, es decir, un sistema abierto. En esta prueba, un anillo expansible es ubicado en el tope de un piso de placa metálica, con otro plato encima sostenido por un tornillo. La división en el anillo es usualmente soportado por un ligero resorte de presión<sup>22</sup>.

Una vez el molde es ensamblado y la lechada de cemento vertido en el molde a través de un agujero pequeño en el tope del plato, el aire es removido. El molde con el cemento es puesto en una autoclave para permitir el asentamiento del cemento inicial. El cambio en el diámetro del anillo está determinado por la medición de la distancia entre los dos broches de metal montados en la parte exterior del molde con un micrómetro.

Las mediciones tomadas antes y después del fraguado deben ser tomadas a la misma temperatura. La expansión o encogimiento es calculado de la siguiente forma:

$$\Delta V = 0,358 (L_f - L_i), \quad \text{Ec. ( 7)}$$

Donde:

---

<sup>22</sup> GOBONCAN, V. and DILLENBECK, r.; "Real-Time Cement Expansion/Shrinkage Testing Under Downhole Conditions For Enhanced Annular Isolation" paper SPE/IADC 79911 presented at the 2003 SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, The Netherlands, February 19-21.

$L_i$  = Medición de la distancia inicial entre los broches (mm)

$L_f$  = Medición de la distancia final entre los broches (mm)

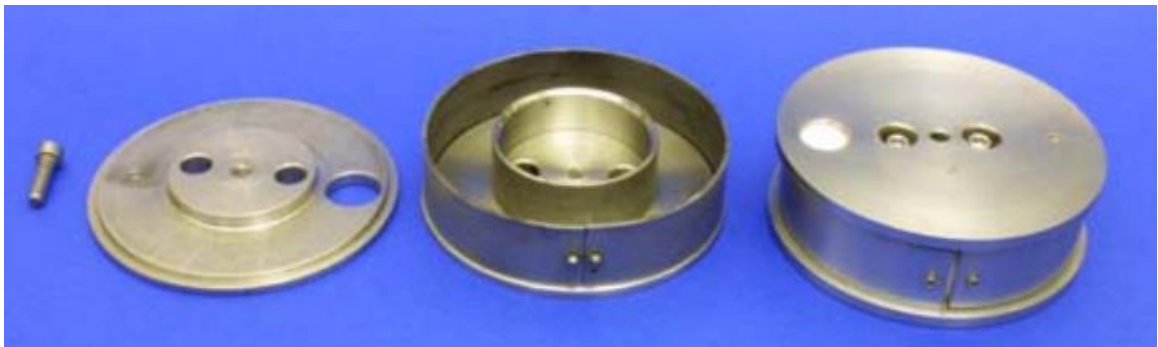
$\Delta V$  = Cambio de dimensiones de la muestra de cemento (%)

O también puede ser calculada con Ec. (8), si la medición se encuentra en pulgadas.

$$\Delta V = 9,095 (L_f - L_i), \quad \text{Ec. (8)}$$

Este método puede ser empleado para temperaturas de 88°C (190°F) y bajo presión si es necesario; esto mide solo el porcentaje lineal de encogimiento y/o expansión mientras el cemento es expuesto al agua<sup>23</sup>.

Figura 10. Prueba Split-ring



Fuente: GOBONCAN, V. and DILLENBECK, r.; “Real-Time Cement Expansion/Shrinkage Testing Under Downhole Conditions For Enhanced Annular Isolation” paper SPE/IADC 79911

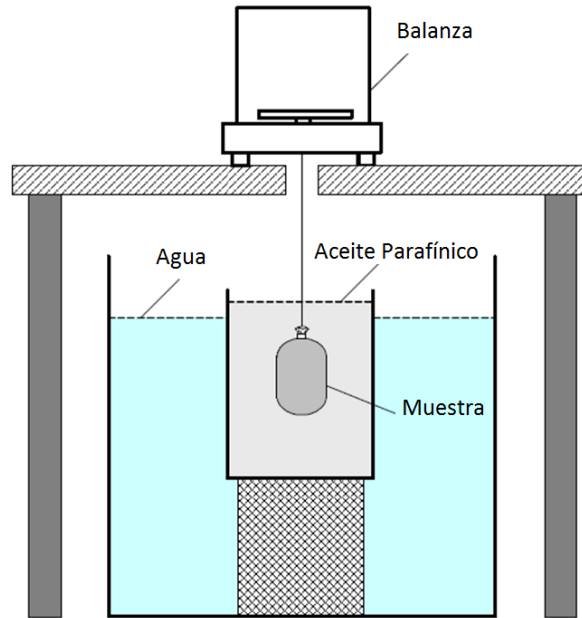
**1.5.2. La prueba de membrana.** Mide la expansión o encogimiento cuando el cemento es “incapaz de empaparse de agua o gas” (condición impermeable). La

---

<sup>23</sup> REDDY, B. et al; “Cement-Shrinkage Measurement in Oilwell Cementing – A Comparative Study of Laboratory Methods and Procedures” paper SPE 103610 presented at the 2007 Mountain Oil & Gas Technology Symposium held in Denver, April 16-18

prueba de membrana mide los cambios de peso de las lechadas de cemento ubicadas en un balón y puestas sobre agua por el método de flotabilidad.<sup>24</sup>

Figura 11. Esquema de la prueba de membrana



Fuente: SANT, G. et al; “Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of testing Protocols and Interpretation of Results” 2005

Para la medición exacta del cambio de volumen durante la expansión de la lechada de cemento se tiene el siguiente procedimiento matemático:

$$V_{expansion}(\%) = 100 * \left( \frac{V_{final} - V_{inicial}}{V_{inicial}} \right) \quad \text{Ec. ( 9)}$$

**Donde:**

$V_{inicial}$ , es el volumen inicial, expresado en mililitros, de la lechada de cemento.

---

<sup>24</sup> REDDY, B. Op. cit., 1 pag.

$V_{final}$ , es el volumen final, expresado en mililitros, de la lechada de cemento.

$$V_i = m_a - m_{im} \quad \text{Ec. ( 10)}$$

**Donde:**

$m_a$ , es la masa del aire, expresada en gramos, que contiene la membrana donde va a

estar confinada la lechada de cemento.

$m_{im}$ , es la masa inicial medida de la membrana que contiene la lechada de cemento, expresa en gramos.

$$V_f = m_a - m_{fm} \quad \text{Ec. ( 11)}$$

**Donde:**

$m_{fm}$ , es la masa final medida en gramos de la membrana que contiene la lechada de cemento.

El periodo de tiempo transcurre desde que se somete la muestra a curar en el consistómetro atmosférico, hasta el tiempo final de medición al final del curado de la muestra.

**1.5.3. La prueba manga-cilíndrica.** La manga cilíndrica fue inventada por Spangle (1983). Emplea una manga cilíndrica que está abierta en el tope y fondo por una abertura vertical. La abertura vertical se mantiene cerrada por tres muelles atados con patas en la parte exterior. La expansión es medida por los cambios de espaciamento entre los tres broches. (Reddy, Xu, Ravi, Gray, & Pattillo, 2009).

En este método, la expansión o encogimiento es calculado de la siguiente forma:

$$\Delta V = \left[ \frac{r_{i+L}}{r_i} \left( \frac{L_2}{L_1} - 1 \right) \right], \quad \text{Ec. ( 12)}$$

Donde:

$L_1$  = Distancia promedio entre los broches cuando la manga está vacía.

$L_2$  = Distancia promedio entre los broches cuando la manga esta expandida.

$r_i$  = Radio interno de la manda

$r_{i+L}$  = Radio interno de la manda más la longitud del pin.

Figura 12. Manga cilíndrica para mediciones de expansión del cemento

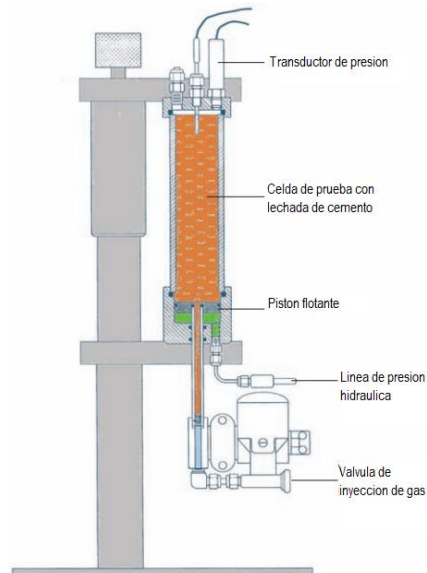


Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

**1.5.4. El Cha.** Opera bajo presión (286 psi) y mide el encogimiento total bajo condiciones de permeabilidad de gas y agua. El equipo CHA también está previsto por un pistón en el fondo para aplicar fuerza al sistema de cemento mientras se fragua. Usando una combinación de volumen de gas el movimiento del pistón,

ambos el encogimiento total y la masa encogida pueden ser potencialmente medidos simultáneamente bajo las condiciones de fondo.<sup>25</sup> .

Figura 13. Diagrama de aparato CHA



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

**1.5.5. Método del frasco.** La mayoría de la literatura se ha centrado en la medición del encogimiento del cemento durante el curado del cemento en un ambiente rico en agua. El primer método desarrollado en 1900 por Le Chatelier, es aun usado hoy, mide la captación de agua por el posicionamiento del curado de la lechada de cemento en un frasco tan delgado como una capa y cubierta por agua.<sup>26</sup>

Además de medir la gravedad específica de la lechada el método del frasco de Le Chatelier también sirve para medir los efectos de los agentes expansivos bajo condiciones de confinamiento, se utiliza una celda mostrada en la figura 14 donde

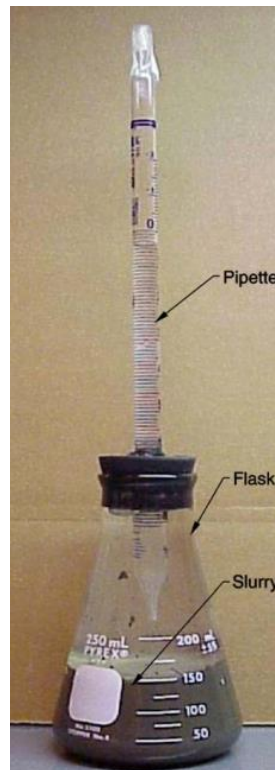
---

<sup>25</sup> REDDY, Op. cit., 1 pag.

<sup>26</sup> REDDY. Op. cit., 1 pag.

se ingresa la muestra dentro de un contenedor cilíndrico de acero que tiene unas dimensiones de diámetro interno 28.6 mm y un diámetro externo de 76.2mm. La celda está diseñada para confinamiento axial desde arriba previsto por un pistón que desliza un cilindro de acero y una máquina de prueba mecánica programable conectado a una maquina con una celda.

Figura 14. Flask Pipette set up



Fuente: RAVI, K. et al.; “Procedures to Optimize Cement Systems for Specific Well Conditions” paper AADE-06-DF-HO-35. 2006

**1.5.6. Prueba de expansión ASTM C-151-00.** Uno de los más viejos, pero aun comúnmente usados es la prueba de expansión ASTM C-151-00. En esta prueba, un molde de 1 x 1 x 11 ¼ pulgada es usado para envasar una muestra de cemento, típicamente bajo condiciones ambiente de laboratorio. Sobre asentamiento inicial, la muestra es removida del molde, entonces la longitud de la muestra es medida con precisión (normalmente +/- 0.001 pulgadas). Este valor es

tomado como el punto cero o punto de partida. Después de tomar la longitud del punto inicial, la muestra puede ser sujeta a varias condiciones de temperatura, humedad y a veces presión por un periodo de tiempo deseado.

Figura 15. Prueba de expansión ASTM C-151-00



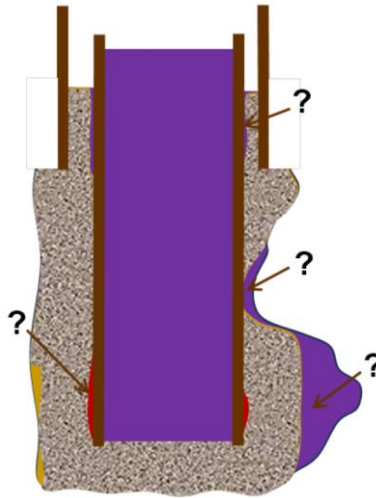
Fuente: GOBONCAN, V. and DILLENBECK, R.; “Real-Time Cement Expansion/Shrinkage Testing Under Downhole Conditions for Enhanced Annular Isolation” paper SPE/AODC 79911. 2003

## **1.6. EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE CEMENTACIÓN**

La evaluación del trabajo de cementación es el proceso para determinar si los objetivos específicos para cada sección del pozo se han alcanzado, ya sea un revestidor conductor, intermedio o liner de producción, tienen en común la función de garantizar un aislamiento zonal durable. La calidad del cemento se ve afectada por múltiples factores, como la remoción del lodo de perforación, la geométrica del pozo, la buena centralización de la tubería, etc. Una vez el cemento es asentado en el pozo y fraguado es necesario realizar pruebas o registros que permitan

calcular el índice de adherencia del cemento, resistencia a la compresión y demás factores que permitan establecer la calidad del trabajo.

Figura 16. Evaluación del trabajo de cementación



Fuente: Cement and Pipe integrity Theory. Property of Schlumberger.

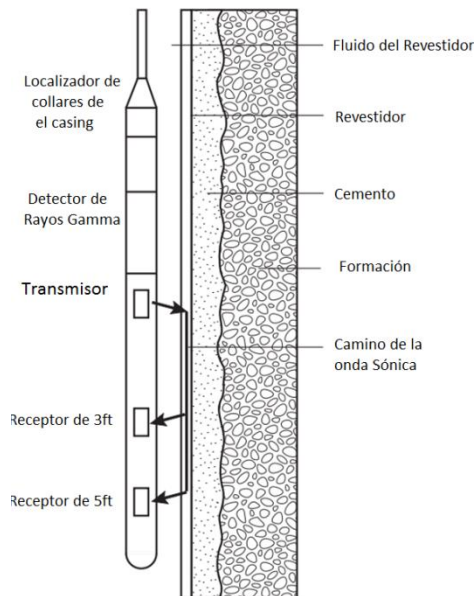
Existen diferentes técnicas disponibles para evaluar la calidad del cemento:

- Los diagnósticos de desempeño del cemento: Estima las pérdidas de cemento, la cobertura del cemento y el riesgo de canalización por medio del análisis de presiones y caudales bombeados durante el trabajo de cementación.
- Registros de temperatura: Evalúan el enfriamiento detrás de la tubería con el fin de estimar el tope del cemento.
- Registros radioactivos: Monitorean la mezcla de material radioactivo en el cemento seguido de su migración por el anular.
- Prueba de presión: Permite confirmar el aislamiento en el zapato del casing.
- Registros acústicos: Los registros sónicos y ultrasónicos determinan la adherencia del cemento a la tubería, la solidez y la distribución del cemento en el anular.

Existen diferentes tipos de herramienta disponibles en la industria, las cuales se pueden dividir en dos categorías dependiendo de la frecuencia de la onda que es usada: sónico o ultrasónico, de las cuales se explicaran el funcionamiento e interpretación.

**1.6.1. CBL (Cement Bond Log).** La figura 17 muestra un esquema de una herramienta para registro CBL. La herramienta tiene un transmisor acústico, el cual generalmente se encuentra a 3 ft y 5 ft de los dos receptores. El transmisor emite señales acústicas pequeñas de forma repetitiva, cada señal tiene una duración de 50  $\mu$ s y velocidad de repetición es entre 10 y 60 Hz, dependiendo del diseño particular de la herramienta. Al tiempo que el transmisor emite, los receptores reciben la señal, el cual crea una onda esférica que se expande hacia todas las direcciones de la herramienta.

Figura 17. Configuración de la herramienta CBL-VDL

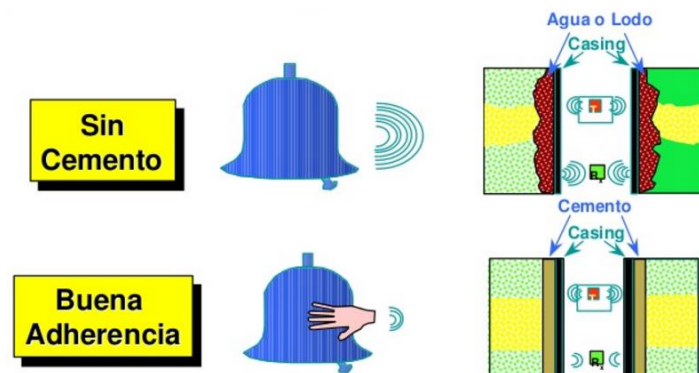


Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

La onda del Casing es una porción de la onda acústica original que se propaga directamente hacia la parte posterior de la pared del casing. Esta pierde energía por el anular y el hueco mientras se propaga, debido a esfuerzos de cizalla con los materiales adyacentes. Entre mayor sea la fuerza de cizalla, mayor es la pérdida de energía en los materiales adyacentes. La pérdida hacia la formación es baja y constante, luego, la pérdida hacia el anular es variable. La magnitud de la pérdida está representada por la amplitud y la atenuación que aparece en el registro. Si hay fluido en el anular, habrá una pequeña atenuación en la señal del casing. De hecho, se espera que todos los fluidos se vean parecidos porque no tienen esfuerzo de cizalla. Esta es también la razón por la cual incluso un espacio microscópico de unas pocas milésimas de pulgada entre la tubería y el cemento, conocido como micro-anillo, tiene un fuerte efecto en la señal del registro.<sup>27</sup>

Es decir, las mediciones del registro CBL son similares al principio del sonido de una campana, cuando hay fluido detrás del casing (sin cemento), la tubería es libre para vibrar y así un alto sonido es producido. Pero cuando el casing tiene cemento adherido, las vibraciones del casing se atenúan proporcionalmente a la superficie adherida Figura 18.

Figura 18. Fundamentos sónicos – CBL

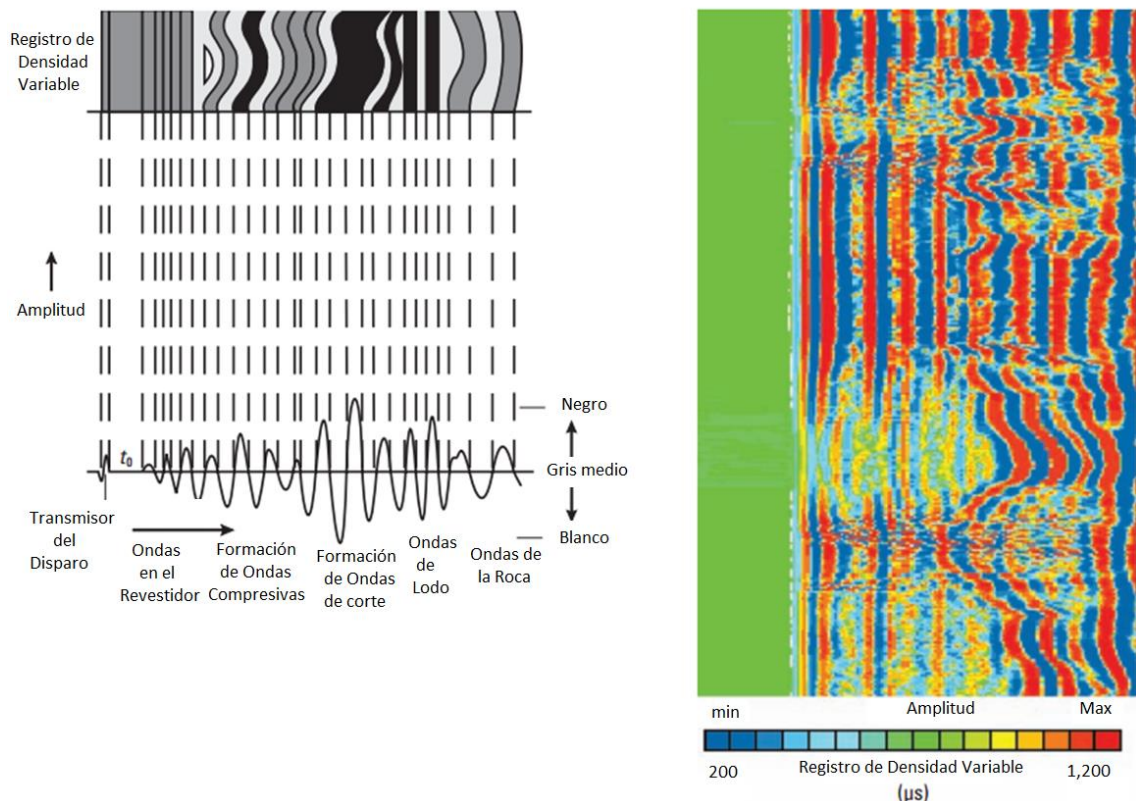


<sup>27</sup> NELSON. Op. cit., 562 pag.

