

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL USO DE FLUIDOS POLIMÉRICOS EN LA FORMULACIÓN DE SISTEMAS DE LODO CEMENTANTE**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero de Petróleo  
Por el Br. Yánez G., Fernando J.

Caracas, Junio 2004

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL USO DE FLUIDOS POLIMÉRICOS EN LA FORMULACIÓN DE SISTEMAS DE LODO CEMENTANTE**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Norberto Bueno

TUTOR INDUSTRIAL: MSc. Aiskely Blanco

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero de Petróleo  
Por el Br. Yánez G., Fernando J.

Caracas, Junio 2004

*A Dios por acompañarme siempre,  
A mi Mamá Carolina  
y mis hermanos Rolando y Cherasanay  
que siempre me acompañaron en este largo camino*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar siempre conmigo y darme la oportunidad de vivir, por la familia que tengo, y por ponerme donde estoy. Gracias...

A mis Padres, y muy especialmente a ti mamá por ser tan especial y comprensiva, no encuentro palabras que te describan, te quiero mucho. Gracias...

A mis hermanos, por ser un apoyo en todo momento, y por permitirme aprender de sus experiencias. Gracias por estar allí siempre...

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por darme la educación y la preparación necesaria para progresar en la vida. Gracias...

Al profesor Norberto Bueno, gracias por sus conocimientos durante toda la carrera y por su ayuda como tutor académico.

A todas las personas que conocí en PDVSA Intevep durante la realización de este trabajo, sin ellos no hubiera sido posible realizarlo. A mi tutora industrial Aiskely Blanco, Alicia Colina, Urbano Medina, William Aular, Manual Mas, José Angel Olmeta, Luis Viloria, Sarkis Kadkajian. Gracias sinceramente Sr. Urbano, por su paciencia y gran ayuda en el laboratorio de cementación.

A mis amigos y compañeros de tesis que conocí en PDVSA Intevep les agradezco el apoyo y la colaboración brindada. A mis panas Antonio y Omar, que siempre estuvieron conmigo en todo momento.

Definitivamente gracias a todas las personas que mencioné, porque sin ellos este trabajo hubiera sido imposible. SINCERAMENTE, GRACIAS.

**Yáñez G., Fernando J.**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL USO  
DE FLUIDOS POLIMÉRICOS EN LA FORMULACIÓN DE  
SISTEMAS DE LODO CEMENTANTE**

**Tutor Académico: Prof. Norberto Bueno. Tutor Industrial: MSc. Aiskely Blanco.**

**Tesis. Caracas, U.CV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.**

**Año 2004, 175 p.**

**Palabras Claves:** Fluido, Escoria, Lodo cementante, Cementación, Factibilidad

**Resumen.** La tecnología de cementación con lodo surge como una alternativa para mejorar los procesos de cementación convencional, tanto técnica como económicamente. Esta tecnología consiste en la conversión de fluidos de perforación base agua por medio de la adición de un subproducto de la fabricación del acero denominado escoria. En Venezuela y a nivel mundial se han utilizado distintos tipos de fluidos para la formulación de esta clase de lechadas, con las que se han obtenido buenos resultados en las aplicaciones de campo que se han llevado a cabo. Debido a esto, el presente trabajo estudia la factibilidad de desarrollar nuevos sistemas de lodo cementante a partir de tres clases de fluidos de perforación poliméricos comerciales, uno de tipo base agua y dos con formulaciones que presentan altos contenidos de aceite. Diseños de lechadas con este tipo de fluidos base aceite no se tiene conocimiento de que se hayan realizado con anterioridad. En esta investigación se demostró que es factible técnicamente más no económicamente la formulación de sistemas de lodo cementante a partir de los fluidos nombrados anteriormente. Se evaluaron propiedades físicas y mecánicas de las lechadas formuladas, tales como tiempo de espesamiento, reología, pérdida de filtrado, estabilidad, resistencia a la compresión, tensión, flexión y expansión, con la idea de ser propuestas para su uso principalmente en revestimientos de producción. Igualmente, se compararon este tipo de lechadas con sistemas de cemento Pórtland común y sistemas de lodo cementante usados en Venezuela.

## ÍNDICE

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
MARCO TEÓRICO.....	4
1. Proceso de perforación.....	4
2. Fluidos de perforación.....	6
2.1 Funciones más comunes de un fluido de perforación.....	6
2.2 Tipos de fluidos de perforación.....	6
3. Fluidos poliméricos.....	8
3.1 Clasificación de los polímeros.....	8
3.2 Fluidos poliméricos a utilizar en este estudio para la formulación de las lechadas de lodo cementante.....	9
3.2.1 Sistema A.....	9
3.2.2 Sistema B.....	11
3.2.3 Sistema C.....	12
4. Proceso de cementación.....	14
4.1 Tipos de cementación.....	14
4.2 Materiales usados en la cementación.....	15
5. Tecnología de cementación con lodo.....	17
5.1 Proceso de obtención de la escoria.....	18
5.2 Propiedades de la escoria.....	20
5.3 Comparación de la escoria con el cemento Portland.....	22
5.4 Proceso de hidratación y diseño del sistema de lodo cementante.....	22
5.5 Proceso de mezclado.....	25
5.6 Antecedentes mundiales.....	26
5.7 Antecedentes de la tecnología en Venezuela.....	36

5.8 Consideraciones económicas sobre el lodo cementante.....	42
6. Teoría sobre elasticidad y propiedades mecánicas.....	42
6.1 Comportamiento esfuerzo-deformación.....	44
6.2 Propiedades mecánicas del cemento.....	46
6.3 Ensayos mecánicos.....	46
 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	 50
1. Materiales.....	50
2. Equipos de laboratorio.....	51
3. Condiciones de evaluación.....	63
4. Procedimiento experimental.....	63
 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	 82
1. Caracterización de los fluidos de perforación.....	82
2. Caracterización de las lechadas.....	87
2.1 Mezclabilidad de los sistemas.....	87
2.2 Tiempo de espesamiento.....	91
2.3 Densidad y agua libre.....	97
2.4 Reología.....	99
2.5 Sedimentación.....	107
2.6 Pérdida de filtrado.....	112
2.7 Ensayos mecánicos.....	114
3. Factibilidad económica.....	135
 CONCLUSIONES.....	 143
RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	146
LISTA DE ABREVIATURAS.....	149
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	151

APÉNDICE.....	155
Apéndice A: Preparación detallada de preparación de fluidos y lechadas.....	155
Apéndice B: Hoja de cálculo tipo usada para la formulación de los sistemas de lodo cementante.....	159
Apéndice C: Tablas de los resultados experimentales obtenidos de diferentes ensayos realizados.....	160
Apéndice D: Cálculos tipo.....	175

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Diagrama tipo telescopio de un pozo petrolero.....	5
Figura 2: Esquema de alto horno para reducción del mineral de hierro. Tomado de Crispina, L. (2000).....	19
Figura 3: Comparación entre el cemento y la escoria en cuanto a su composición física y química.....	23
Figura 4: Número de publicaciones por año.....	26
Figura 5: Número de participaciones en estudios por autor.....	28
Figura 6: Compañías con mayor número de participaciones en estudios de conversión de lodo a cemento.....	28
Figura 7: Comparación de los tipos de trabajos realizados entre los años 1990-2003.....	35
Figura 8: Frecuencia de pozos por año.....	37
Figura 9: Porcentaje de uso de la tecnología en función de la zona de aplicación.....	37
Figura 10: Frecuencia de uso de la tecnología de acuerdo al tipo de pozo.....	38
Figura 11: Frecuencia de uso de diferentes tipos de fluidos de perforación.....	39
Figura 12: Efecto del choque térmico sobre la resistencia a la compresión.....	39
Figura 13: Deformación de un cuerpo rígido por acción de una fuerza.....	43
Figura 14: Curva esfuerzo-deformación típica.....	45
Figura 15: Esquema del equipo para la determinación de la Resistencia a la Flexión.....	47
Figura 16: Esquema del equipo utilizado para la determinación de la Resistencia a la tensión.....	48
Figura 17: Esquema del molde utilizado para la determinación del porcentaje de expansión de la lechada.....	49
Figura 18: Balanza Electrónica, Marca Mettler PE 1600.....	51
Figura 19: Agitadores.....	52
Figura 20: Horno de rolado.....	52
Figura 21: Balanza de lodo.....	53
Figura 22: Viscosímetro.....	53
Figura 23: Medidor de pH.....	54
Figura 24: Equipo para filtrado API.....	54