Fuente: Evaluación de cementaciones con registros sónicos. SlideShare. [En línea] [citado 10 de diciembre de 2015] disponible en: <<http://es.slideshare.net/AgustnPiccione/16-evaluacin-de-las-cementaciones>>

**1.6.2. VDL (Variable Density Log).** El registro de densidad variable es la presentación completa de la onda registrada en el receptor de 5ft, las amplitudes de las ondas son convertidas a una escala de gris o escala de color, el contraste depende de si la amplitud es positiva o negativa. La figura 19 muestra como la información de amplitud es transformado en información de intensidad.

Figura 19. Representación de una señal completa de forma de onda de una herramienta CBL



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

Una amplitud de cero es representada como gris. Amplitudes positivas se vuelven negras proporcionalmente al aumento. Amplitudes negativas se vuelven blancas proporcionalmente a la disminución. La escala a color usa un espectro. La mínima amplitud es representada como azul oscuro, mientras que la máxima amplitud es roja, y una amplitud de cero es verde. Este registro es continuo con la profundidad y fácil de leer, sin embargo, la resolución depende del rango dinámico de las señales que recibe.<sup>28</sup>

**1.6.3. Índice de Adherencia.** El índice de adherencia es linealmente relacionado al porcentaje de la superficie de la superficie del casing adherido al cemento. Es calculado mediante la ecuación:

$$BI = \frac{\log[E_{Medida}] - \log[E_{Tuberia Libre}]}{\log[E_{100\%}] - \log[E_{Tuberia Libre}]} \quad \text{Ec. ( 13)}$$

Con un BI>80% a lo largo de una sección significa que no existen canales en el cemento.

Pero con un índice de adherencia del 80% significa que el 80% de la superficie del casing está adherida al cemento.

**1.6.4. Registros ultrasónicos.** Esta herramienta tiene un transductor que emite pulsos con frecuencias en el rango de 200kHz a 700 kHz. Los pulsos ultrasónicos viajan a través del fluido hacia la pared del casing, el transductor se convierte en un receptor y mide el eco que retorna del casing. La razón a la cual la onda recibida se deteriora depende de la impedancia acústica del medio o del casing.

---

<sup>28</sup> NELSON. Op cit. 564 pag

Los diferentes materiales presentes en el anular del casing, están clasificados según umbrales de impedancia acústica como gas, líquido o cemento.<sup>29</sup>

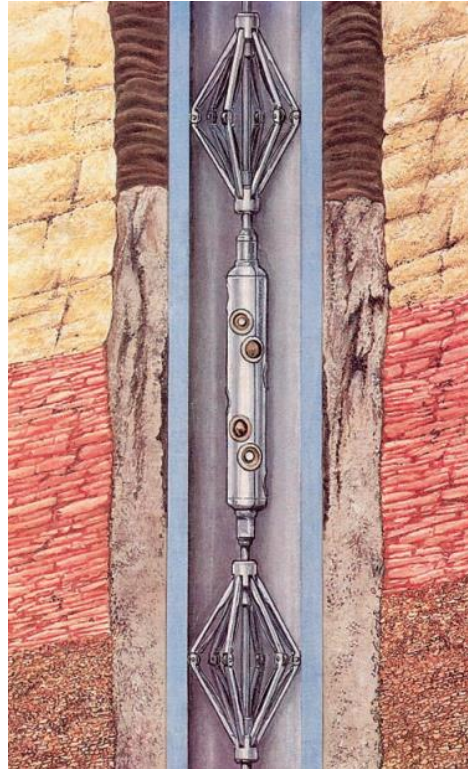
Si hay líquido detrás del casing, tiende a generar resonancia o sonar, pero si es cemento sólido detrás del casing, la resonancia será disminuida. Existen múltiples herramientas wireline empleadas para la toma de registros, para efectos del presente trabajo se hace énfasis en la herramienta USI, la cual será explicada más adelante.

La primera generación de herramientas para registros ultrasónicos (CET y PET) consiste en ocho transductores ultrasónicos armados en una espiral helicoidal alrededor de la sonda, encarando la parte exterior. Están espaciados alrededor del cuerpo de la herramienta, un transductor cada 45°.

---

<sup>29</sup> TIMONIN, A.; LUNGERSHAUSEN. D and KRAVETS. P.; Microannulus and Cement Evaluation: Effectiveness of Cement Using Sonic and Ultrasonic Technologies in Wells with Microannulus between Casing and Cement Sheath. Paper SPE 172309-MS presented at the 2014 SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition held in Astana, Kazakhtan, November 12-14

Figura 20. Herramienta CET.



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

La segunda generación de herramientas (USI y CAST-V) emplea un transductor rotatorio para obtener total cobertura de la tubería. Las mediciones son hechas en varios puntos a través de la circunferencia: 36 o 72 en el caso de la herramienta USI y 100 para el dispositivo CAST-V.

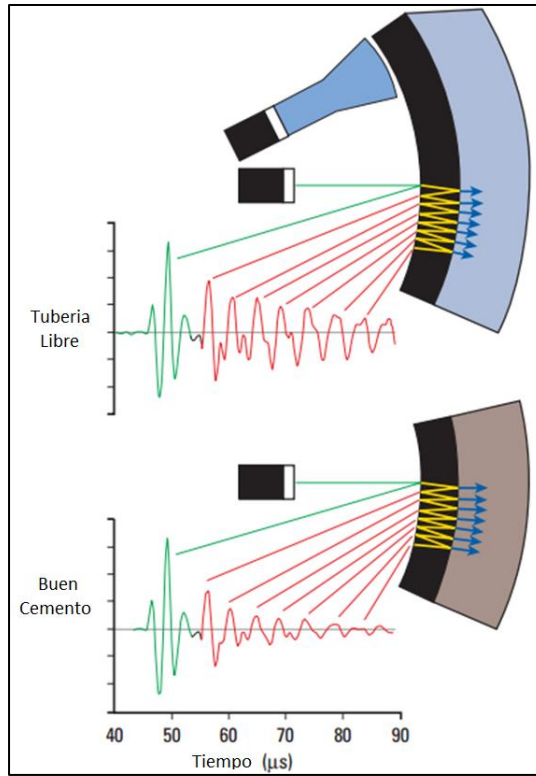
Figura 21. Herramienta USI (Ultrasonic Imager)



Fuente: Schlumberger. [en línea] [citado 10 de diciembre de 2015] Disponible en: [http://www.slb.com/~media/Files/production/product\\_sheets/well\\_integrity/cement\\_bond\\_logging\\_tools.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/production/product_sheets/well_integrity/cement_bond_logging_tools.pdf)>

La figura 22 ilustra dos situaciones diferentes, el cemento detrás de la tubería disminuye la resonancia y frecuencia de resonancia (mostrada por el espacio entre el pico de resonancia) es el mismo con el agua o el cemento detrás de la tubería.

Figura 22. Respuesta ultrasónica a diferentes materiales en el anular.



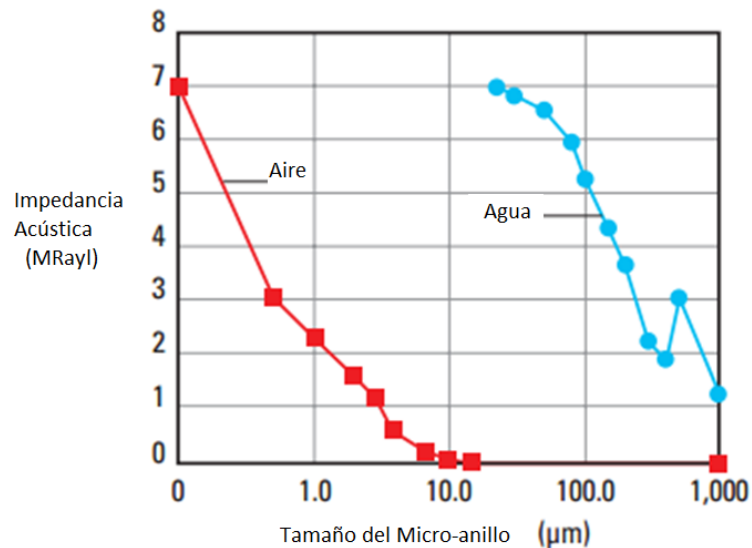
Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

En la interpretación de registros se define micro-anillo como un pequeño espacio lleno de fluido, menor a unos pocos cientos de micras de espesor, entre el casing y el cemento. La mayoría de estos espacios son creados por cambios de presión y temperatura, o por una película de lodo o aceite dejado en el casing. El espesor de la capa del fluido será referido como “capa de lodo” o como un canal.

El efecto del micro-anillo en la señal del pulso ultrasónico depende si este está lleno de gas o de líquido. Las mediciones del USI no son afectadas por micro-anillos llenos de líquido. Un micro-anillo lleno de gas afecta un poco más la medición de la herramienta, ya que la longitud de onda para el gas es más corta y la

impedancia más baja, sin embargo, esto depende del tamaño del micro-anillo, tal como se muestra en la figura 23.

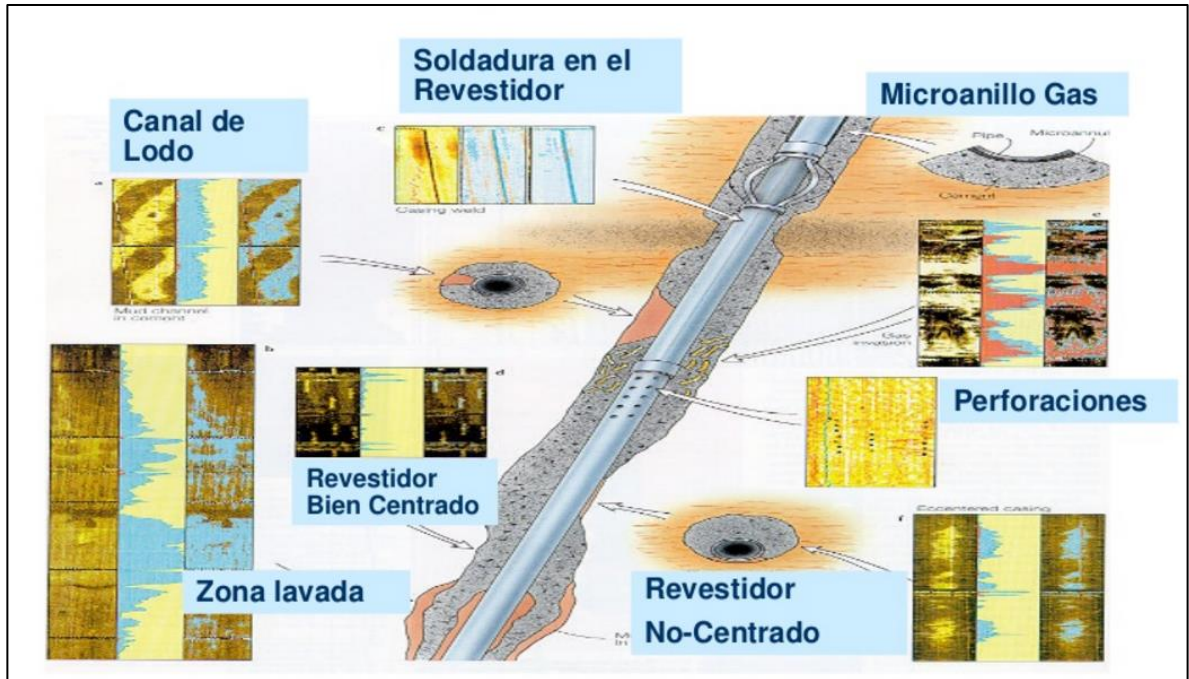
Figura 23. Efecto del micro-anillo con líquido y con gas en las mediciones del cemento, usando un diámetro de 4,7 in de diámetro, casing de 9 mm de espesor.



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

La figura 24 muestra algunos ejemplos de los diferentes casos que se pueden presentar después de tener el cemento fraguado. La interpretación de los mapas USI serán explicados en la sección 640, de igual forma la figura muestra una vista del área transversal de la tubería para cada situación.

Figura 24. Mapas del USI (Ultrasonic Imager Tool)



Fuente: SlideShare. Registros Sónicos. [en línea] [citado 10 de diciembre de 2015]  
 Disponible en: <<http://es.slideshare.net/AgustnPiccione/16-evaluacin-de-las-cementaciones>>ewImpedancia Acústica

Las herramientas sónicas responden a la impedancia acústica (dureza acústica)  $Z$ , la cual es interpretada por el ajuste de umbrales para distinguir entre gas, líquido y sólidos.

$$Z = \text{Densidad} * \text{Vel}_{Acustica} \quad \text{Ec. ( 14)}$$

Donde:

$Z$  es expresada en MRayl ( $10^6 \frac{kg}{m^2 * s}$ ).

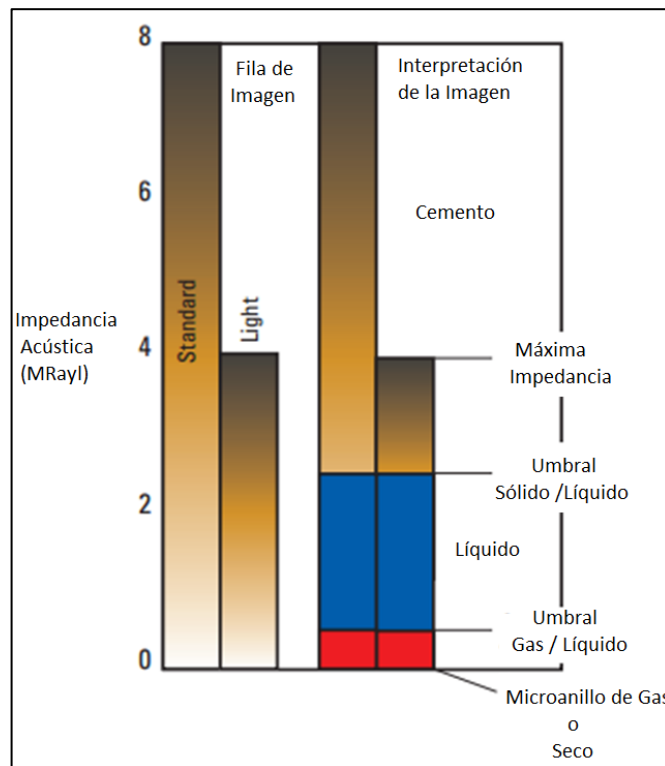
Actualmente los umbrales para los mapas de USI se muestran en la tabla 3 y la figura 25.

Tabla 3. Umbrales de impedancia para la herramienta USI. (Nelson & Guillot, 2006)

Umbral	Valor (MRayl)
<b>Gas (o micro-anillo seco)/liquido</b>	0.3
<b>Solido/Liquido</b>	Impedancia del lodo en el anular + 0.5 (estándar 2.6)
<b>Maxima impedancia</b>	4 a 8 dependiendo de la impedancia acústica esperada para el cemento.

Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

Figura 25. Umbral de impedancia para distinguir entre gas (o microanillo seco), liquido y solido.



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

Mediante la imágenes ultrasónicas y la distribución de los materiales detrás del casing, la interpretación se convierte más fácil que la los registros CLB/VDL. La interpretación conjunta de estos registros permite una imagen coherente y compensa las limitaciones de cada uno de los registros por separado.

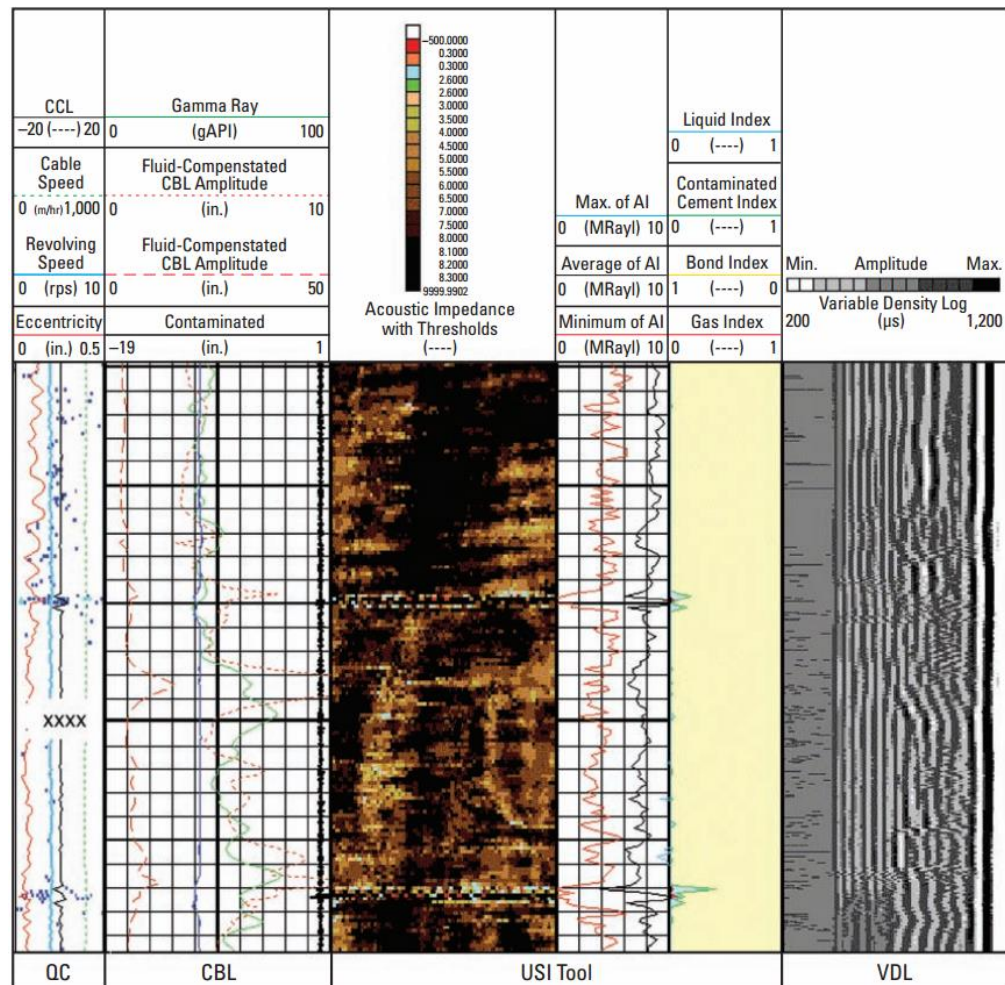
Tabla 4. Guia de interpretacion USI y CBL/VDL. (Nelson & Guillot, 2006)

	Herramienta USI	CBL-VDL
Resolución	1,2 in.	360° x 3ft
Gas	Gas (0 MRayl)	Amplitud más alta que tubería libre
Líquido	Líquido (1-3 MRayl)	Tubería libre
Cemento con buen sello	Cemento (4-8 MRayl)	Buen sello
Cemento muy ligero	Bajo contraste con líquidos	Bajo contraste con líquidos
Micro-anillo seco	Micro-anillo seco o gas (0 MRayl)	Bueno a imparcial cemento
Micro-anillo húmedo	Impedancia del cemento media	Sello pobre
Capa de lodo en sector	Canal líquido	Cemento imparcial
Cemento contaminado	Impedancia del cemento baja	Cemento imparcial
Canal de lodo	Canal	Cemento imparcial
Canal angosto de gas	Canal de gas	Cemento
Sello cemento/formación	No se ve	Indicación cualitativa VDL
Condición del casing	Muy sensible	Poco sensible
Limite en densidad de lodo	<16 Lbm/gal (WBM) <13 Lbm/gal (OBM)	Sin limite

Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

**1.6.6. Trabajo con buena cementación.** En la figura 26 se pueden observar simultáneamente los registros CBL/VDL y USI. En el registro CBL se observan dos escalas de amplitud (0-10 y 0-50), los valores son bajos y es constante a través del registro. La impedancia acústica promedio es de 8 MRayl, de igual forma en el mapa registrado por la herramienta, se observan que dominan los tonos marrón oscuros perteneciente a umbrales altos. Finalmente el VDL indica una débil entrada al casing, lo cual indica adherencia del cemento y fuerte retorno de la formación.