Figura 25: Retorta .....	55
Figura 26: Balanza electrónica, Marca Mettler PM2000.....	55
Figura 27: Mezcladora.....	56
Figura 28: Balanza presurizada.....	56
Figura 29: Consistómetro presurizado.....	57
Figura 30: Cámara de curado presurizada .....	57
Figura 31: Prensa mecánica.....	58
Figura 32: Consistómetro atmosférico.....	58
Figura 33: Cámara de filtrado.....	59
Figura 34: Vernier.....	59
Figura 35: Estufa.....	60
Figura 36: Celda BP.....	60
Figura 37: Celda triaxial .....	61
Figura 38: Celda para ensayo de flexión .....	61
Figura 39: Celdas de expansión.....	62
Figura 40: Tornillo micrométrico .....	62
Figura 41: Esquema general de la metodología desarrollada en el trabajo de investigación.....	65
Figura 42: Orden de mezcla para la formulación de la lechada a partir de .....	72
Figura 43: Muestra de los cubos obtenidos con el lodo cementante C a 12,5 lpg para los ensayos de resistencia a la compresión mediante el ensayo destructivo.....	74
Figura 44: Determinación de la masa de los núcleos.....	77
Figura 45: Curado de las muestras en baño de María.....	79
Figura 46: Tiempo de espesamiento vs relación de activadores para lechada de 13,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema A.....	92
Figura 47: Curva de consistencia obtenida para la lechada de 13,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema A .....	92
Figura 48: Tiempo de espesamiento vs relación de activadores para lechada de.....	94
Figura 49: Curva de consistencia obtenida para la lechada de 11,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema B .....	94
Figura 50: Tiempo de espesamiento vs relación de activadores para lechada de 12,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema C .....	95

Figura 51: Curva de consistencia obtenida para la lechada de 12,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema C .....	96
Figura 52: Comparación de las fuerzas de gel desarrolladas por las formulaciones de lodo cementante A para distintas densidades y temperatura.....	101
Figura 53: Comparación de las fuerzas de gel desarrolladas por las formulaciones de lodo cementante B para distintas densidades y temperatura .....	104
Figura 54: Comparación de las fuerzas de gel desarrolladas por las formulaciones de lodo cementante C para distintas densidades y temperatura .....	106
Figura 55: Figura comparativa de los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación para (A) Lodo cementante A @ 12,5 lpg y (B) Lodo cementante A @ 13,5 lpg .....	108
Figura 56: Figura comparativa de los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación para (A) Lodo cementante B @ 11,5 lpg y (B) Lodo cementante B @ 12,5 lpg.....	109
Figura 57: Figura comparativa de los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación para (A) Lodo cementante C @ 12,5 lpg y (B) Lodo cementante C @ 13,5 lpg.....	110
Figura 58: Variación de la resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador $\text{Na}_2\text{CO}_3$ para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema A .....	115
Figura 59: Variación de la resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador $\text{Na}_2\text{CO}_3$ para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema B.....	115
Figura 60: Variación de la resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador $\text{Na}_2\text{CO}_3$ para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema C.....	116
Figura 61: Comparación de la resistencia a la compresión convencional entre una lechada de cemento Portland y los tres sistemas de lodo cementante ajustados a una densidad de 12,5 lpg y una concentración de 10 lpb de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	117
Figura 62: Comparación de la resistencia a la compresión convencional entre una lechada de cemento Portland y lodos cementantes formulados a partir del fluido A y C para una densidad de 13,5 lpg y una concentración de 10 lpb de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	118
Figura 64: Comparación de los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los tres sistemas de lechadas diseñados a 12,5 lpg, en función del método de ensayo .....	123