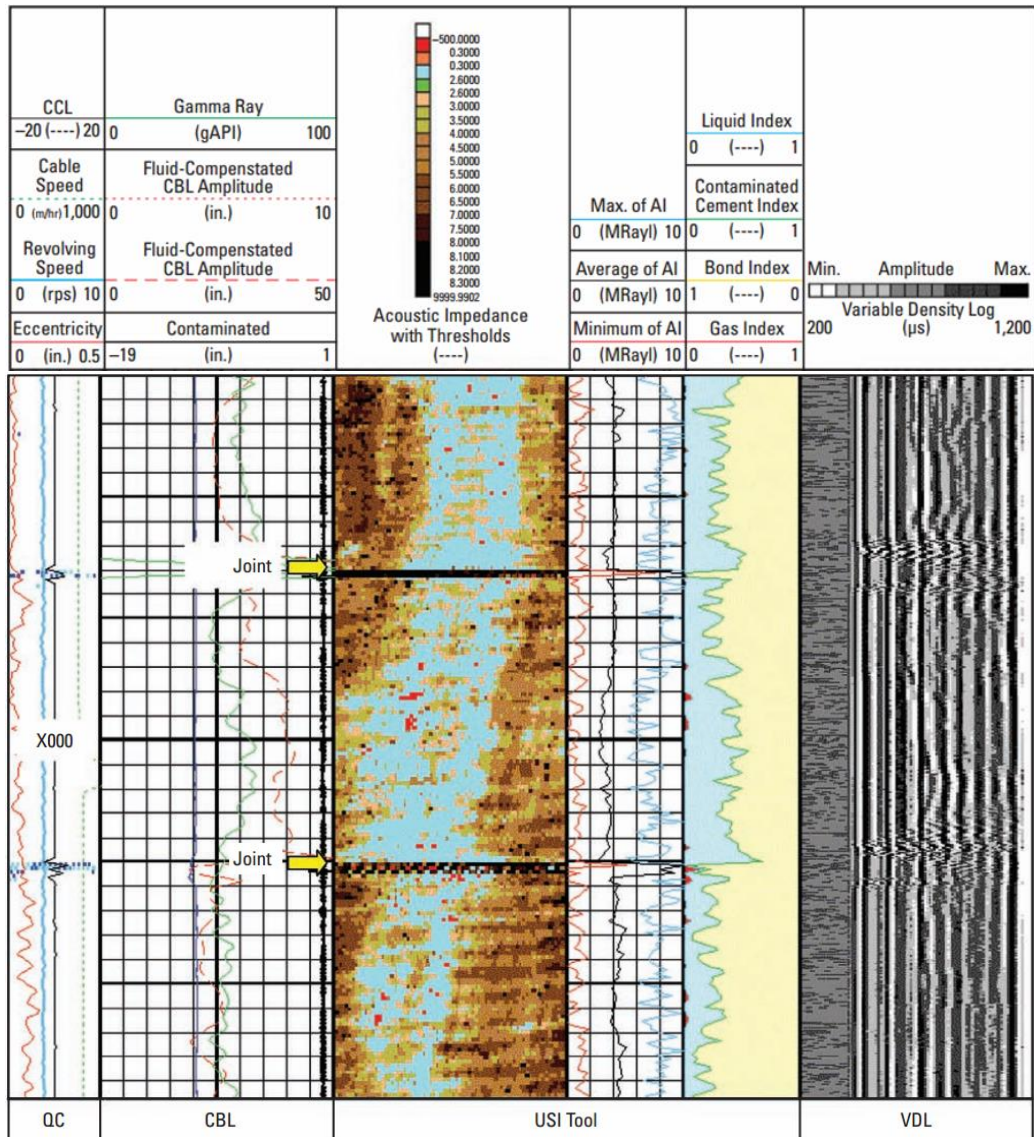
Figura 26. Registro USI y CBL-VDL con buena cementación.



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

**1.6.7. Canal de lodo.** La Figura 27 muestra un amplio canal de lodo de 180° (azul). El color del cemento (marrón) indica una impedancia alrededor de 5MRayl, el cual es menor al esperado para el cemento y sugiere contaminación con lodo. La amplitud en el CBL es alta y variable; en el VDL indica una fuerte llegada al casing y una débil respuesta de la formación.

Figura 27. Registro USI y CBL-VDL canal de lodo.



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

## 1.7. MICRO-ANILLOS

El micro-anillo húmedo es debido a la presencia de un fluido entre el cemento y el revestidor, es causado por:

- Remoción de lodo insuficiente (película de lodo/espaciador)
- Cambio en los esfuerzos actuantes en el pozo, luego de realizado el trabajo de cementación (cambio de fluido de completamiento o prueba con presión al casing).

El micro-anillo seco es debido a la presencia de un espacio entre el cemento y el revestidor, causado por:

- Cambio en las fuerzas actuantes en el pozo, luego de un trabajo de cementación (cambio de fluido en el pozo).
- El cemento puede estar parcialmente adherido o totalmente desadherido al revestidor.

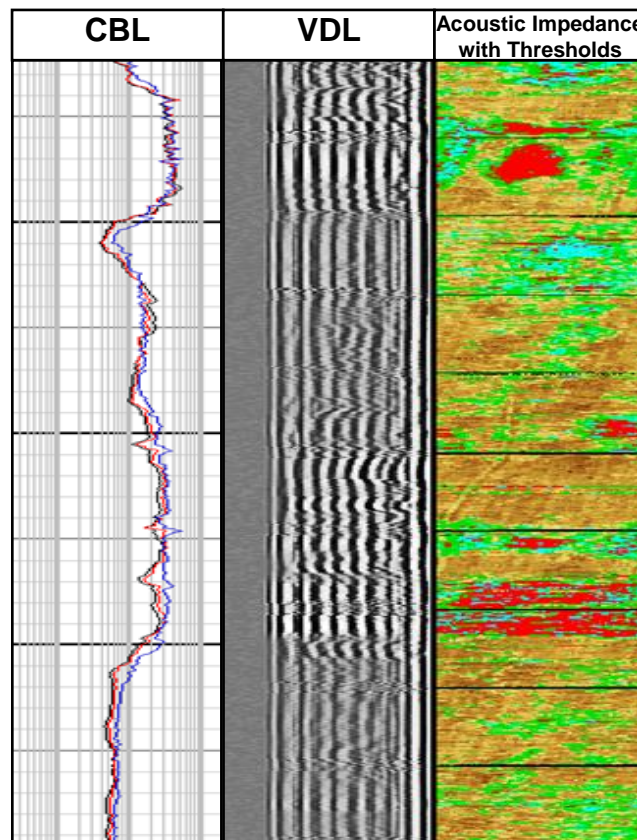
La herramienta USI muestra un cemento con impedancia media, pero el CBL es alto y plano y el VDL muestra fuertes llegadas al casing, justo como con tubería libre. Esta es una interpretación de un micro-anillo lleno de líquido de 0.1 mm de espesor.

**1.7.1. Efectos del micro-anillo en el CBL.** Cuando se pierde totalmente la adherencia entre el revestidor y el cemento hay menos energía dispersa en el medio circundante y la amplitud, por consiguiente es más alta. El trabajo aparenta ser peor de lo que realmente es. La mayoría del tiempo la amplitud varía de forma notable con la profundidad, pero las señales de la formación pueden observarse en el VDL, de ser así, el micro-anillo no es continuo (el cemento está parcialmente adherido).

En algunos casos, cuando las señales del CBL son cercanas a las de la tubería libre y las señales del VDL son escasas o inexistentes, es muy probable que el micro-anillo sea continuo (lodo, espaciador o espacio vacío).<sup>30</sup>

**1.7.2. Micro-anillo húmedo.** La herramienta USI muestra un cemento con impedancia media, pero el CBL es alto y plano y el VDL muestra fuertes llegadas al casing, justo como con tubería libre.

Figura 28. Registro CVL-VDL y USI mostrando un micro-anillo húmedo alrededor de la tubería

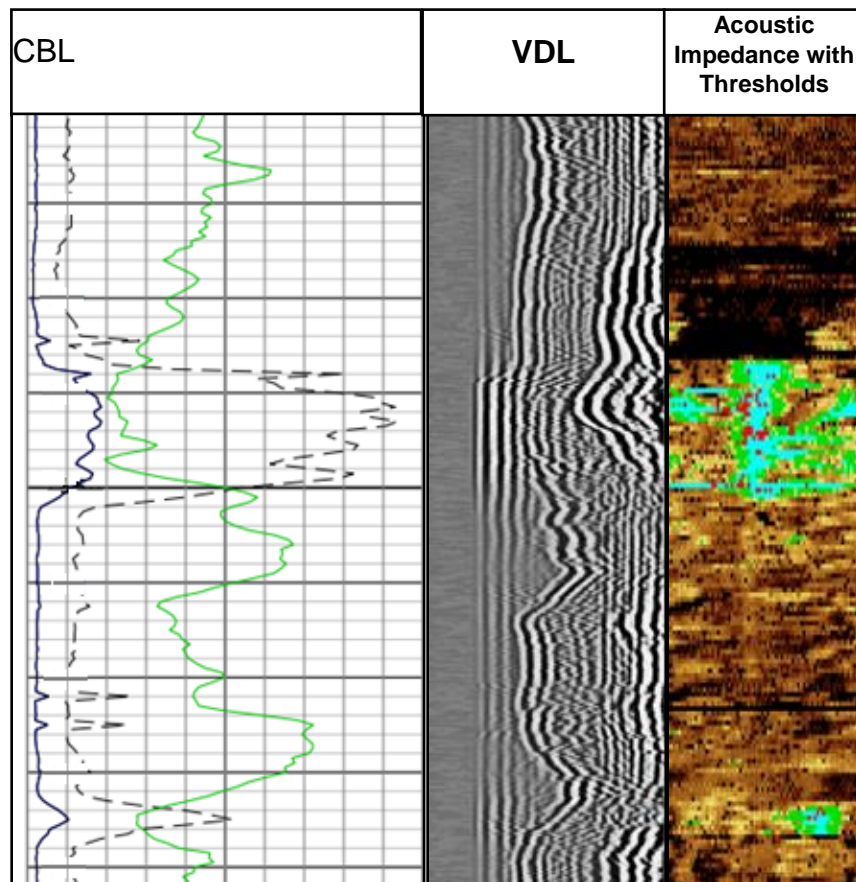


Fuente: Cement and Pipe integrity Theory. Property of Schlumberger.

<sup>30</sup> Evaluación de cementaciones con registros sínicos. SlideShare. [En línea] <<http://es.slideshare.net/AgustnPiccione/16-evaluacin-de-las-cementaciones>>

**1.7.3. Micro-anillo Seco.** Un micro-anillo seco actúa como una barrera acústica y obliga a la herramienta USI tomar mediciones de impedancia cercanas a cero, al igual que el gas.

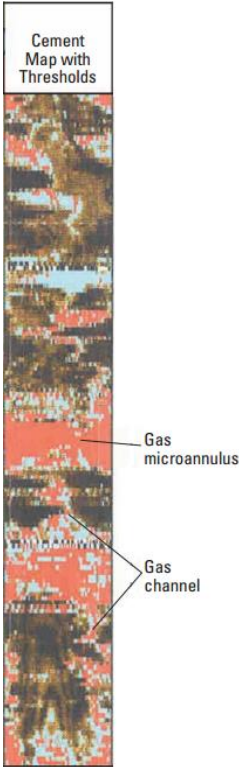
Figura 29. Registro CVL-VDL y USI



Fuente: Cement and Pipe integrity Theory. Property of Schlumberger. All rights reserved.

La figura 30 es el mapa de cementación realizado un liner de 7 in, este es un ejemplo de un viejo almacenamiento de gas donde el cemento adherido al casing parcialmente y presenta canales de gas que se comunican a lo largo de la tubería, lo cual permite migración fluido hacia el tope del liner.

Figura 30. Mapa USI con micro-anillo seco



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

## 2. ADITIVOS EXPANSIVOS PROPUESTOS

En base a la investigación realizada en documentos científicos y publicaciones sobre el fenómeno de encogimiento del cemento, en este capítulo se presentan os aditivos químicos que presentan cualidades expansivas y presentan buenos resultados al momento de prevenir la formación de micro-anillos. Dichos aditivos serán estudiados para la posible implementación en un pozo Colombiano a fin de optimizar el rendimiento de la lechada del cemento sin agente expansivo.

Las pruebas presentes en la literatura como THOMAS, J. et al 2014, SAIDIN, S. et al 2008, NELSON & GUILLOT. 2006 entre otros, muestran líneas de tendencia de expansión a la compresión versus tiempo de curado, siendo este, el proceso por el cual se busca mantener saturado el concreto hasta que los espacios de cemento fresco, originalmente llenos de agua sean reemplazados por los productos de la hidratación del cemento. El curado pretende controlar el movimiento de temperatura y humedad hacia dentro y hacia afuera del concreto. Busca también, evitar la contracción del cemento hasta que el concreto alcance una resistencia mínima que le permita soportar los esfuerzos inducidos por ésta.<sup>31</sup>

### 2.1. POLVO DE ALUMINIO

El polvo de aluminio fino reacciona con los alcanos en la lechada de cemento para producir pequeñas burbujas de hidrogeno de gas. El sistema es efectivo en

---

<sup>31</sup> CONSTRUSTRUCONCRETO Curado del concreto. [En línea], <  
[http://construestruconcreto.webpin.com/785751\\_4-5-curado-del-concreto.html](http://construestruconcreto.webpin.com/785751_4-5-curado-del-concreto.html)>

aplicaciones de pozos superficiales ya que la presión de expansión de las burbujas debe ser mayor que la presión de formación.<sup>32</sup>

En la tabla 5 se observa el efecto que tiene la presión sobre el efecto de expansión de la lechada, ya que el comportamiento del cemento fraguado en condiciones de superficie se comporta de forma diferente que en yacimiento.

Tabla 5. Efecto del Polvo de Aluminio en la expansión del cemento

Porcentaje de Aluminio (%)	Volumen de Expansión (%) (a 80 °F)	
	Presión de curado	
	0 psi	3,000 psi
0.05	11.84	0.712
0.1	17.9	0.917
0.25	24	1.64
0.5	56.51	2.64
1	57.19	5.17

Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

La tabla 6 se observa el efecto en la fuerza de compresión a diferentes concentraciones del aditivo.

Tabla 6. Efecto en la fuerza de compresión del polvo de aluminio

Porcentaje de Aluminio (%)	Fuerza de compresión a 24 horas,psi	
	Presión de curado	
	0 psi	3,000 psi
0	1,290	1,615
0.05	1,080	1,625
0.1	1,085	1,480
0.25	1,120	1,540
0.5	500	1,495
1	425	1,060

Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

<sup>32</sup> NELSON and GUILLOT. Op cit. 237 pag.

Adicionalmente, con este aditivo presente en el cemento se ha determinado tener permeabilidades menores de 1md en 24 horas.<sup>33</sup>

## **2.2. SAL**

La expansión alcanzada con estos sistemas es relativamente baja, teniendo que esperar más de 10 días para tener un máximo de 0.15% con una concentración de 15% de sal. Después de 60 días y a esta concentración máxima de sal se alcanza un nivel de expansión igual que la obtenida a los 5 días por los tixotrópicos con yeso (sulfato de calcio hidratado), es decir 0.18%.<sup>34</sup> Según su concentración en la lechada, la sal puede actuar como un acelerador (concentración < 5%) o un retardador (concentración >18%). La sal también se utiliza para dispersar las lechadas, induce la expansión del cemento fraguado, y también es usada para proteger la mezcla contra la congelación. Marginalmente la sal se puede utilizar como agente de peso y para aumentar la conductividad eléctrica del cemento.

**2.2.1. Efecto de la sal en la Expansión.** La figura 31 muestra el comportamiento de la lechada de cemento a tres diferentes concentraciones de sal a condiciones de presión y temperatura de 3000 psi y 200°F respectivamente. La lechada es preparada con un cemento clase H, con 35% de sílica, 42% Agua, y con 0%, 18% y 37% en contenido de sal. Los resultados permiten observar que el aumento en la concentración de sal es directamente proporcional a la magnitud de la expansión y se elimina casi en su totalidad el efecto inicial de encogimiento. Para eliminar el encogimiento inicial dado por las condiciones de la prueba y los componentes de

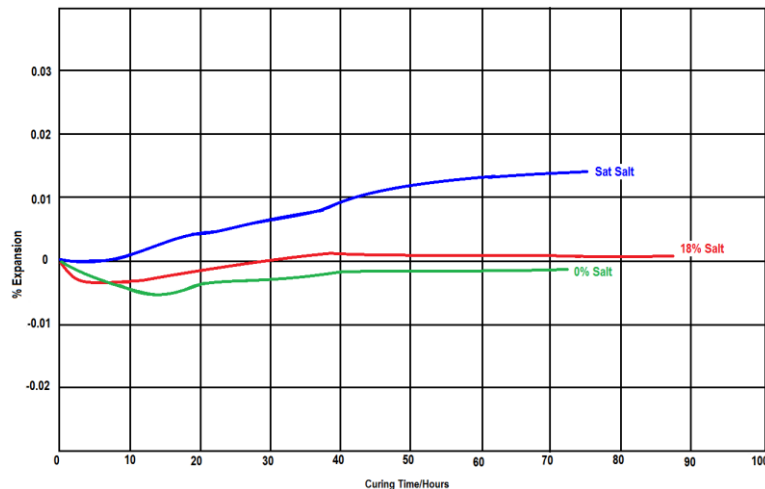
---

<sup>33</sup> CARTER, L.; WAGGONER, H. and GEORGE, C. Op. cit. 5 pag.

<sup>34</sup> CPVEN. Op Cit. 13 pag

la lechada, la concentración de sal debe ser mayor del 18% para lograr una expansión satisfactoria.<sup>35</sup>

Figura 31. Efecto de la Sal en el Cemento clase H, 35% Silica, 42% Agua, Sal, 3000 psi, 200°F



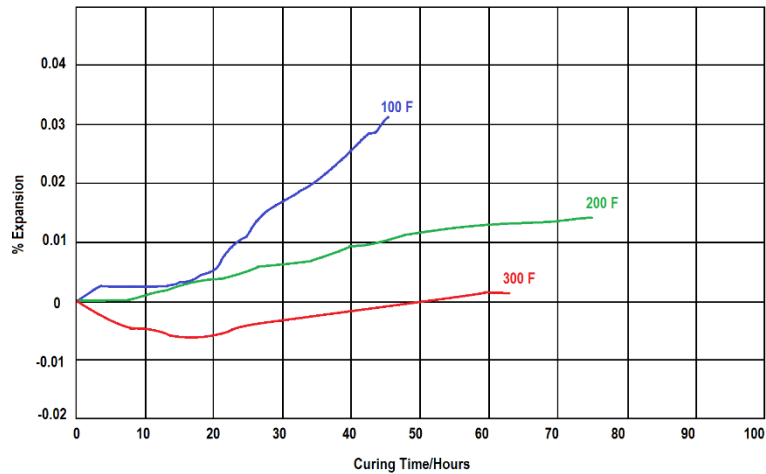
Fuente: BEIRUTE. R. and TRAGESSER. A.; Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements Under Actual Well Conditions. Paper SPE 4091. 1973

**2.2.2. Efecto de la temperatura.** Con el fin de evaluar el efecto que tiene la temperatura en la expansión del cemento, se realizan tres pruebas a 100°F, 200°F y 300°F, presión constante de 3,000 psi. El cemento empleado es clase H con 35% silica, 42% Agua. No se utiliza ningún tipo de retardante, y se usa una cantidad relativamente baja de agua para prevenir que no haya agua libre en el tope del cemento en las primeras etapas de la prueba.

---

<sup>35</sup> BEIRUTE. R. and TRAGESSER. A.; Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements Under Actual Well Conditions. Paper SPE 4091 presented at the 1972 SPE-AIME 47<sup>th</sup> Annual Fall Meeting held in San Antonio., October 8-11

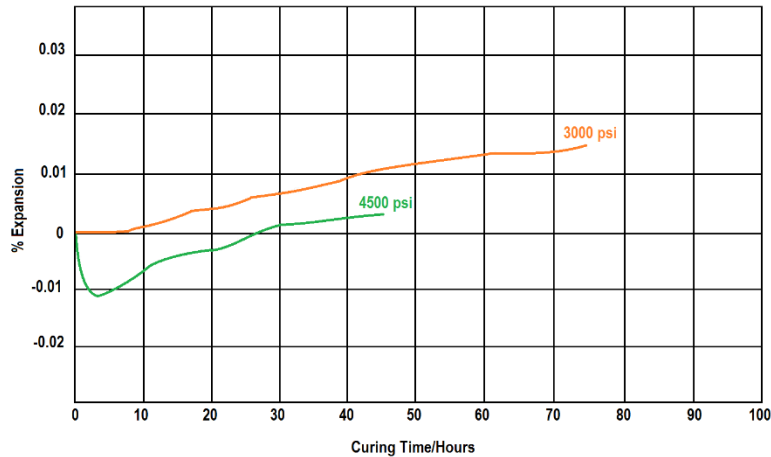
Figura 32. Efecto de la temperatura - Cemento Clase H, 35% silica, saturado en sal, 42% Agua, 3000 psi.



Fuente: BEIRUTE. R. and TRAGESSEER. A.; Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements under Actual Well Conditions. Paper SPE 4091. 1973

**2.2.3. Efecto de la presión.** Se emplea un cemento con características similares a la prueba anterior y la temperatura permanece constante de 200°F. Las presiones de fraguado son 3000 psi y 4500 psi. Para la prueba de 3,000 psi se observa un comportamiento de expansión no muy significativo pero estable, mientras que en la prueba de 4,500 psi se observa un fuerte encogimiento en las primeras cinco horas, después comienza a aumentar y tomar un comportamiento relativamente estable.

Figura 33. Efecto de la presión - Cemento Clase H, 35% silica, Saturado en sal, 42% agua, 200 °F.



Fuente: BEIRUTE. R. and TRAGESSEER. A.; Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements under Actual Well Conditions. Paper SPE 4091. 1973

### 2.3. BENTONITA

La arcilla base más usada frecuentemente es la bentonita como “extendedor”, el cual contiene al menos un 85% de mineral esmectita. La bentonita tiene la propiedad inusual de expandir varias veces su volumen inicial en contacto con el agua, resultando un fluido más viscoso, fuerza de gel y la habilidad de suspender sólidos.<sup>36</sup>

Esta arcilla coloidal que imparte propiedades de viscosidad y tixotropía al contacto con agua dulce debido a su expansión que está alrededor de diez veces de su volumen original. La dosificación convencional es en un relación de 5.3 Litros de agua por cada Kg de bentonita; se puede añadir hasta un 4% por peso de cemento sin que se vea afectado negativamente al producto fraguado; en

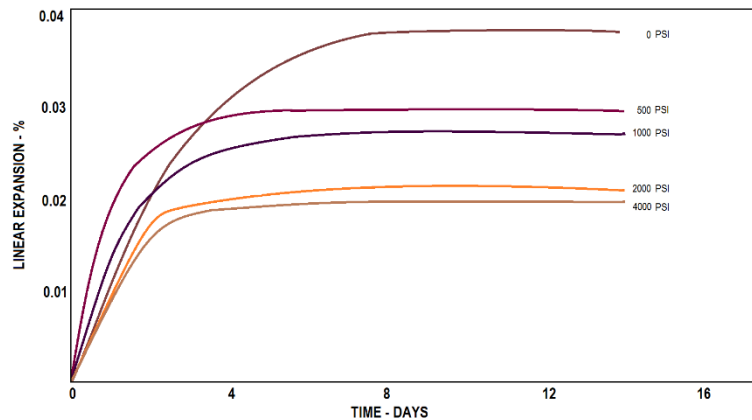
---

<sup>36</sup> NELSON. E. Op cit. 59 pag.

concentraciones del 8% al 12% para mezclas de cemento secas, se requiere agregar 1.3 galones de agua por cada 2% de bentonita.

La figura 34 muestra el comportamiento de un cemento 50% puzolana a diferentes presiones y una concentración de bentonita de 2%, cada una de las pruebas es realizada a la misma temperatura de fragüe (100°F).

Figura 34. Efecto de la presión sobre la expansión (cemento 50:50 cemento puzolana, Bentonita 2%, Agua  $5,75 \frac{Gal}{Saco}$ , curado a diferentes presiones y temperatura de 100 °F



Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

## 2.4. ÓXIDO DE MAGNESIO

La habilidad de expansión de los óxidos de Magnesio  $MgO$  o de Calcio  $CaO$  se ve reflejada en múltiples fuentes de la literatura (Thomas et al 2014 y Saidin et al. 2008). La hidratación del  $MgO$  forma un mineral llamado Brucita  $Mg(OH)_2$ , presentando una expansión asociada del 117% en el volumen sólido. Cuando una partícula de  $MgO$  es hidratada dentro de una matriz del cemento, ésta incrementa

su volumen creando un esfuerzo expansivo que puede ser disipado por un incremento del volumen del espécimen o bajo condiciones de confinamiento tales como a través de una formación competente, o colocar el cemento dentro de un estado de esfuerzos compresivos durante largos periodos de tiempo.<sup>37</sup>

## 2.5. SULFATO DE CALCIO DI-HIDRATADO

Usualmente el sulfato de calcio di hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), comúnmente llamado yeso se agrega a cementos clase A, G o H en concentraciones de 3%- 6% reaccionando con el Aluminato tetra cálcico generando la expansión del cemento. Estas propiedades expansivas aumentan la fuerza del contacto entre la tubería y la formación, efectuando un sello optimo contra la migración de gas o fluidos anulares. (Smith, 1990).

## 2.6. CAL ANHIDRA

$CaO$  y  $MgO$  se hidratan de formar similar para generar expansión, pero el  $CaO$  suele ser mucho más reactivo que el  $MgO$  a una temperatura dada. Se agrega en un 12% de aditivo expansivo por peso de cemento. En ambos casos la fracción del volumen sólido de las muestras es ~ 41%. Se pueden agregar pequeñas cantidades de dispersante, agente que previene la sedimentación de sólidos (anti-setting), y agente anti- espumante con el fin de desarrollar una lechada estable.<sup>38</sup>

Para medir los efectos de los agentes expansivos bajo condiciones de confinamiento, se utiliza una celda mostrada en la figura 35 donde se ingresa la

---

<sup>37</sup> THOMAS. J.; MUSSO. S.; CHOUGNET. A.; ALLOUCHE. M.; Op cit. 2 pag.

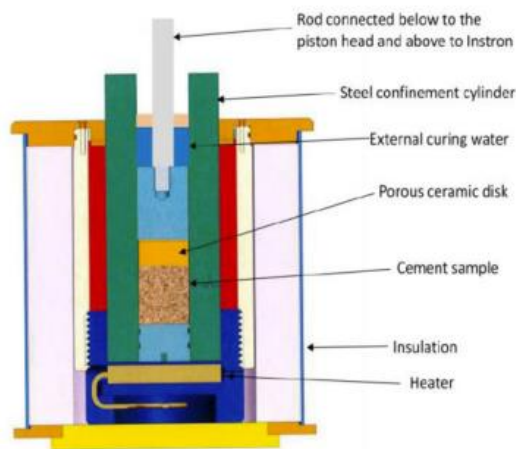
<sup>38</sup> Ibid. 2 pag.

muestra dentro de un contenedor cilíndrico de acero que tiene unas dimensiones de diámetro interno 28.6 mm y un diámetro externo de 76.2mm. La muestra se expone a un baño de glicol.

La celda simula las condiciones de la hidratación del cemento asentado a una formación permeable que contiene agua, se ubica en el tope de la muestra un disco de cerámica poroso con una capa de papel filtro en medio con el fin de mantener el disco limpio.

A medida que el cemento y el agente expansivo reaccionan, la pérdida de volumen generada por el encogimiento del cemento es reemplaza por el agua que pasa desde la parte superior, manteniendo los poros de la muestra saturados.

Figura 35. Izquierda, Celda de coeficiente de esquemático para la medición de expansión. Derecha, Maquina de pruebas mecánicas

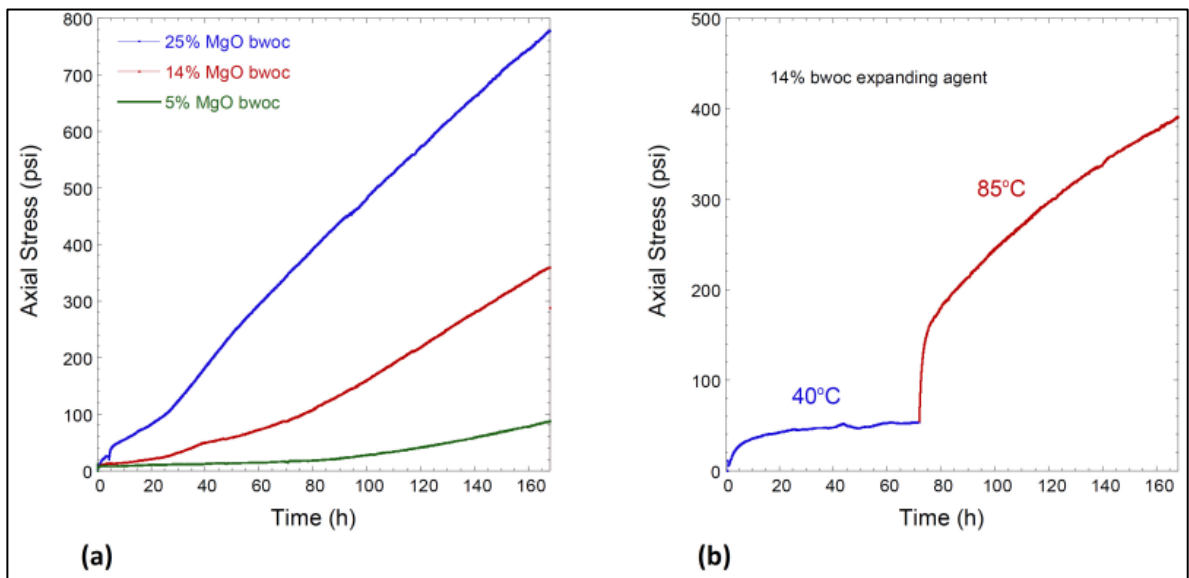


Fuente: THOMAS. J.; MUSSO. S.; CHOUGNET. A.; ALLOUCHE. M.; Expanding Cements for Improved Wellbore Sealing: Prestress Development Physical Properties, and Logging Response. SPE 170306. 2014.

La figura 36 muestra los resultados para tres diferentes mezclas conteniendo 5%, 14% y 25% de  $MgO$  por peso de cemento, con agua disponible a través de los

poros del disco de cerámica encima de la muestra. Esto representa la condición de la lechada de cemento contra una formación rígida y llena de agua. Después de una semana, se desarrollan esfuerzos compresivos que van desde 90 psi a 750 psi. Los esfuerzos se observan fuertemente incrementados a largo plazo.

Figura 36. Resultados de expansión confinada (estrés compresivo vs tiempo) para la hidratación de la mezcla cemento/ MgO a 85 °C. a). Diferentes cantidades de MgO. b) 14% bwoc de agente expansivo CaO/MgO



Fuente: THOMAS. J.; MUSSO. S.; CHOUGNET. A.; ALLOUCHE. M.; Expanding Cements for Improved Wellbore Sealing: Prestress Development Physical Properties, and Logging Response. SPE 170306. 2014.

También se lleva a cabo una prueba de confinamiento con 14% por peso de cemento del agente expansivo  $CaO / MgO$  (fig. 5b); para esta prueba, la temperatura se mantiene a 40°C por las primeras 72 horas, y entonces se aumenta a 85°C. El comportamiento mostrado en la figura 36b puede ser obtenido para en presencia de cada uno de estos dos agentes expansivos. El  $CaO$  es mucho más reactivo, entonces este provee una expansión temprana incluso a 40°C y llega a hidratarse completamente después de las 24 Horas, mientras que

el *MgO* es casi inerte a 40°C. Cuando la Temperatura se incrementa hasta 85°C, el *MgO* comienza a reaccionar, dando una fuerte expansión en la primera semana y de ahí en adelante.<sup>39</sup>

## 2.7. SULFATO DE SODIO

Al estudiar el efecto del sulfato de sodio en el cemento, varios porcentajes en peso fueron agregados a los cementos API clase A, B y C y en una proporción de 50:50 de cemento clase A con cemento puzolanico para realizar pruebas de expansión a un temperatura de 80 °F. El porcentaje de expansión lineal de los especímenes, se compara con las mediciones para 7, 14, 28, 90, 180 y 270 días (tabla 7). Estos datos no solamente muestran el grado de expansión alcanzada, también indica el limite más alto en expansión que puede lograr el sulfato de sodio en cemento clase A sin deterioro causado por expansión excesiva en condiciones sin presión.<sup>40</sup>

Tabla 7. Efecto expansivo del sulfato de sodio.

<b>EFFECTO EXPANSIVO DEL SULFATO DE SODIO SOBRE VARIAS CLASES DE CEMENTOS</b>						
<b>Condiciones de Curado</b>						
<b>Agua Fresca</b>	<b>Temperatura: 80°F</b>				<b>Presión Atmosférica</b>	
<b>Expansión Linear: por ciento ( Tiempo de Curado en días)</b>						
<b>Sulfato de Sodio (%)</b>	7	14	28	90	180	270

<sup>39</sup> Ibid. 6 pag.

<sup>40</sup> CARTER, L.; WAGGONER, H. and GEORGE, C. Op cit. 3 pag.

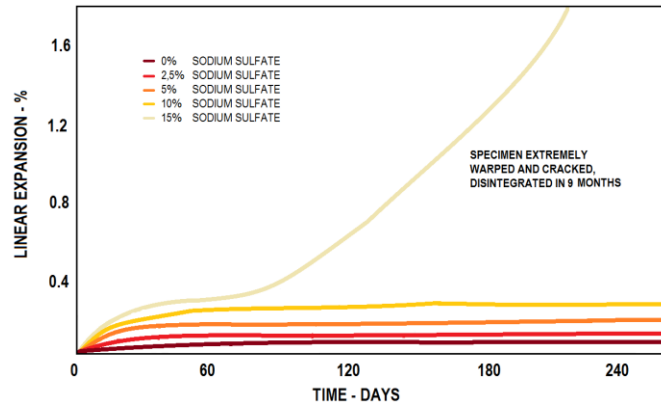
## EFECTO EXPANSIVO DEL SULFATO DE SODIO SOBRE VARIAS CLASES DE CEMENTOS

<b>Cemento Comercial Expansivo (C3A= 10%) Relación Agua - Cemento: 5.2 gal/saco</b>						
<b>0.0</b>	0.049	0.061	0.071	0.102	0.122	0.131
<b>API Clase A Cemento (C3A = 8.1% ) Relación Agua-Cemento: 5.2 gal/saco</b>						
<b>0.0</b>	0.027	0.035	0.045	0.067	0.078	0.083
<b>2.5</b>	0.028	0.039	0.053	0.089	0.112	0.120
<b>5.0</b>	0.063	0.081	0.106	0.145	0.174	0.189
<b>10.0</b>	0.097	0.131	0.169	0.244	0.272	0.292
<b>15.0</b>	0.107	0.149	0.210	0.373	1.2W*	F**
<b>API Clase B Cemento (C3A = 3.9% ) Relación Agua-Cemento: 5.2 gal/saco</b>						
<b>0.0</b>	0.008	0.018	0.023	0.029	0.031	0.033
<b>2.5</b>	0.014	0.019	0.024	0.031	0.032	0.035
<b>5.0</b>	0.034	0.028	0.035	0.044	0.047	0.049
<b>API Clase C Cemento (C3A = 0% ) Relación Agua-Cemento: 7.6 gal/saco</b>						
<b>0.0</b>	0.014	0.018	0.023	0.029	0.031	0.033
<b>2.5</b>	0.015	0.019	0.024	0.031	0.032	0.035
<b>5.0</b>	0.023	0.028	0.035	0.044	0.047	0.049
<b>*W-- es un espécimen extremadamente deformable y frágil.</b>						
<b>**F-- Barra desintegrada.</b>						

Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

La figura 37 indica que con un 15% de sulfato de sodio la tasa de expansión incrementa rápidamente después de 90 días, resultando en desintegración y fractura de los especímenes. Sin embargo con 10 % o menos de sulfato de sodio la tasa de expansión del cemento disminuye y el cemento permanece aceptable.

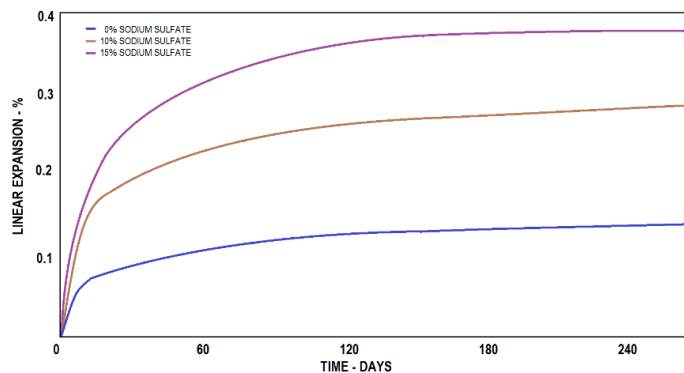
Figura 37. Efecto del Sulfato de sodio (Cemento – API clase A ( $C_3A = 8,1\%$ ); Agua  $5,2 \frac{gal}{saco}$ , fraguado a presión atmosférica y  $80^\circ F$ )



Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

Los datos obtenidos y graficados en la figura 38 muestran que aún es posible obtener un grado de expansión mayor con el sulfato de sodio en un cemento en proporción de 50:50 puzolana que contiene 2% de bentonita. Sin embargo, al adicionar 15% de sulfato de sodio al cemento puzolana no resulta en deterioro de los especímenes después de 9 meses.

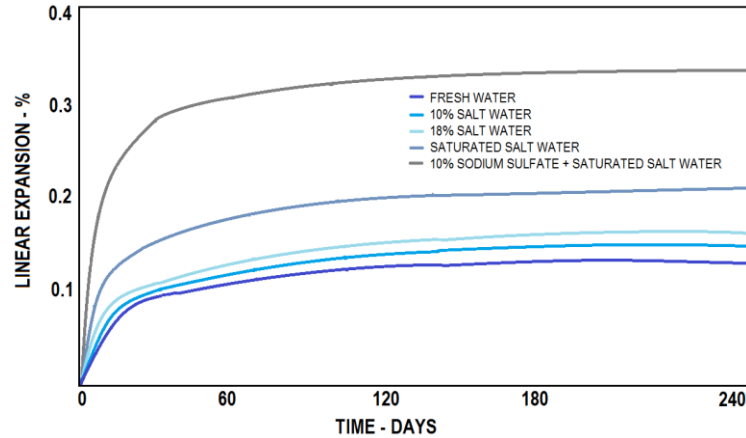
Figura 38. Efecto del sulfato de sodio (Cemento - 50:50 cemento puzolana; bentonita 2%, Agua  $5,7 \frac{gal}{saco}$ , fraguado a presión atmosférica y  $80^\circ F$ )



Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

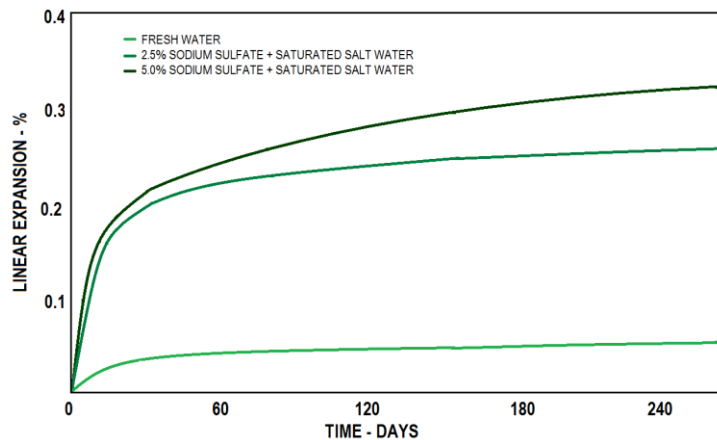
Como aditivo expansivo, el sulfato de sodio puede ser usado solo o combinado con el cloruro de sodio para tener diferentes grados de expansión. Los resultados de las mediciones se muestran en la figura 39 y la 40.

Figura 39. Efecto del Cloruro de Sodio (Cemento 50:50 cemento puzolana; Bentonita 2%; Agua 5,75 gal/saco, fraguado a presión atmosférica y 80°F)



Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

Figura 40. Efectos de aditivos en la expansión (Cemento API Clase A – Agua 5,2 gal/saco; fraguado a presión atmosférica y 80 °F)



Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965.

Las pruebas fueron realizadas a presión atmosférica y temperatura de 80 °F, por lo tanto, en condiciones de yacimiento aquellas muestras que presentaron expansión incontrolada y deterioro en el experimento puede no presentar el mismo resultado cuando son confinadas en el anular de la tubería y la formación.

## 2.8. ÓXIDO DE MAGNESIO CALCINADO

El  $MgO$  se debe exponer a altas temperaturas (entre 2,012°F y 2,372°F), de forma que la hidratación no ocurra durante la etapa líquida del cemento y pueda ocurrir expansión. La hidratación del  $MgO$  debe comenzar durante la etapa crítica de verificación del cemento para que la expansión de los cristales de óxido de magnesio hidratados compensen el encogimiento plástico y a su vez generen crecimiento volumétrico.

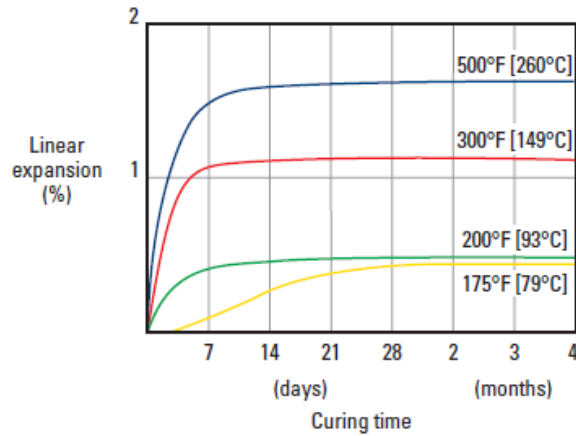
Los cementos que contienen  $MgO$  tienen excelentes cualidades de expansión a temperaturas de fragüe tan altas como 550 °F. Sin embargo, a temperaturas bajas 140°F la reacción de hidratación es demasiado lenta como para ser beneficiosa. La concentración de  $MgO$  requerida para presentar una expansión adecuada van entre 0.25% a 1% BWOC, dependiendo de la temperatura<sup>41</sup>.