Figura 65: Comparación de los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los tres sistemas de lechadas diseñados a 13,5 lpg, en función del método de ensayo .....	123
Figura 66: Comparación de valores de resistencia a la compresión desarrollados por varios sistemas de lodo cementante diseñados a una densidad de 11,5 lpg.....	125
Figura 67: Comparación de valores de resistencia a la compresión desarrollados por varios sistemas de lodo cementante diseñados a una densidad de 12,5 lpg.....	125
Figura 68: Comparación de valores de resistencia a la compresión desarrollados por varios sistemas de lodo cementante diseñados a una densidad de 13,5 lpg.....	126
Figura 69: Comparación de los valores de resistencia a la tensión promedio obtenidos de los ensayos realizados a los sistemas de lodo cementante estudiados .....	128
Figura 70: Comparación de la carga máxima de ruptura bajo un ensayo de flexión obtenida para los sistemas de lechada diseñados .....	130
Figura 71: Gráfica comparativa del % de expansión vs tiempo de curado para la formulación de lodo cementante A @ 13,5 lpg .....	131
Figura 72: Gráfica comparativa del % de expansión vs tiempo de curado para la formulación de lodo cementante B @ 11,5 lpg.....	132
Figura 73: Gráfica comparativa del % de expansión vs tiempo de curado para la formulación de lodo cementante C @ 12,5 lpg.....	133
Figura 74: Comparación de los costos por barril para diferentes tipos de lechadas.....	139
Figura 75: Gráfica comparativa del porcentaje que representa del costo total de la cementación los equipos y servicios, material cementante, fluidos de perforación y aditivos para diferentes tipos de lechadas .....	141

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Formulaci3n t3pica del sistema A .....	10
Tabla 2: Propiedades m1s comunes recomendadas para el sistema A .....	10
Tabla 3: Formulaci3n t3pica del sistema B .....	12
Tabla 4: Propiedades m1s comunes recomendadas para el sistema B.....	12
Tabla 5: Formulaci3n t3pica del sistema C .....	13
Tabla 6: Propiedades m1s comunes recomendadas para el sistema C.....	13
Tabla 10: Composici3n qu3mica de la escoria “New Cem” .....	51
Tabla 11: Condiciones de evaluaci3n de los sistemas .....	63
Tabla 12: Formulaci3n del Sistema A .....	66
Tabla 13: Formulaci3n del Sistema B.....	66
Tabla 14: Formulaci3n del Sistema C.....	67
Tabla 15: Densidades de lechadas para cada uno de los sistemas formulados.....	70
Tabla 16: Lecturas reol3gicas obtenidas a 120°F de la formulaci3n presentada para el sistema A antes y despu3s de ser envejecido durante 16 horas a 150°F .....	83
Tabla 17: Lecturas reol3gicas obtenidas a 120°F de la formulaci3n presentada para el sistema B antes y despu3s de ser envejecido durante 16 horas a 150°F.....	83
Tabla 18: Lecturas reol3gicas obtenidas a 120°F de la formulaci3n presentada para el sistema C antes y despu3s de ser envejecido durante 16 horas a 150°F.....	84
Tabla 19: Propiedades reol3gicas obtenidas a 120 °F de las formulaciones presentadas para los tres sistemas de fluidos de perforaci3n despu3s de ser envejecidos a 150°F .....	84
Tabla 20: Propiedades f3sicas obtenidas para la formulaci3n del sistema A despu3s de ser envejecido durante 16 horas a 150°F.....	85
Tabla 21: Propiedades f3sicas obtenidas para la formulaci3n del sistema B despu3s de ser envejecido durante 16 horas a 150°F.....	86
Tabla 22: Propiedades f3sicas obtenidas para la formulaci3n del sistema C despu3s de ser envejecido durante 16 horas a 150°F.....	86
Tabla 23: Pruebas de mezclabilidad realizadas para la formulaci3n de la lechada a partir del sistema A, ajustada a una densidad de 13,5 lpg .....	88