La figura 41 muestra los resultados de expansión realizados en un cemento clase G, concentración de 1%  $MgO$  BWOC para diferentes temperaturas, con el fin de determinar el efecto que causa en la muestra.

---

<sup>41</sup> NELSON. Op cit 237 pag.

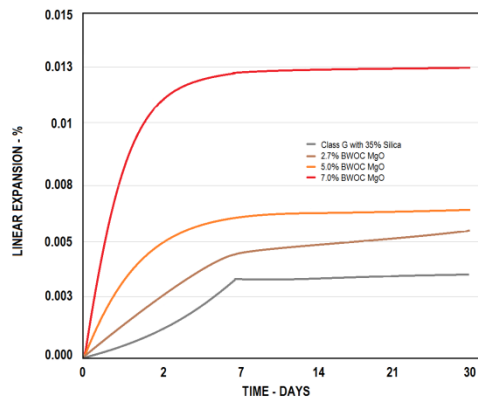
Figura 41. Expansión lineal – Cemento Clase G



Fuente: NELSON, E.B. y GUILLOT, D. Well Cementing. Second edition. Texas. 2006

Adicionalmente, se realizan simulaciones en las cuales se obtienen el valor aproximado de pruebas de expansión lineal y contracción del cemento a condiciones de presión y temperatura de 1,000 psi y 120°F respectivamente a un cemento convencional clase G y 35% BWOC de Silica. El porcentaje de expansión es proporcional a la cantidad de aditivo agregado como muestra la figura 42.

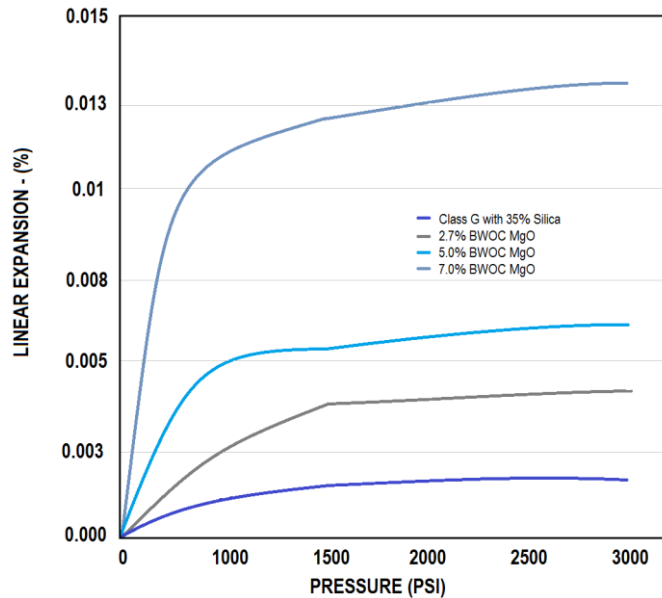
Figura 42. Expansión lineal del óxido de Magnesio con cambio de tiempo (Saidin, Sonny, & Nuruddin, 2008)



Fuente: SAIDIN, S. et al. A new approach of Optimizing Cement design to Eliminate Microannulus in Steam Injection Wells. IPTeC 12407. 2008.

En el caso de estudio presentado por Saidin et al en 2008, se presenta un análisis de sensibilidad al efecto que tiene la presión en la expansión del cemento, el cual se realiza para un ambiente con temperatura baja (120 °F).

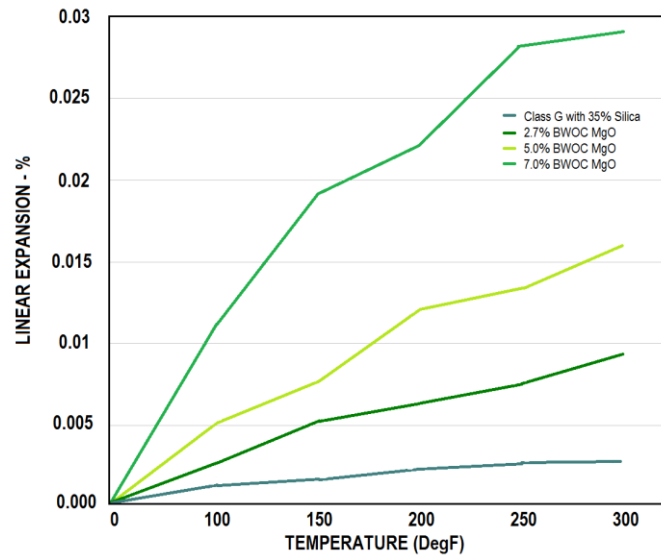
Figura 43. Porcentaje de Expansión Lineal de Oxido de Magnesio con cambio de presión.



Fuente: SAIDIN, S. et al. A new approach of Optimizing Cement design to Eliminate Microannulus in Steam Injection Wells. IPTeC 12407. 2008.

La tercera prueba del experimento se realiza variando la temperatura con una presión de fraguado de 1,000 psi por 48 horas. Los resultados obtenidos, muestran que el óxido de magnesio trabaja eficientemente en condiciones de alta temperatura (180 °F - 300°F), ya que presenta el mayor porcentaje de expansión para las diferentes muestras.

Figura 44. Porcentaje de expansión lineal del Oxido de Magnesio con cambio la temperatura.



Fuente: SAIDIN, S. et al. A new approach of Optimizing Cement design to Eliminate Microannulus in Steam Injection Wells. IPTC 12407. 2008.

En base a las diferentes pruebas realizadas en el estudio de Saidin et al 2008, se puede concluir que el óxido de magnesio como aditivo expansivo presenta mayor grado de expansión en altas concentraciones y temperaturas yacimiento. En el capítulo 0 se establecen las condiciones de yacimiento del pozo tipo con el fin de calcular el grado de expansión esperado.

### 3. GENERALIDADES DEL CAMPO

El área de estudio para la optimización del diseño de una lechada de cementación, corresponde a la cuenca de los Llanos Orientales, localizada en el noreste de Colombia, es una depresión topográfica plana, con alturas que oscilan entre 200 y 500 metros. El límite norte de esta cuenca es la frontera colombo-venezolana; al sur la cuenca se extiende hasta la serranía de la Macarena, el Arco de Vaupés y rocas metamórficas del precámbrico que afloran al sur del río Guaviare; al límite oriental se caracteriza por afloramientos de rocas plutónicas precámbricas del escudo de Guyana y al oeste la cuenca está limitada por el sistema de empuje frontal de la Cordillera Oriental<sup>42</sup>. Cubre una extensión de 225.603  $km^2$  (22.560.327 hectáreas). Está recubierta, en gran parte, por rocas del terciario Superior y Cuaternario. ANH (2012).

---

<sup>42</sup> CASTRO, L. y SERRANO, L. Modelado de sistemas petrolíferos Multi-1D de la Cuenca llanos orientales, Colombia. Bucaramanga 2014. Trabajo de grado (Geólogas). Universidad Industrial de Santander. Facultad Físicoquímicas. Escuela de Geología.

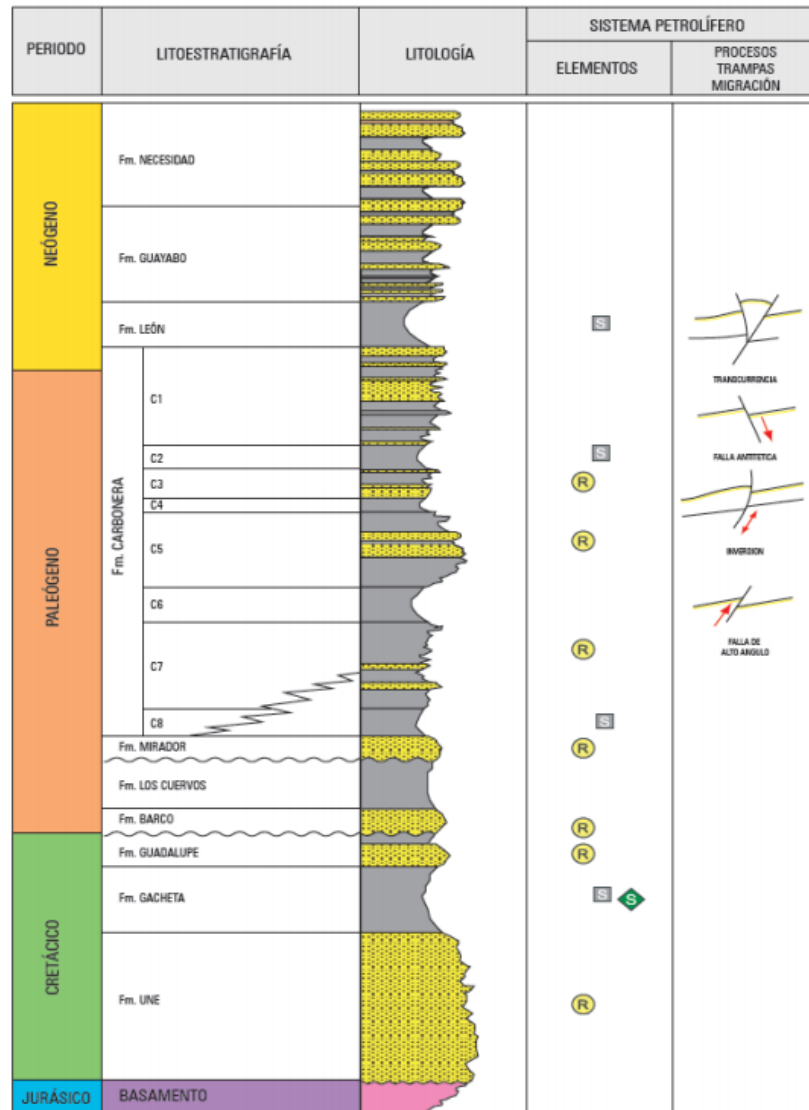
Figura 45. Cuenca Llanos Orientales (Agencia Nacional de Hidrocarburos)



Fuente: Llanos Orientales [En línea][citado 10 de diciembre de 2015] disponible en: < [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20\(pdf\)-Ronda%20Colombia%202010.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20(pdf)-Ronda%20Colombia%202010.pdf)>

La cuenca actual de los Llanos Orientales es una cuenca de ante-país (foreland) desarrollada entre el escudo de Guyana (el Cratón) y la Cordillera Oriental. La columna sedimentaria conocida en la cuenca, a partir de los pozos perforados, está representada en la figura 46.

Figura 46. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca de los Llanos Orientales (Agencia Nacional de Hidrocarburos)



Fuente: Llanos Orientales [En línea] < [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20\(pdf\)-Ronda%20Colombia%202010.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20(pdf)-Ronda%20Colombia%202010.pdf)>

### **3.1. ROCA GENERADORA**

La principal roca generadora en esta área son las lutitas marino-continentales de la formación Gachetá, localizadas por debajo del flanco oriental de la Cordillera Oriental. Estas rocas poseen un kerógeno tipo II y III, rangos de TOC entre 1% y 3% y un espesor efectivo de 50 - 100 metros.

Dos pulsos de migración han sido documentados: el primero durante el Eoceno tardío-Oligoceno y el segundo comenzó en el Mioceno y continúa en la actualidad.<sup>43</sup>

### **3.2. ROCA RESERVORIO**

Las arenitas de las formaciones Carbonera (C-3, C-5 y C-7) y Mirador, de edad paleógeno, son excelentes almacenadoras de hidrocarburos. En la secuencia cretácica algunos intervalos arenosos son también excelentes reservorios. Su rango de porosidad varía entre el 10 al 30%.

### **3.3. ROCA SELLO**

El sello regional de la cuenca es la Formación León. Por otra parte, las unidades C-2, C-4, C-6 y C-8 de la Formación Carbonera son reconocidas como sellos locales, y además las lutitas cretácicas de las formaciones Gachetá y Guadalupe pueden actuar como sellos intraformacionales.

---

<sup>43</sup> ANH. Llanos Orientales [En línea] < [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20\(pdf\)-Ronda%20Colombia%202010.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20(pdf)-Ronda%20Colombia%202010.pdf)>

### **3.4. TRAMPAS**

Hasta el momento, la exploración se ha concentrado en las fallas normales antitéticas. Sin embargo, los anticlinales asociados a fallas inversas y estructuras de bajo relieve, así como las trampas estratigráficas, pueden representar un importante objetivo exploratorio.

### **3.5. ANTECEDENTES DE CEMENTACIÓN**

Con el objetivo de correlacionar el pozo en estudio con otro pozo del mismo campo a condiciones similares como: formaciones productoras, diseño de cementación, diseño del estado mecánico, temperatura y presión de la formación de interés y antecedentes relacionados con problemas en la cementación, se procede a filtrar la información entre varios candidatos y se concluye con un pozo específico del campo, donde se realiza la cementación del liner de 7" acorde con lo planeado en el diseño. Se toma registro de control de calidad de cementación 72 horas después de haber cementado. Se observa un resultado deficiente en la cementación a través de las arenas de interés y por debajo de la base de los perforados programados, no se observa sello hidráulico.

El hueco de 8 ½" presenta un ángulo de inclinación de 50° a la profundidad de 6,800 ft y 85° a la profundidad final de 9,500 ft.

Se perfora con lodo tixotrópico, en el estado mecánico del pozo se tenía diseñado el tope del liner a 6,500 ft y el zapato de 7" a 9,400 ft, adicionalmente se considera un volumen de lechada de cemento hasta 150 ft por encima del tope del colgador del liner, teniendo en cuenta un diámetro de 8.9" + 70% de exceso en el volumen de la lechada, para un total de 150 bls de lechada elástica de 16.0 ppg.

El programa de pre-flujos en la actividad de cementación está conformado por 60 bls de Lavador Químico y 60 bls de espaciador mecánico, la operación se realiza según lo programado, generándose una pobre dispersión del lodo tixotrópico de 9.1 ppg, lo que genera una canalización y contaminación de la lechada elástica, generando un registro deficiente y ausencia total de un sello hidráulico en la formación de interés.<sup>44</sup>

Se decide realizar una cementación remedial para asegurar la integridad del pozo por debajo de la base de los perforados programados.

El poco sello hidráulico presente para este caso en particular, pudo ser prevenido mediante un mejor diseño del lavador químico y espaciador mecánico. Adicionalmente la expansión de la lechada podría ayudar a mejorar la adherencia del cemento al casing y la formación, sin embargo, la eficiencia de ésta, al igual que la lechada elástica, es limitada si es contaminada por el lodo de perforación.

### **3.6. APLICACIÓN DE LECHADA EXPANSIVA**

La experiencia en el campo muestra que los registros sónicos CBL son afectados por la presencia de micro-anillos, los cuales hacen la evaluación del cemento imposible. Por otra parte, los micro-anillos muestran un efecto insignificante en las mediciones de registros ultrasónicos. Con el fin de encontrar una solución a la mala cementación presente en el campo de estudio, se decide implementar una lechada expansiva que permita reducir el impacto generado por los micro-anillos y mejore el sello entre el cemento y casing/formación, evaluando posteriormente la eficiencia de este trabajo y así evitar incurrir en gastos de cementaciones remediales a lo largo del tiempo productivo de los pozos.

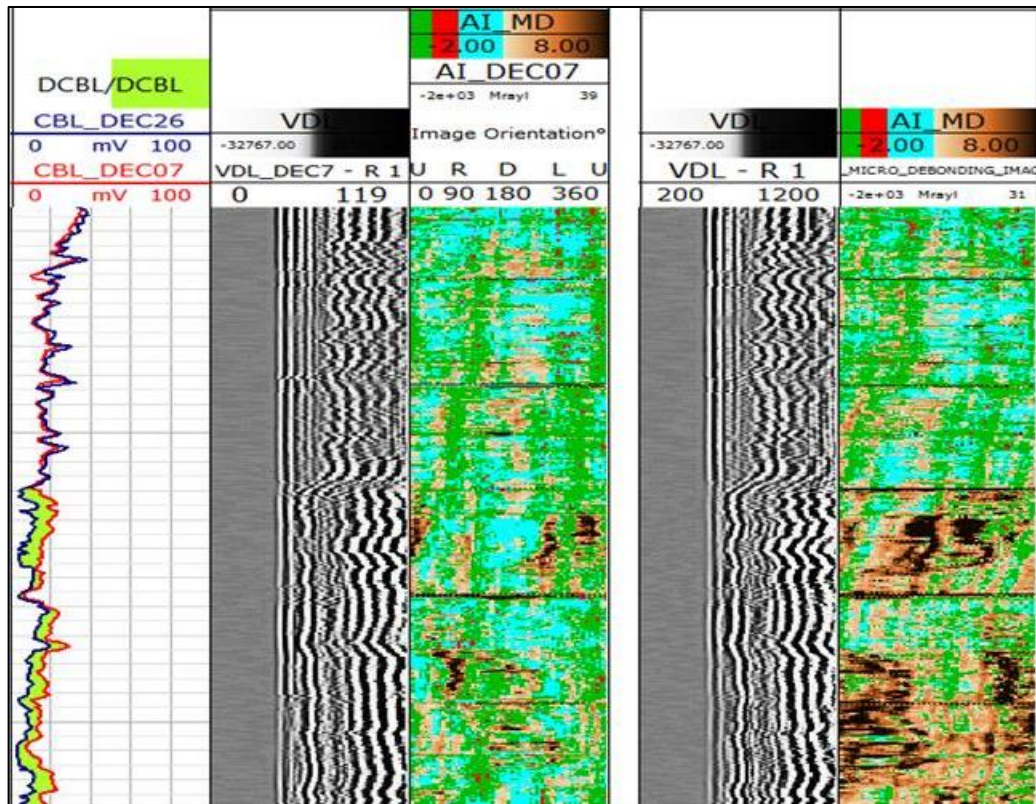
---

<sup>44</sup> ECOPETROL. Informe de investigación, incidente operacional falla de cementación liner 7". Propiedad de Ecopetrol.

Los registros CBL/VDL y USI se corren para el pozo de correlación, en la figura 47 se muestran los resultados obtenidos 72 horas posteriores a la cementación. En el primero que se muestra en la izquierda, la curva del CBL\_DEC07 (curva roja) presenta lecturas con alta amplitud y variable; el registro VDL indica una fuerte llegada del pulso ultrasónico al casing y una débil respuesta de la formación a través de todo el intervalo; el registro tomado con la herramienta USI presenta umbrales de impedancia acústica menores a 3 MRayl aproximadamente.

19 días después se registra nuevamente el intervalo con el fin de determinar el efecto de la expansión de la lechada en el pozo. El CBL presenta amplitudes más bajas y dicha mejora puede observarse por el área verde entre las curvas. Para el mismo intervalo donde la amplitud del CBL es más baja, el VDL en la figura de la derecha indica una llegada más suave al casing y el registro tomado con la herramienta USI muestra tonalidades marrones las cuales corresponden a valores más altos de impedancia acústica.

Figura 47. Cemento Expansivo, mejora en la adherencia del cemento



Fuente: Cement and Pipe integrity Theory. Property of Schlumberger.

Una de las posibles causas de la poca adherencia del cemento expansivo es la pobre remoción del lodo de perforación y/o contaminación, el cual no permite el óptimo rendimiento de la lechada.

## 4. DISEÑO DE CEMENTACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se tienen en cuenta las condiciones de yacimiento presentes en un pozo típico de la región de la Orinoquia Colombiana, realizando el diseño de cementación para la sección de producción con el objetivo de proveer aislamiento zonal en todo el intervalo de hueco abierto que permita la producción de las zonas productoras y proveer soporte e integridad al revestimiento de 7" pulgadas cementándolo completamente hasta el tope del liner.

La sección de producción fue perforada con broca 8 ½" hasta una profundidad de 9,192 ft MD (8,100 ft TVD) con una inclinación final de 60°. El liner se sentará en el revestimiento intermedio de 9 5/8" con un colgador expandible.

La temperatura estática (BHST) usada fue calculada usando el gradiente de temperatura del área: 1,15 °F/100ft. Los cálculos de volumen se realizan considerando el diámetro promedio según el registro Caliper de 8.97" más 70% de exceso. La lechada está compuesta por un cemento clase G y una densidad de lechada de 16 ppg.

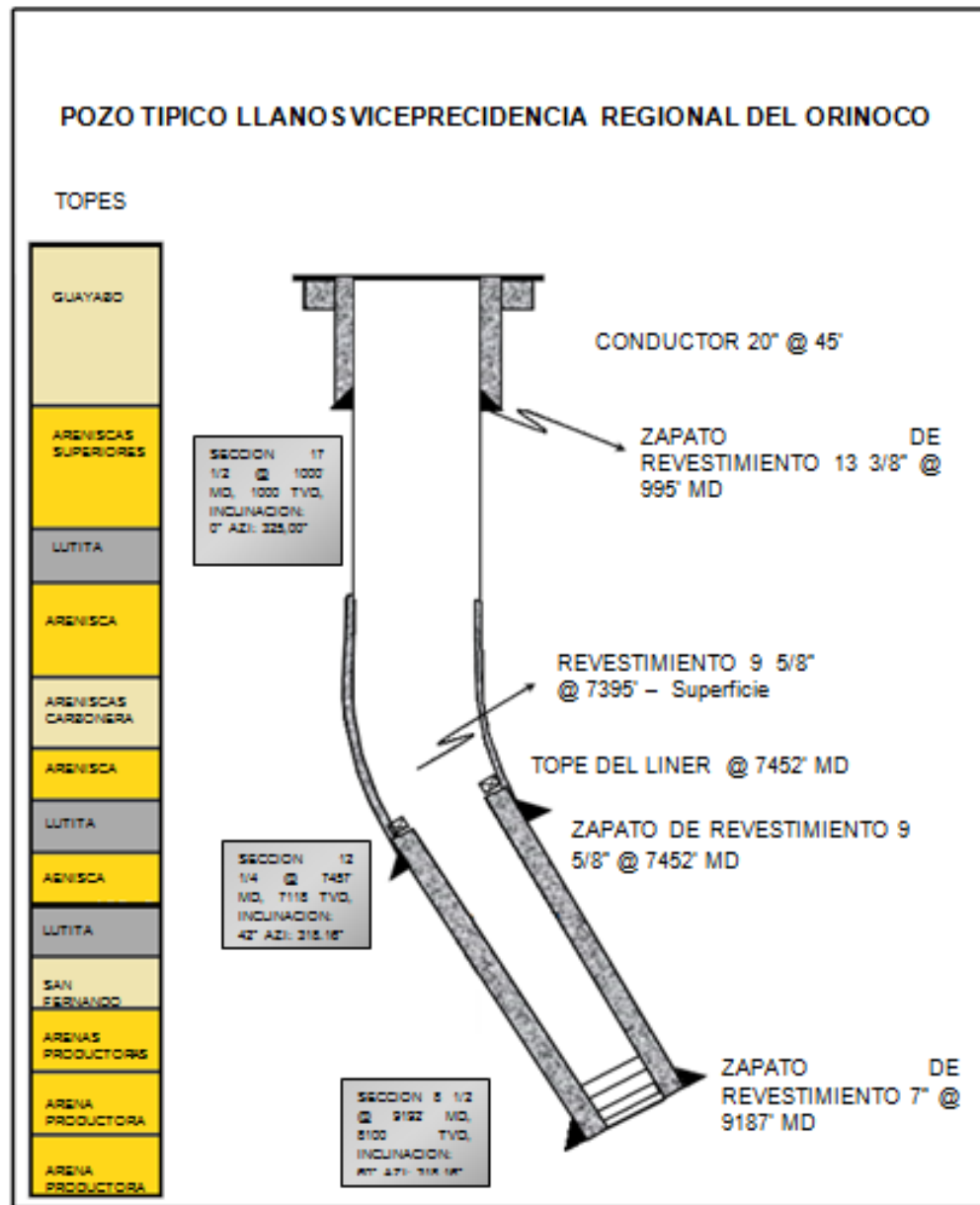
### 4.1. PARÁMETROS DEL DISEÑO

Las propiedades requeridas de la lechada son:

- Tiempo de Bombeabilidad = 6:49 hr.
- Control de filtrado < 50 cc/30min
- Agua libre = 0%.
- Resistencia a la compresión > 2,000 psi en 48 horas.

## 4.2. ESTADO MECÁNICO

Figura 48. Estado mecánico pozo tipo



Fuente: Estado Mecánico pozo tipo diseño Liner de producción 7". Propiedad de Ecopetrol.

### 4.3. BUENAS PRÁCTICAS Y RECOMENDACIONES DE CEMENTACIÓN

**Circulación y acondicionamiento del lodo:** Es importante realizar una buena circulación del pozo antes de realizar la operación, se recomienda circular hasta retornos limpios evidenciando un comportamiento de la presión constante. Después de limpiar el hueco, se recomienda acondicionar el lodo hasta la menor reología posible sin comprometer la estabilidad del pozo, puntualmente un valor de punto de cedencia de 15lbf/100ft<sup>2</sup> es requerido para lodos tixotrópicos.

En el evento de tener altas presiones se recomienda reducir el caudal de bombeo, pero nunca detenerlo.

**Tiempos estáticos:** se recomienda evitar los tiempos estáticos durante la circulación y acondicionamiento del pozo.

**Ayudas mecánicas:** Si las condiciones del pozo lo permiten, se recomienda rotar el liner a 10 rpm – 15 rpm durante el proceso de acondicionamiento y cementación de la sección.

**Pérdidas de Circulación:** Se recomienda de que en caso de tener pérdidas de circulación, es que estas sean curadas en su totalidad antes de realizar el trabajo de cementación, ya que bajo este panorama puede verse afectada la calidad de la cementación y el tope requerido para la lechada. La realización de la operación bajo estas condiciones será responsabilidad y decisión del cliente.

En el evento de tener presiones altas por posible empaquetamiento, reducir caudal de bombeo paulatinamente hasta tener presión estable. Reducir riesgo de inducir perdidas.

Uso de Fibra para control de pérdidas en la lechada a una concentración de 1 lb/bbl.

**Resistencia a la compresión:**

Resistencia a la compresión mínima para limpiar el cemento en el tope del Liner es 1,000 psi.

Resistencia a la compresión mínima para limpiar cemento dentro del liner es de 2,000 psi.

Resistencia a la compresión mínima para corrida de registros es de 3,000 psi.

**4.4. INTERVALOS DEL POZO**

Casing	Longitud (ft)	Diámetro Externo (in)	Diámetro Interno (in)
1	3,585	9.625	8.755
2	3,825	9.625	8.681
Liner Producción	1,711	7	6.184

Sarta	Longitud (ft)	Diámetro Externo (in)	Diámetro Interno (in)
Drill Pipe 5"	6,433	5	4.276
HWDP 5"	760	5	3

Sección	Longitud (ft)	Diámetro de la Broca (in)	Diámetro promedio Caliper (in)
Open Hole	1,491	8 1/2	8.97

Fuente: Estado Mecánico pozo tipo diseño Liner de producción 7". Propiedad de Ecopetrol.

## 4.5. CÁLCULOS VOLUMÉTRICOS

El volumen total para la lechada será calculado usando el diámetro promedio obtenido del registro Caliper para la sección de 8.97” más un exceso del 70%.

### 4.5.1. Volumen de lechada

$$\text{Capacidad Anular, Bbl/pie} = \frac{D_H^2 - OD_{TR}^2}{1029,4} \quad \text{Ec. ( 15)}$$

$$\text{Volumen} = \text{Capacidad}_{\text{Anular}} \times H \quad \text{Ec. ( 16)}$$

### 4.5.2. Volumen anular

$$\text{Capacidad Anular} = \frac{8,97^2 - 7^2}{1029,4} = 0,03056236 \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \quad \text{Ec. ( 17)}$$

$$\text{Volumen} = 0,03056236 \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} * 1486 \text{ ft} = 45,42 \text{ bbl} \quad \text{Ec. ( 18)}$$

### 4.5.3. Exceso

$$\text{Volumen} = 45,42 \text{ bbl} * 0,7 = 31,79 \text{ bbl} \quad \text{Ec. ( 19)}$$

### 4.5.4. Traslape

$$\text{Capacidad Anular} = \frac{8,681^2 - 7^2}{1029,4} = 0,0256069 \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \quad \text{Ec. ( 20)}$$

$$Volumen = 0,0256069 \frac{bbl}{ft} * 224,14 ft = 5,75 bbl \quad \text{Ec. ( 21)}$$

#### 4.5.5. Cement on TOL

$$Capacidad Anular = \frac{8,681^2}{1029,4} = 0,07320746 \frac{bbl}{ft} \quad \text{Ec. ( 22)}$$

$$Volumen = 0,07320746 \frac{bbl}{ft} * 150 ft = 10,98 bbl \quad \text{Ec. ( 23)}$$

#### 4.5.6. Shoe Track

$$Capacidad Anular = \frac{6,184^2}{1029,4} = 0,0371496 \frac{bbl}{ft} \quad \text{Ec. ( 24)}$$

$$Volumen = 0,0371496 \frac{bbl}{ft} * 84,05 ft = 3,12 bbl \quad \text{Ec. ( 25)}$$

#### 4.5.7. Volumen detrás del Pump Down Plug

$$Volumen = 2,0 bbl \quad \text{Ec. ( 26)}$$

#### 4.5.8. Volumen Total

<b>Exceso</b>	31,71 bbl
<b>Traslape</b>	5,75 bbl
<b>Cement on TOL</b>	10,98 bbl
<b>Shoe Track</b>	3,12 bbl
<b>Volumen detrás del Pump Down Plug</b>	2,0 bbl
<b>Volumen total lechada Principal</b>	99,05 bbl

Para este caso en particular se maneja una densidad de lechada de 16 ppg se tiene el siguiente rendimiento del cemento:

$$Rto_{Agua} = \frac{Densidad_{Lechada} \left[ \frac{94}{Densidad_{Lechada}} - \frac{94}{SG_{cemento} \times 8,33} \right]}{(Densidad_{Lechada} - 8,33)} \quad \text{Ec. ( 27)}$$

$$Rto_{Agua} = \frac{16 \left[ \frac{94}{16} - \frac{94}{3,14 \times 8,33} \right]}{(16 - 8,33)} \quad \text{Ec. ( 28)}$$

$$Rto_{Agua} = 4,7587 \text{ gal/saco} \quad \text{Ec. ( 29)}$$

Con el requerimiento de agua se halla el volumen de la lechada, para luego hallar el rendimiento de la lechada.

$$\begin{aligned} & Vol_{Lechada} \left( \frac{gal}{saco} \right) \\ &= \frac{94 (lb)}{SG_{cemento} \times 8,33 \text{ lb/gal}} + \frac{94 (lb)}{SG_{Aditivos} \times 8,33 \text{ lb/gal}} \\ &+ Rto_{Agua} \end{aligned} \quad \text{Ec. ( 30)}$$

$$Vol_{Lechada} \left( \frac{gal}{saco} \right) = \frac{94}{3,14 \times 8,33} + 4,7587 \quad \text{Ec. ( 31)}$$

$$Vol_{Lechada} = 8,3525 \frac{gal}{saco} \quad \text{Ec. ( 32)}$$

#### 4.5.9. Rendimiento de la lechada (pie<sup>3</sup>/saco)

$$Rendimiento_{Lechada} \left( \frac{ft^3}{saco} \right) = \frac{Vol_{lechada} \left( \frac{Gal}{saco} \right)}{7,48 \left( \frac{gal}{pie^3} \right)} \quad \text{Ec. ( 33)}$$

$$Rendimiento_{Lechada} = \frac{8,3525}{7,48} = 1,1166 \left( \frac{ft^3}{saco} \right) \quad \text{Ec. ( 34)}$$

#### 4.5.10. Sacos de cemento requeridos

$$\#Sacos = \frac{Volumen_{Lechada} (ft^3)}{Rendimiento_{Lechada} (ft^3/Saco)} \quad \text{Ec. ( 35)}$$

Teniendo:

Volumen de Lechada Principal = 99,05 bbl = 556,165  $ft^3$

$$\# Sacos = \frac{556,165}{1,1166} = 498,0738 sacos \quad \text{Ec. ( 36)}$$

#### 4.6. VOLUMEN DE DESPLAZAMIENTO

$$Volumen_{Desplazamiento} (Bls) = Longitud_{DP} (pies) \times Capacidad_{DP} \quad \text{Ec. ( 37)}$$

$$Capacidad_{DP} (Bls/pie) = \frac{ID_{DP}^2}{1029,4} \quad \text{Ec. ( 38)}$$

##### 4.6.1. Desplazamiento con Drill Pipe 5"

$$Capacidad_{DP} = \frac{(4,211)^2}{1029,4} = 0,017226 \left( \frac{bbl}{ft} \right) \quad \text{Ec. ( 39)}$$

$$Volumen_{Desplazamiento} = 6433,67 \times 0,017226 bbl = 110,8269 bbl \quad \text{Ec. ( 40)}$$

#### 4.6.2. Desplazamiento con HWDP 5"

$$Capacidad_{DP} = \frac{(3)^2}{1029,4} = 0,008743 \left( \frac{bbl}{ft} \right) \quad \text{Ec. ( 41)}$$

$$Volumen_{Desplazamiento} = 760,67 \times 0,008743 \text{ bbl} = 6,65 \text{ bbl} \quad \text{Ec. ( 42)}$$

#### 4.6.3. Desplazamiento en el Liner 7"

$$Capacidad \text{ Anular} = \frac{6,184^2}{1029,4} = 0,0371496 \frac{bbl}{ft} \quad \text{Ec. ( 43)}$$

$$Volumen = 0,0371496 \frac{bbl}{ft} * 1710,19 \text{ ft} = 63,5329 \text{ bbl} \quad \text{Ec. ( 44)}$$

#### 4.6.4. Shoe Track

$$Capacidad \text{ Anular} = \frac{6,184^2}{1029,4} = 0,0371496 \frac{bbl}{ft} \quad \text{Ec. ( 45)}$$

$$Volumen = 0,0371496 \frac{bbl}{ft} * 84,05 \text{ ft} = 3,12 \text{ bbl} \quad \text{Ec. ( 46)}$$

#### 4.6.5. Volumen Total

<b>Desplazamiento con Drill Pipe 5"</b>	<b>110,82 bbl</b>
<b>Desplazamiento con HWDP 5"</b>	<b>6,65 bbl</b>
<b>Desplazamiento en el Liner 7"</b>	<b>63,53 bbl</b>
<b>Shoe Track</b>	<b>- 3,12 bbl</b>
<b>Volumen de desplazamiento</b>	<b>177,88 bbl</b>
<b>Volumen de desplazamiento + ½ Shoe Track</b>	<b>179,44 bbl</b>

## 5. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

Los materiales usados para la fabricación del Clinker del cemento Portland deben contener las cantidades apropiadas de Calcio, Silica, Aluminio, y componentes del acero. En presencia de cantidades que excedan un 0,5 wt% de magnesio se puede conducir a un desarrollo de cristales de alita excesivamente grandes, los cuales pueden retardar el desarrollo de la fuerza a la compresión. Magnesio excesivo (más de 5%) puede causar una expansión retardada del cemento fraguado.

Los cloruros son limitados al 0,015%, porque al ser significativamente volátiles, pueden causar serias dificultades en la zona de llama en el horno industrial. La presencia de más de 0,1% de flúor, usualmente como fluoruro de calcio, resulta en un decremento significativo en la resistencia a la compresión del cemento. Los fosfatos pueden tener un efecto benéfico en la fuerza del cemento a un nivel de 0,2 – 0,25%, sin embargo, tiene un efecto dañino en concentraciones que exceden el 0,5%.<sup>45</sup>

Teniendo en cuenta las limitantes presentadas anteriormente, se inicia el proceso de discretización de los cementos y aditivos con mejores propiedades para ser empleados a las condiciones requeridas para la cementación del pozo en estudio. Los cementos API clase D, G y H pasan el primer filtro debido a la profundidad establecida de 8,100ft TVD. Para el segundo filtro y en base a la tabla 9 (Propiedades de típicas de los cementos API) y Tabla 10 (Ficha técnica de los estándares manejados para la cuenca de los llanos orientales), se establece que el cemento tenga un porcentaje de  $C_3A$  igual o mayor a 3%, puesto que dicha

---

<sup>45</sup> NELSON. Op cit 25 pag.

concentración favorece en gran medida al desarrollo de expansión del cemento. En ese orden de ideas, los cementos Clase G y H pasan a la siguiente etapa ya que contienen un porcentaje del 5% de  $C_3A$  frente a un 2% de  $C_3A$  presente en el cemento clase D.

Tabla 8. Propiedades típicas de los cementos Portland API

Propiedades típicas de los cementos portland API					
Clase API	$C_3S$ %	$C_2S$ %	$C_3A$ %	$C_4AF$ %	Superficie Especifica* $cm^2/g$
<b>A</b>	53	24	8	8	1,500 – 1,900
<b>B</b>	47	32	5	12	1,500 – 1,900
<b>C</b>	58	16	8	8	2,000 – 2,800
<b>D &amp; E</b>	26	54	2	12	1,200 – 1,600
<b>G &amp; H</b>	50	30	5	12	1,400 – 1,700

Fuente: MICHAUX, M. NELSON, E. VIDICK, B and SAINT, F. Well Completion. Cement Chemistry and Additives. Oilfield Review. [en línea] [citado 10 de diciembre de 2015] disponible en: <[http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors89/apr89/2\\_cement.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors89/apr89/2_cement.pdf)>

Tabla 9. Especificaciones técnicas del cemento Petrolero clase G Argos

Componente	Designación estándar	Rango aceptable
<b>Aluminato tricálcico</b>	$C_3A$	3 %Max
<b>Silicato tricálcico</b>	$C_3S$	48-65%
<b>Ferro-aluminato tetracálcico</b>	$C_4AF$	24%
<b>Residuo Insoluble</b>	<i>R.I</i>	0,75%

Fuente: ARGOS. Cemento Petrolero Clase G. [en línea] [citado 10 de diciembre de 2015] disponible en: <<http://www.argos.co/Media/Colombia/images/Cemento%20petrolero.pdf>>

---

\* La medida de la finura, se expresa por el área superficial de las partículas contenidas en un gramo de material, lo cual se denomina “superficie específica”

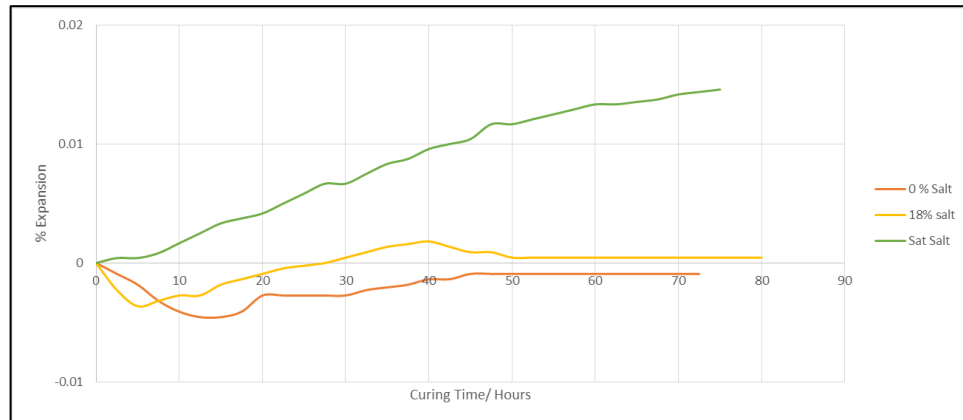
Finalmente para la tercera etapa de selección y en base a la literatura investigada, se toman como referencia los aditivos propuestos buscando los candidatos que muestren un significativo comportamiento en expansión a condiciones lo más cercanas posible a las del pozo en estudio y adicionalmente que se hallan probado en lechadas con alguno de los dos cementos que previamente se seleccionaron (Cementos Clase G y H). Al realizar dicha selección se obtienen dos aditivos que se ajustan a las características requeridas y son: el Óxido de Magnesio  $MgO$  y la sal  $NaCl$ .

A continuación se realiza un análisis de sensibilidad a cada aditivo con el fin de determinar la máxima concentración aplicable a la lechada sin afectar propiedades como la resistencia a la compresión necesaria para mantener la integridad del pozo, factibilidad operativa a largo y corto plazo, posibles antecedentes de reactividad al entrar en contacto con otros compuestos, entre otras a fin de optimizar el diseño de las lechadas expansivas.

### **5.1. SAL**

Como se presentó en la sección de aditivos propuestos, la sal es un aditivo versátil de fácil acceso, al evaluar el comportamiento expansivo a condiciones de presión y temperatura del pozo tipo, es necesario saturar el cemento para obtener un porcentaje de expansión significativo, tal como se observa en la figura 49. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 49. Efecto de la Sal en el Cemento clase G, 35% Silica, 42% Agua, Sal, 3000 psi, 200°F



Fuente: Modificada de BEIRUTE. R. and TRAGESSER. A.; Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements under Actual Well Conditions. Paper SPE 4091. 1973

Con el fin de ajustar los valores de expansión de las pruebas presentadas por BEIRUTE. R. y TRAGESSER (1973) las condiciones del pozo tipo, se realiza un ajuste y se correlacionan las propiedades mediante la interpolación de los valores experimentales para obtener valores teóricos en condiciones de fondo.