Tabla 24: Pruebas de mezclabilidad realizadas para la formulación de la lechada a partir del sistema B, ajustada a una densidad de 11,5 lpg .....	89
Tabla 25: Prueba de mezclabilidad realizada para la formulación de la lechada a partir del sistema C, ajustada a una densidad de 12,5 lpg .....	90
Tabla 26: Formulaciones finales utilizadas para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas de fluidos .....	97
Tabla 27: Resultados de las pruebas de densidad y fluido libre para las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas para distintas densidades.....	98
Tabla 28: Lecturas reológicas obtenidas a 80°F de las formulaciones de lodo cementante A para las dos densidades fomuladas.....	100
Tabla 29: Lecturas reológicas obtenidas a 138°F de las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades formuladas .....	100
Tabla 30: Parámetros de diferentes modelos reológicos a partir de las lecturas obtenidas en un viscosímetro a 80 °F y 138°F con las formulaciones de lodo cementante A para las dos densidades.....	101
Tabla 31: Lecturas reológicas obtenidas a 80°F de las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades formuladas .....	102
Tabla 32: Lecturas reológicas obtenidas a 138°F de las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades formuladas .....	103
Tabla 33: Parámetros de diferentes modelos reológicos a partir de las lecturas obtenidas en un viscosímetro a 80 °F y 138°F con las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades.....	103
Tabla 34: Lecturas reológicas obtenidas a 80°F de las formulaciones de lodo cementante C para las dos densidades formuladas .....	105
Tabla 35: Lecturas reológicas obtenidas a 138°F de las formulaciones de lodo cementante C para las dos densidades formuladas .....	105
Tabla 36: Parámetros de diferentes modelos reológicos a partir de las lecturas obtenidas en un viscosímetro a 80 °F y 138°F con las formulaciones de lodo cementante C para las dos densidades.....	106
Tabla 37: Resultados obtenidos de la prueba de sedimentación realizada a la lechada formulada a partir del sistema A para dos densidades distintas.....	108

Tabla 38: Resultados obtenidos de la prueba de sedimentación realizada a la lechada formulada a partir del sistema B para dos densidades distintas .....	109
Tabla 39: Resultados obtenidos de la prueba de sedimentación realizada a la lechada formulada a partir del sistema C para dos densidades distintas .....	110
Tabla 40: Pérdida de filtrado obtenida para las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas de fluidos para distintas densidades.....	112
Tabla 41: Valores de resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson obtenidos mediante el ensayo triaxial de compresión realizados a los diferentes sistemas de lechadas estudiadas .....	119
Tabla 42: Valores de resistencia a la tensión promedio obtenidos de los ensayos realizados a los diferentes sistemas de lechadas .....	127
Tabla 43: Valores de carga de ruptura promedio obtenidos de los ensayos de flexión realizados a los diferentes sistemas de lechadas .....	129
Tabla 44: Resultados de la prueba de expansión obtenidos para la formulación de lodo cementante A @ 13,5lpg.....	131
Tabla 45: Resultados de la prueba de expansión obtenidos para la formulación de lodo cementante B @ 11,5lpg.....	132
Tabla 46: Resultados de la prueba de expansión obtenidos para la formulación de lodo cementante C @ 12,5lpg.....	133
Tabla 47: Estimado de costos para una lechada de cemento Pórtland y una de lodo cementante formulada a partir de un fluido de perforación disperso.....	136
Tabla 48: Estimado de costos para lechadas de lodo cementante formuladas a partir de los fluidos de perforación A y B.....	137
Tabla 49: Estimado de costos para lechadas de lodo cementante formuladas a partir del fluido de perforación C .....	138
Tabla 50: Resumen de costos totales para lechadas de cemento Pórtland y diferentes tipos de lodos cementantes.....	139

## INTRODUCCIÓN

Venezuela se encuentra dentro de los primeros países productores de petróleo a nivel mundial, y esta actividad a su vez representa la principal fuente económica. Con el fin de hacer más competitivos todos los procesos involucrados en la explotación del petróleo, la investigación en el área de materiales cementantes utilizados en la construcción de pozos es una de las ramas de bastante importancia en la producción con éxito del crudo.