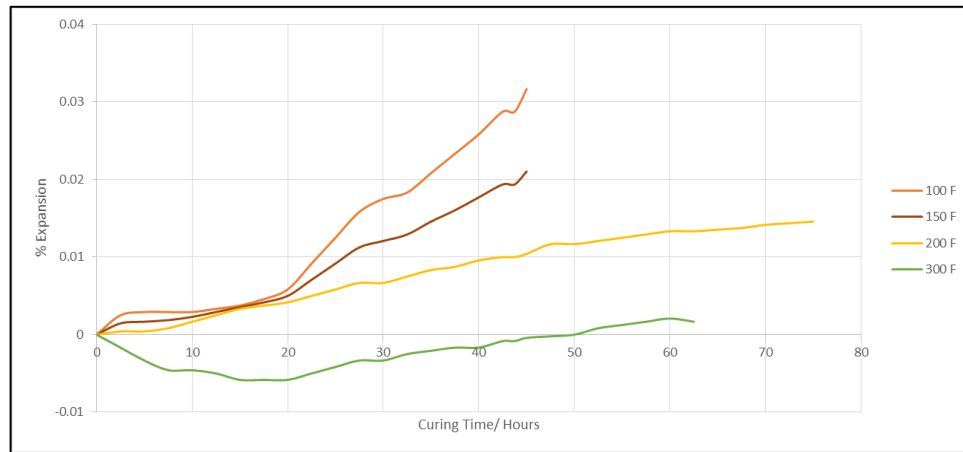
El primer ajuste se realiza para la obtención de la temperatura de los datos a temperatura de yacimiento, la cual es 150°F.

En la figura 32 mostrada en el capítulo 2 se observa el efecto de la temperatura para la misma muestra de cemento, a una presión constante, la cual es 3,000 psi. Dicha muestra se sometió a temperaturas de 100°F, 200°F y 300°F. Mostrando una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el porcentaje de expansión para la sal.

Con las curvas de 100 °F y 200 °F se realiza la construcción de una tercera curva a 150°F, la cual se calcula como el promedio de las dos curvas de forma que

represente tendencias similares. En la figura 50 se observa la curva creada a 150 °F y a una presión de 3,000 psi, la cual aún no ajusta a las condiciones de yacimiento.

Figura 50. Interpolación de Temperatura Cemento API Clase G

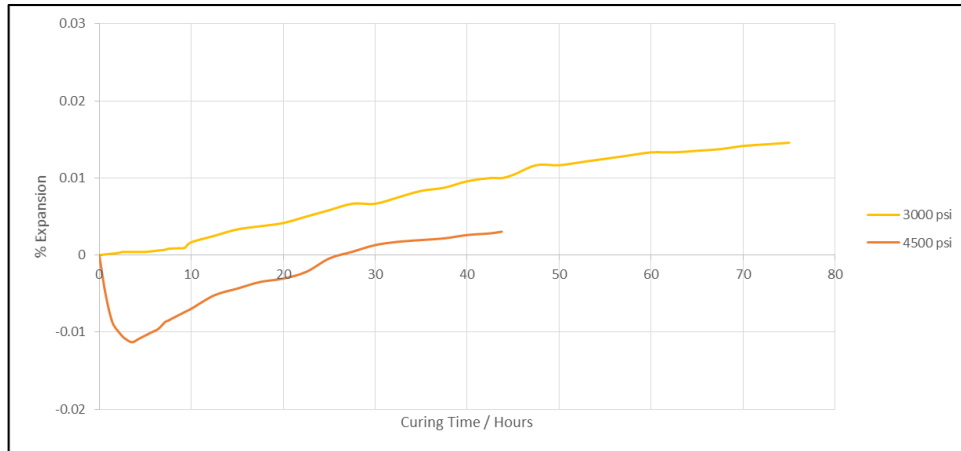


Fuente: Autores

El siguiente paso realizado fue tomar las curvas presentadas en la figura 33; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mostrada en el capítulo 2, en la cual se presenta el comportamiento de la muestra a medida que se varía la presión. Dicha prueba solo se realizó para las presiones de 3,000 psi y 4,500 psi a una temperatura de 200 °F.

Al igual que la temperatura, la presión presenta una relación inversamente proporcional al porcentaje de expansión obtenido por la sal.

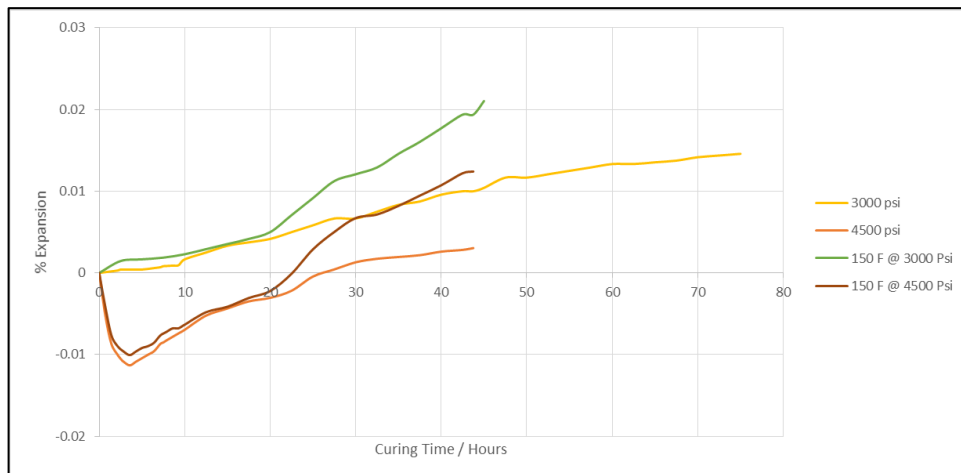
Figura 51. Efecto de la presión sobre la sal



Fuente: Autores

La curva amarilla a 3,000 psi presente en la figura 51 es la misma curva graficada en la figura 50 a la temperatura de 200 °F. De esta forma, se grafica la curva creada a 150 °F y 3,000 psi con el fin de observar el comportamiento que tiene la temperatura a una misma presión y replicar el comportamiento para la curva con presión de 4,500 psi.

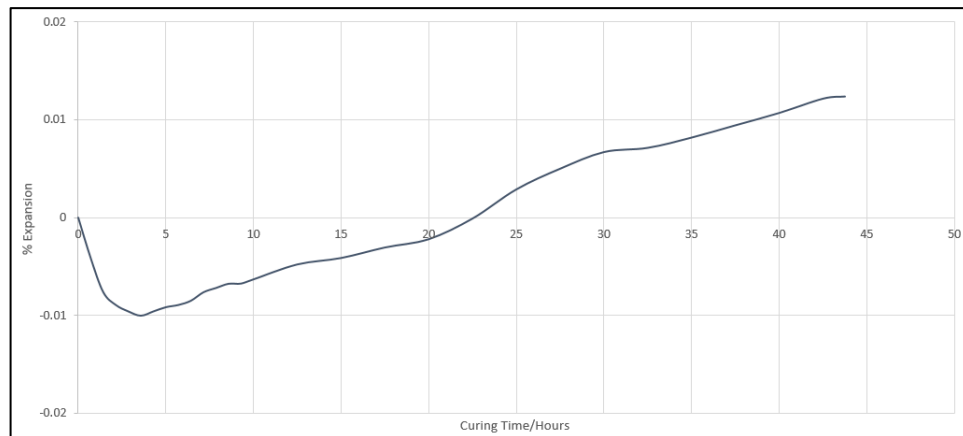
Figura 52. Ajuste de las temperaturas



Fuente: Autores

La figura 52 muestra el comportamiento aproximado esperado para las curvas de 3,000 psi y 4,500 psi a una temperatura de 150 °F. Dichas curvas se obtienen mediante el aumento de porcentaje de expansión esperado para una temperatura menor. Como resultado final se obtiene la curva presentada en la figura 53, la cual muestra el comportamiento de la expansión esperado para la lechada de cemento en las primeras 45 horas después de ser emplazada en el pozo. Para tiempos mayores se espera que el porcentaje de expansión se estabilice en un valor cercano a 0.013 %

Figura 53. Porcentaje de expansión teórico para el Cemento clase H, 35% Silica, 42% Agua, 4500 psi, 150°F



Fuente: Autores

## 5.2. OXIDO DE MAGNESIO CALCINADO

Basados en la investigación realizada se pueden establecer tres comportamientos principales de acuerdo a tres variables diferentes con respecto a la expansión las cuales son la temperatura, presión y la concentración. Cada uno de ellos tiene una relación proporcional o inversamente proporcional al porcentaje de expansión

esperado. Es decir, la temperatura y la concentración de aditivo son directamente proporcionales al grado de expansión, mientras que a mayor presión, la expansión disminuye.

En base a estos tres variables se realiza la correlación de datos investigados de artículos científicos con las condiciones reales del pozo en estudio. Partiendo de la base teórica investigada a cerca del Oxido de Magnesio ( $MgO$ ), se tienen los resultados de las pruebas realizados a un cemento Clase G con 35% Silica y se comparó el comportamiento en la expansión de la lechada sin aditivo expansivo y diferentes concentraciones como se muestra en la tabla 10 .

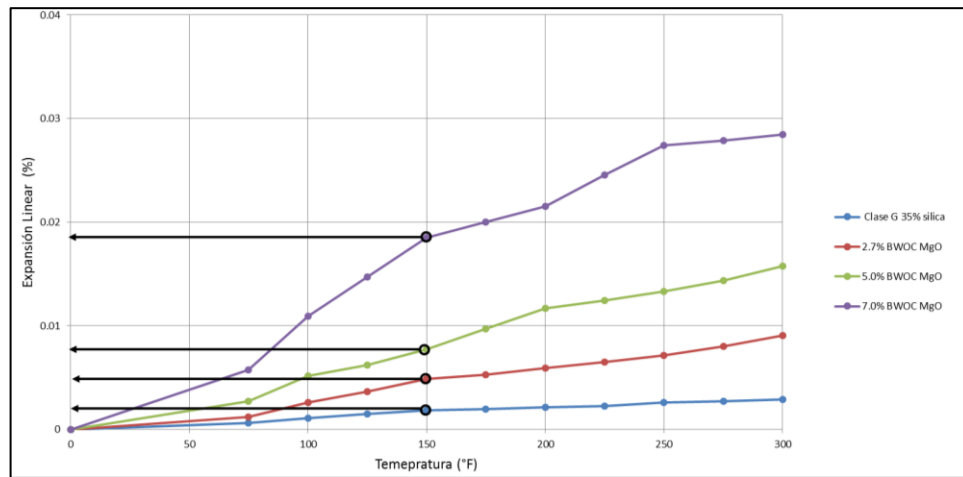
Tabla 10. Concentraciones de  $MgO$

Muestra	Composición
1	Cemento Clase G, 35% Silica (Base)
2	(Base) + 2.7% de $MgO$
3	(Base) + 5.0% de $MgO$
4	(Base) + 7.0% de $MgO$

Fuente: SAIDIN, S. et al. A new approach of Optimizing Cement design to Eliminate Microannulus in Steam Injection Wells. IPTeC 12407. 2008.

La figura 54 muestra el comportamiento de la expansión después de 2 días de fraguado para diferentes muestras variando la concentración de  $MgO$  y diferentes temperaturas a una presión constante de 1,000 psi.

Figura 54. Porcentaje de expansión lineal del Oxido de Magnesio con cambio la temperatura

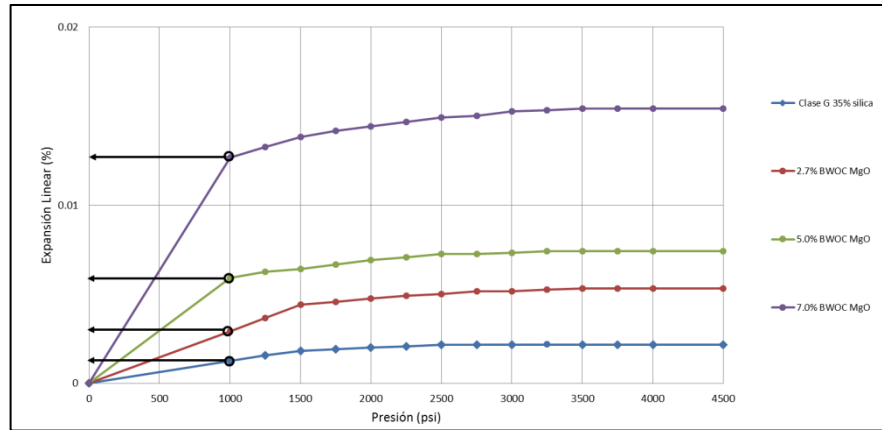


Fuente: Autores

El comportamiento es el esperado, ya que al aumentar la temperatura y la concentración, directamente proporcional aumenta el grado de expansión lineal. Para correlacionar los datos de la gráfica con las condiciones de temperatura y presión del pozo, seleccionamos los puntos que estén sobre la línea de 150°F (BHST del pozo) y determinamos el valor de expansión correspondiente a esa temperatura y a cada concentración.

La figura 55 muestra el efecto que tiene la presión en la expansión para el  $MgO$  a una temperatura constante de 120 °F, estas mediciones son realizadas a 2 días de fraguado. Para realizar el ajuste a las condiciones del pozo en estudio es necesario tener las diferentes curvas a 150°F, es por esto que se relacionan los valores resaltados en la figura 54 con aquellos encerrados en la figura 55, ya que ambos valores se encuentran a una presión de 1,000 psi. Se halla un factor de aumento de la expansión lineal entre las dos curvas, con el fin de simular las curvas de la figura 55 a con temperatura constante de 150°F.

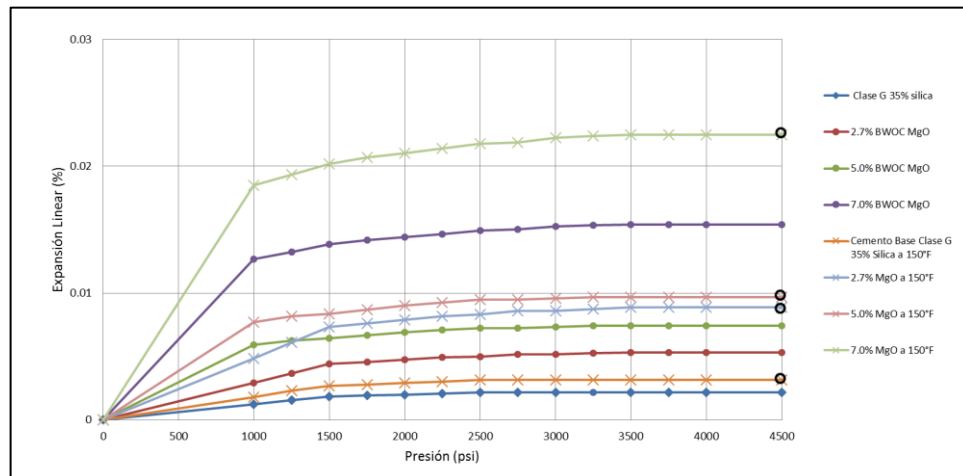
Figura 55. Efecto de la presión en el cemento a temperatura constante



Fuente: Autores

En la figura 56 se observa el efecto que tiene la temperatura para cada uno de las curvas, se realiza una comparación entre las curvas a 120 °F, las cuales pertenecen a los valores encontrados en la literatura y las curvas interpoladas a 150°F. Entre las dos curvas se observa un aumento en el porcentaje de expansión debido a la nueva temperatura de prueba. Ahora, con las nuevas curvas tomo los valores obtenidos a 150°F y 4,500 psi para cada una de las concentraciones.

Figura 56. Efecto de la presión para el *MgO*

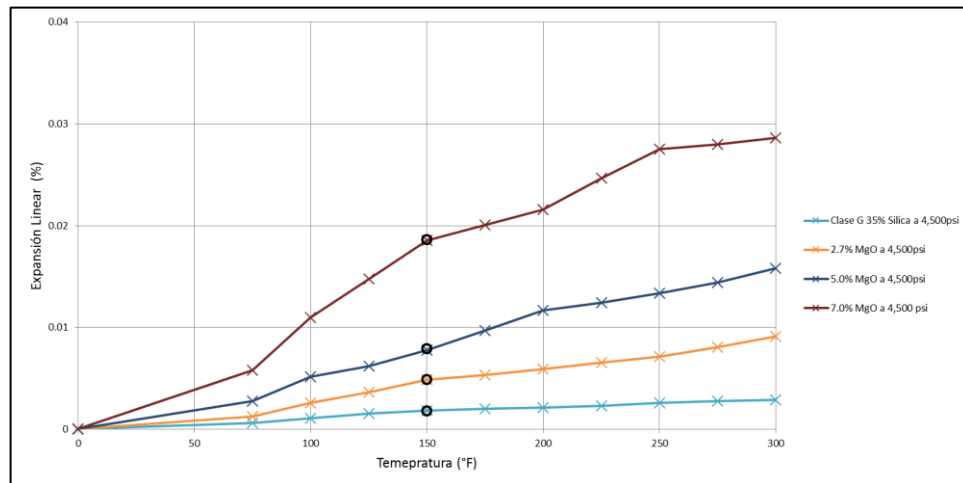


Fuente: Autores

Al ubicar los puntos de la figura 56 que ya estaban a 4,500psi sobre la línea de 150°F quedarían ajustados a las condiciones de pozo para una prueba de dos días, seguidamente repetimos el proceso de hallar el factor de aumento y simular el comportamiento a de cambios de temperatura para cada concentración como se muestra en la gráfica anterior.

Se puede observar en la figura 57 que el aumento en expansión es muy poco para las condiciones de yacimiento del pozo tiempo comparado con los posibles resultados a temperaturas mayores. Estos resultados reafirman los conceptos obtenidos por la literatura investigada para el *MgO* la cual establece que los cambios significativos en volumen son alcanzados a temperaturas iguales o mayores 300°F y a bajas presiones.

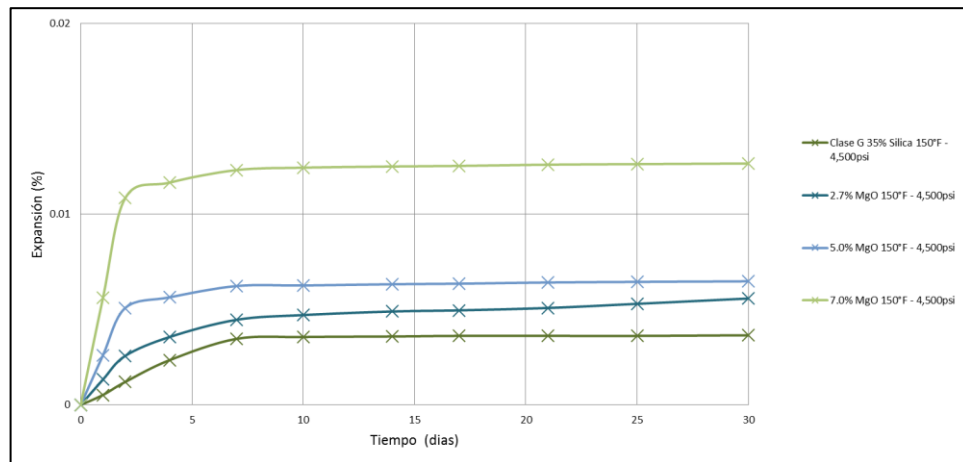
Figura 57. Efecto de la temperatura a 4500 psi



Fuente: Autores

A diferencia de la expansión producida por la sal, el óxido de magnesio requiere de más tiempo para estabilizar un porcentaje de expansión, tal como se muestra en la figura 42, ajustando esta figura a las condiciones de yacimiento del pozo tipo se tiene la figura 58 la cual modela el comportamiento de la lechada de cemento en un intervalo de tiempo hasta de 30 días después de fragüe.

Figura 58. Porcentaje de expansión del Oxido de Magnesio con el tiempo a 150°F y 4500 psi



Fuente: Autores

De los valores obtenidos mediante la correlación de las pruebas en los papers y las condiciones de yacimiento del pozo estudio para cada uno de los aditivos, se obtienen los valores presentes en la tabla 11, el cemento utilizado para el estudio es clase G con 35% Silica, el cual por si solo no presenta efecto de encogimiento a las condiciones de yacimiento.

Tabla 11. Porcentaje de expansión lineal después de 30 días de fraguado a 150°F y 4,500 psi

Porcentaje de Expansión Lineal	Aditivo				
	Sin Aditivo	Sal	Óxido de Magnesio		
		Saturado	2.7%	5%	7 %
	0.0036	0.0067	0.0055	0.0064	0.0126

Fuente: Autores

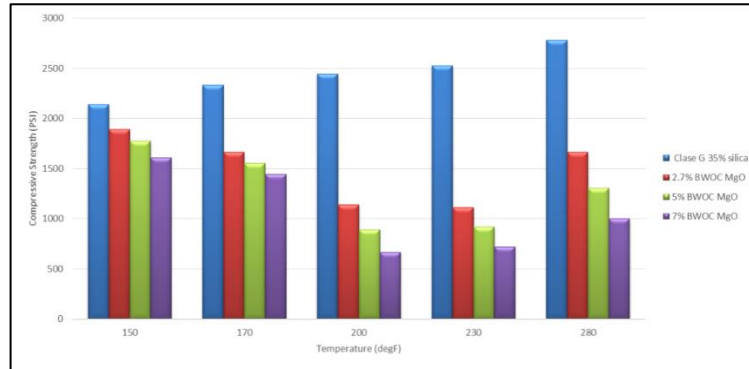
Al comparar cada uno de los diferentes porcentajes de expansión, se observa que la lechada de cemento saturada de sal se expande el doble que el cemento sin aditivo. El óxido de magnesio con 2.7 % en concentración presenta el menor grado de expansión en comparación a las demás muestras con aditivo. Sin embargo,

para obtener el mejor diseño de lechada, no es suficiente con escoger la muestra con mayor grado de expansión, ya que al aumentar la concentración del aditivo se está contaminando el cemento en cierto grado, es decir, es necesario establecer un punto de equilibrio en el cual la adición de aditivo expansivo no altere en gran medida las demás propiedades de la lechada.

Con el fin de tomar un segundo criterio de evaluación para optimizar el diseño de la lechada, se evalúa la resistencia a la compresión de las muestras mediante los resultados y el efecto de la concentración de los aditivos.

En la figura 59 se tiene una gráfica que involucra tres variables que afectan el diseño de manera particular y de la interacción de las mismas, depende en gran parte la selección del aditivo y son: la temperatura, concentración de aditivo y resistencia a la compresión. Al observar la gráfica se pueden determinar tendencias claras como lo son que a medida que aumenta la concentración de aditivo, disminuye el valor de resistencia a la compresión, además para las muestras que se le adiciona *MgO* muestran un detrimento en la resistencia a la compresión hasta temperaturas cercanas o iguales a 230°F, después inicia un incremento de los esfuerzos compresivos, comportamientos totalmente diferentes al de la lechada base (sin aditivo expansivo), puesto que la resistencia a la compresión aumenta directamente proporcional al aumento de temperatura, haciéndose cada vez más grande la diferencia de dichos valores comparados con los que exhiben las muestras que tienen *MgO*.

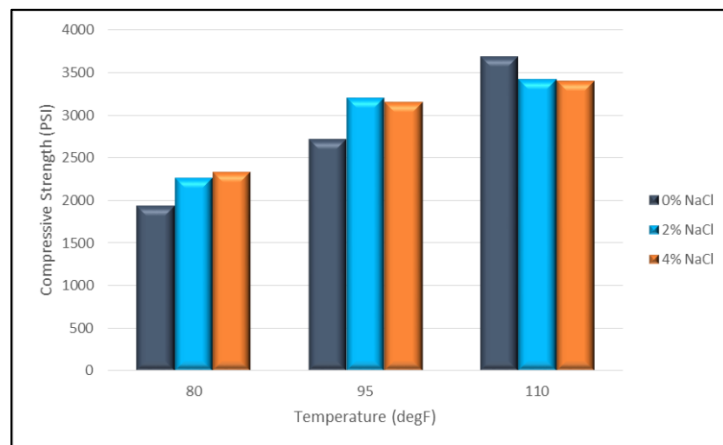
Figura 59. Efecto de la temperatura y concentración de  $MgO$  en la resistencia de la compresión del cemento



Fuente: SAIDIN, S. et al. A new approach of Optimizing Cement design to Eliminate Microannulus in Steam Injection Wells. IPTeC 12407. 2008.

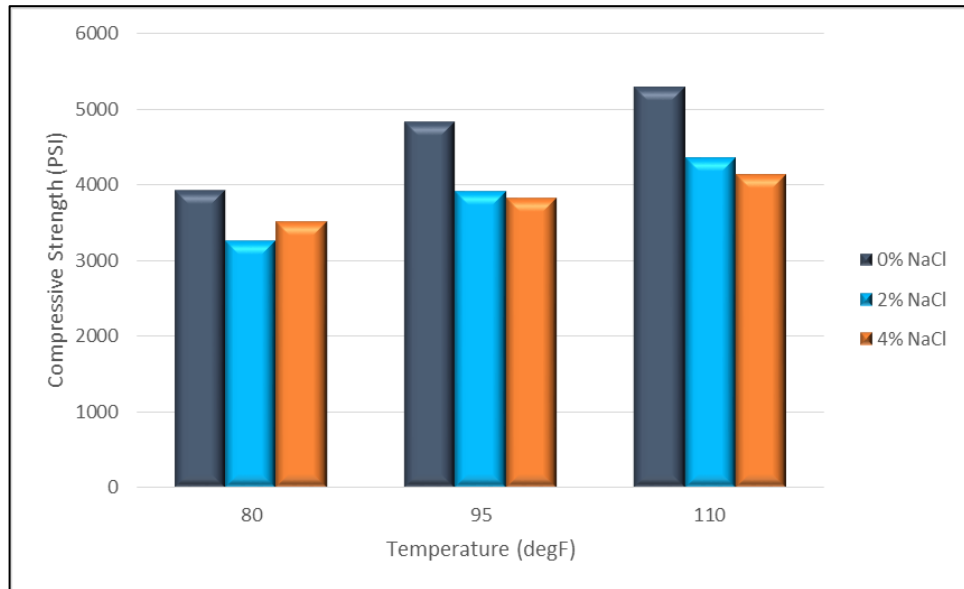
En el caso de la sal, en la literatura no se encontró una prueba que ajuste exactamente con la temperatura de yacimiento y tipo de cemento a la vez, es por esto que se relaciona el comportamiento de dos pruebas diferentes; la primera prueba es realizada a un cemento API clase A, 24 y 48 horas después del fraguado, como se muestra en la figura 60 y figura 61

Figura 60. Efecto de la temperatura y concentración de sal en la resistencia a la compresión a 24 horas después de fraguado



Fuente: Smith, D. K. Cementing. Society of Petroleum Engineers. Second Edition. United State of America. Society of Petroleum Engineers Inc. 1990.

Figura 61. Efecto de la temperatura y concentración de la sal en la resistencia a la compresión a 48 horas después del fraguado.

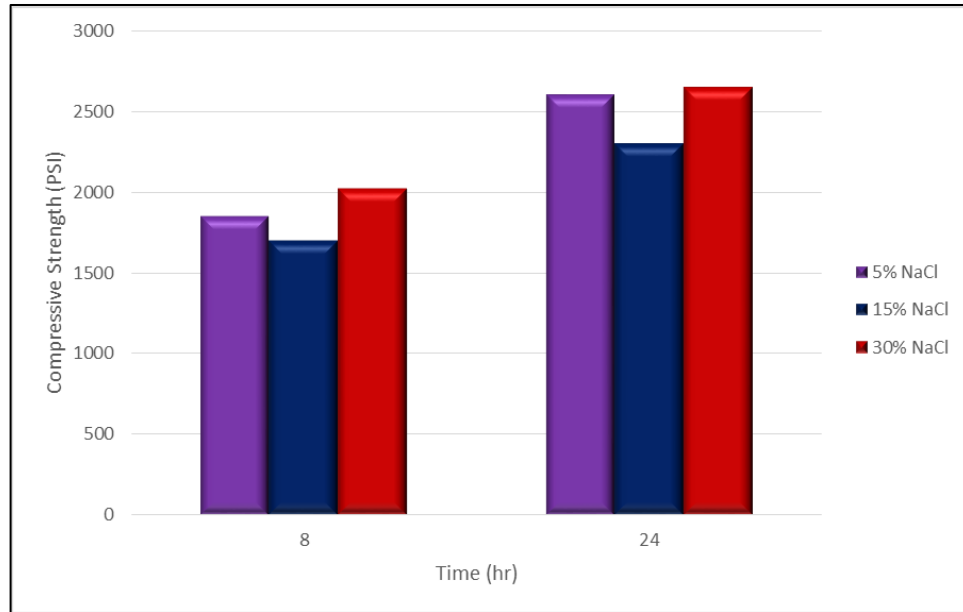


Fuente: de Smith, D. K. Cementing. Society of Petroleum Engineers. Second Edition. United State of America. Society of Petroleum Engineers Inc. 1990.

En las figuras se observa que a medida que pasa el tiempo, la resistencia a la compresión aumenta para cada una de las muestras, sin embargo, al aumentar la concentración de sal dicha propiedad va disminuyendo. A pesar de tener concentraciones tan bajas como el 2% y 4% se observa el efecto negativo en las cualidades del cemento.

La segunda prueba es realizada a concentraciones mayores de sal (% BWOW) para un cemento API clase G, las pruebas son realizadas para la temperatura de 200 °F y 3,000 psi.

Figura 62. Efecto de la concentración de la sal en la resistencia a la compresión.

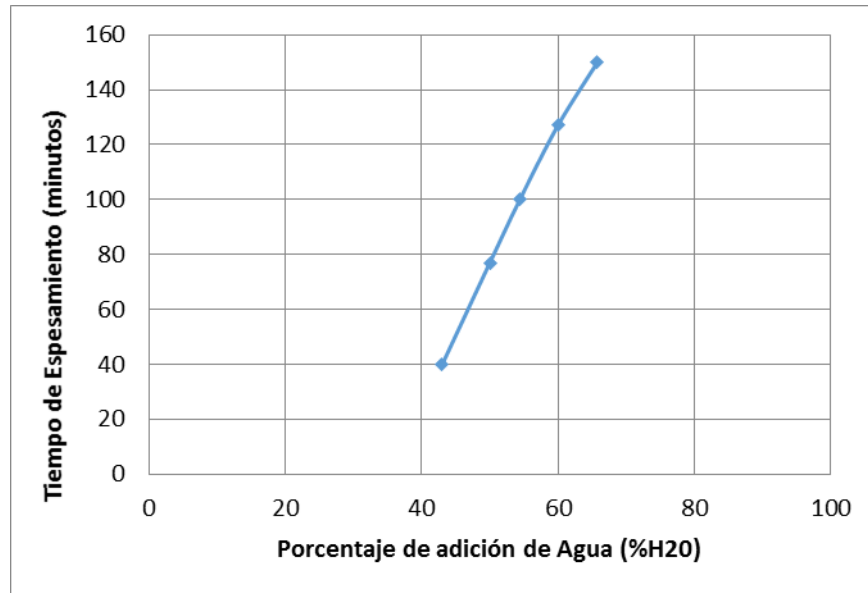


Fuente: CPVEN, Seminario de cementación de pozos petroleros. Maracaibo (Venezuela). Octubre 2008.

El efecto de la sal en el desarrollo de la resistencia a la compresión es variable (figura 62), a las 8 horas la sal ayuda a desarrollar temprana resistencia, pero es necesario agregar un aditivo para el control de filtrado ya que en relación a la reología, la sal dispersa el cemento aun a altas concentraciones.

En la mayoría de los casos, al utilizar aditivos expansivos, se genera una disminución en el tiempo de espesamiento del cemento, para estos casos se puede diluir la mezcla con agua hasta máximo un 60% del volumen total de la lechada. Esto con el fin de no incurrir en gastos adicionales de agentes retardantes y sin disminuir el grado de expansión.

Figura 63. Efecto de adición de Agua en un Cemento Expansivo saturado con NaCl.



Fuente: CARTER, L. et al. Expanding Cements for Primary Cementing. SPE 1235. 1965

En las pruebas realizadas se observa que ambos aditivos estudiados afectan de forma negativa a la resistencia a la compresión. Saturando la lechada con sal, el efecto de expansión lineal sería aproximadamente 0.006%, siendo necesario agregar aditivos de control de filtrado para con el fin de desarrollar a la compresión.

Teniendo presente que las dos propiedades fundamentales a la hora de escoger uno u otro aditivo, son la resistencia a la compresión y el grado de expansión lineal, se exponen los aspectos más relevantes de cada aditivo a continuación. Los valores de esfuerzo a la compresión para la lechada saturada con sal son mayores que el óxido de magnesio, sin embargo, las pruebas fueron realizadas a 200°F, temperatura a la cual el efecto expansivo es menor y no afecta en gran medida la resistencia a la compresión, ; es por esto, que a temperaturas más bajas como la del pozo tipo, se esperan valores menores de resistencia a la

compresión para la lechada saturada con sal; los cuales no se pueden determinar para esta investigación ya que actualmente no tienen un estudio asociado. En el caso del óxido de magnesio manejando tres diferentes concentraciones (2.7%,5%,7% BWOC), presenta un efecto expansivo óptimo en temperaturas altas, afectando la resistencia a la compresión en menor medida que la lechada satura con sal a las condiciones de fondo de pozo, en consecuencia con lo anterior, la concentración de Óxido de Magnesio que se determina como óptima para este diseño, es la del 5% BWOC, ya que exhibe a las condiciones de temperatura y presión de yacimiento, un valor de resistencia a la compresión de aproximadamente 1,700psi (valor adecuado para la realización de los trabajos de cementación en el pozo tipo) y como adicional, tiene el segundo valor de expansión lineal de las muestras probadas con óxido de Magnesio y muy similar al de la lechada saturada con sal.

## 6. CONCLUSIONES

- La sal además de ser un aditivo expansivo por excelencia, también ayuda a reducir el valor de encogimiento inicial que muestran las lechadas de cemento convencionales al estar expuestas a temperatura y presión en fondo, sin embargo, es necesario adicionar otros aditivos que contrarresten el efecto dispersante que produce en la lechada.
- En cada uno de los equipos de laboratorio, el material del equipo sufre un pequeño porcentaje de expansión debido al cambio en la temperatura que se realiza al simular las condiciones de yacimiento. Es de gran importancia escoger cuidadosamente el tiempo cero o el punto de referencia al cual se toma la primera medición en las pruebas de expansión, con el fin de evitar errores de medición al considerar la expansión del material del equipo como expansión de la lechada.
- En lechadas de cemento saturadas con sal, es posible agregar de 2% a 10% de Sulfato de Sodio para aumentar el valor de expansión (0.099% expansión lineal), pero si este valor es mayor al 10%, a largo plazo se inicia un deterioro agresivo a causa de los sulfatos generando fracturas al volumen cementado.
- Los métodos y aparatos de medición de expansión todavía tienen un grado de incertidumbre relativamente alto, ya que no tienen en cuenta aspectos propios y particulares del ambiente de las formaciones que se van a cementar como lo son: esfuerzos de cizalla, tiempos fluidos, ambiente de confinamiento, por lo tanto, se requiere tener certeza del margen de error en las mediciones dependiendo de cada equipo (el error varía de acuerdo a la configuración propia de equipo), a la hora de realizar el diseño de la lechada.

- Para las condiciones de temperatura y presión de fondo del pozo estudio, el *MgO* como aditivo expansivo no está en su punto óptimo de aporte al desarrollo de expansión, ya que lo ideal estaría en rangos de temperatura y presión cercanos a 200°F - 400°F y 1,000psi - 2,000psi, aun así, entre los aditivos propuestos, la muestra con el mejor desempeño es aquella con concentración de 5% de Oxido de Magnesio.
- El diseño óptimo de la lechada para el pozo en estudio no está dado por el mayor porcentaje de expansión lineal obtenido por el cemento, depende de múltiples factores ingenieriles y operacionales del diseño, siempre teniendo como prioridad garantizar la integridad de pozo. Es por esto, que la muestra de lechada con oxido de magnesio a concentración de 7%, a pesar de tener el mayor grado de expansión, no es la recomendada para la aplicación en campo, debido a la perdida en el esfuerzo a la compresión que produce en la lechada.
- La sal como aditivo tiene un alto potencial de expansión luego del fraguado, sin embargo a concentraciones tan altas como para llegar a saturar el cemento, también tiene efectos dispersantes, lo cual aumenta el tiempo de fragüe del cemento, de acuerdo con esto, operacionalmente no serían visibles los efectos favorables a la expansión en el corto plazo, ya que los registros de calidad de cementación son tomados generalmente 72 horas después de asentar la lechada.
- A partir de la revisión bibliográfica se identifican múltiples aditivos con propiedades expansivas; para el caso en estudio, se escogieron aquellos que tenían pruebas de expansión que permitieron interpolar sus resultados para simular las condiciones del pozo tipo, los cuales fueron la sal y el óxido de magnesio.

## 7. RECOMENDACIONES

- Otras posibles soluciones a las fallas del sello hidráulico son: La expansión, elasticidad, ductilidad, tensión y flexión del cemento, pero al establecer alcance del presente trabajo, solo se hizo énfasis en la expansión del cemento para prevenir la formación de micro-anillos, sin embargo, también es necesario tomar en cuenta otras variables como lo son el módulo de Young ya que los cementos pueden tener diferentes niveles de rigidez y por consiguiente de elasticidad. La relación de Poisson para un cemento debe tener valores por debajo de 0.25.
- Es necesario realizar pruebas a lechadas de cemento saturadas con sal y de 2% a 10% de Sulfato de Sodio, con el fin de establecer los efectos en la reología de la lechada y pruebas UCA que permitan determinar el desempeño después de fraguado.
- La adecuada remoción del lodo es un factor determinante para la adherencia del lodo, ya que no solo puede generar canales entre el casing, la formación y el cemento, sino que puede contaminar la lechada y afectar el rendimiento del mismo, es por esto, que para un próximo diseño de la lechada que se realice, es importante tener en cuenta las prácticas y procedimientos, además de aditivos o características que debe tener el lavador químico y el espaciador mecánico.

## BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. (2012). Recuperado el 24 de 10 de 2015, de Cuenca Llanos Orientales: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20Llanos.pdf#search=llanos%20orientales>

AGENCIA NACIONAL DE HIROCARBUROS. (s.f.). Obtenido de [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20\(pdf\)-Ronda%20Colombia%202010.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Llanos%20(pdf)-Ronda%20Colombia%202010.pdf)

BAUMGARTE, C., THIERCELIN, M., & KLAUS, D. (1999). Case Studies of Expanding Cement To Prevent Microannular Formation. SPE 56535, 8.

BEIRUTE, Robert., & TRAGESSE, Art. (1973). Expansive and Shrinkage Characteristics of Cements Under Actual Well Conditions. SPE 4091, 5.

CARTER, L. G., WAGGONER, H. F., & George, C. (1965). Expanding Cements for Primary Cementing. SPE-1235-PA, 8.

CEDIP, U. (s.f.). Ingeniería de Cementaciones. Obtenido de <http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf>

GOBONCAN, Virgilio. C., & DILLENBECK, Robert. L. (2003). Real-Time Cement Expansion/Shrinkage Testing Under Downhole Conditions for enhanced annular isolation. SPE/ IADC 79911, 1-9.

MICHAUX, Michael., NELSON, Erik., & VIDICK, Benoit. (s.f.). Obtenido de [http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors89/apr89/2\\_cement.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors89/apr89/2_cement.pdf)

NELSON, Erik. B. (s.f.). Oilfield Review. Obtenido de Definición de cementación: [http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish12/sum12/defin\\_e\\_cement.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish12/sum12/defin_e_cement.pdf)

NELSON, Erik. B., & GUILLOT, Dominique. (2006). Well Cementing. Texas: Schlumberger.

RAVI, Kris., REDDY, B., GRAY, Dennis., & PATTILLO, Phil. (2006). Procedures to Optimize Cement Systems for Specific Well Conditions. AADE-06-DF-HO-35, 1-11.

REDDY, B. R., XU, Ying., RAVI, Kris., GRAY, Dennis., & PATTILLO, P. D. (2009). Cement-Shrinkage Measurement in OilwellCementing - A comparative Study of Laboratory Methods and Procedures. SPE 103610, 1-8.

Rodríguez Camacho, R. E., Dámazo Juárez, D., & Uribe Afif, R. (s.f.). Los Cementos Puzolánicos aumentan la resistencia del concreto al ataque de sulfatos. Obtenido de Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.: <http://www.imcyc.com/revista/2000/julio2000/pusolanicos3.htm>

ROOT, R. L., & CALVERT, D. G. (1971). The Real Story of Cement Expansion. Society of Petroleum Engineers of AIME, 6.

SAIDIN, S., SONNY, I., & NURUDDIN, M. F. (2008). A new Approach for Optimizing Cement Design to Eliminate Microannulus in Steam Injection Wells. IPTC 12407, 15.

SMITH, D. K. (1990). Cementing. Society of Petroleum Engineers .

TECHNOLITHOLOGY. (s.f.). Obtenido de  
<http://petrol.sci.muni.cz/eng/technolithology/thaumasite/conclus.htm>

THOMAS, Jeffrey., MUSSO, Simone., CATHELIN, Sebastien., CHOUGNET-SIRAPIAN, Alice., & ALLOUCHE, Michael. (2014). Expanding Cement for improved wellbore Sealing: Prestress DEvelopment, Physical Properties, and Logging Response. SPE-170306-MS.

VIRGILIO C. GOBONCAN, & DILLENBECK, Robert. L. (2003). Real-Time Cement Expansion/Shrinkage Testing Under Downhole Conditions for Enhanced Annular Isolation. SPE/IADC 79911, 1-6.