La cementación de los tubulares de revestimiento tiene como objetivo primordial lograr el aislamiento zonal efectivo, mediante el empleo de materiales cementantes que presenten los menores costos y a la vez desarrollen las mejores propiedades físicas y mecánicas para cumplir con los requerimientos del pozo en el corto y largo plazo.

Una deficiente remoción del fluido de perforación y una contaminación del lodo sobre las propiedades físicas y mecánicas de una lechada de cemento común, son algunas de las causas que pueden provocar malos procesos de cementación y llevar al aumento excesivo de costos. Debido a esto, a partir de 1991, la empresa Shell Corporation comenzó la aplicación de una nueva tecnología en el área de cementación de pozos denominada Lodo Cementante. Esta tecnología consiste en la solidificación de un fluido perforación base agua por medio de la adición de un subproducto de la fabricación del acero denominado escoria.

Las lechadas de lodo cementante, debido a que se formulan a partir de los fluidos de perforación utilizados en el pozo, tienen la ventaja de tener una mejor compatibilidad cemento-fluido, disminuir y/o eliminar costosos sistemas de preflujos así como reducir pasivos ambientales, por disposición de volúmenes de fluidos de perforación que se deban almacenar o desechar.

Siendo una tecnología interesante para mejorar los procesos de cementación, a partir del año 1996, PDVSA comenzó con su aplicación en el país, principalmente en pozos de inyección de vapor. Debido a que este tipo de sistemas muestran una alta resistencia frente

a los choques térmicos, se obtuvieron buenos resultados que contribuyeron favorablemente a solventar los problemas de erupción de vapor en superficie que se presentaban con las operaciones de cementación convencional con cemento Pórtland.

Debido a lo antes expuesto, el objetivo principal de este trabajo consiste en realizar una evaluación técnico económica del uso de fluidos poliméricos, usados en la perforación de zonas productoras, para la formulación de sistemas de lodo cementante.

Para cumplir con el objetivo planteado anteriormente, se realizaron pruebas de laboratorio utilizando fluidos de perforación de tipo base agua, emulsión o/w y un fluido 100% base aceite, para formular las lechadas de lodo cementante. Fluidos con alta cantidad de aceite o 100% base aceite, no se tiene conocimiento de que se hayan usado antes en la aplicación de este tipo de lechadas.

Para las lechadas diseñadas en este trabajo de investigación se evaluaron propiedades físicas a través de las especificaciones API RP10B, como densidad, tiempo de espesamiento, pérdida de filtrado, estabilidad y reología, así como propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, flexión, y expansión. Estas propiedades son comparadas con las obtenidas en sistemas de lodo cementante formulados a partir de otras clases de fluidos, aunque para algunas propiedades no se tengan referencia.

Por otra parte, la factibilidad económica fue evaluada, tomando como referencia una lechada diseñada con cemento Portland para un pozo típico del área de Lagunillas sometido a inyección de vapor. Además, se tomó también como comparación una lechada de lodo cementante de las utilizadas durante el año 2002, formulada a partir de un fluido disperso.

A partir de este estudio, se quiere presentar una alternativa más para el desarrollo de sistemas de lodo cementante formulados a partir de otra clase de fluidos de perforación, que cumplan con propiedades físicas y mecánicas necesarias para el buen aislamiento zonal. La introducción de fluidos base aceite en el diseño de lechadas sería el principal aporte de información para el desarrollo de próximos estudios.

## OBJETIVOS

### *Objetivo General:*

- Estudiar la factibilidad técnico-económica de la utilización de tres clases de fluidos de perforación poliméricos comerciales en la formulación de sistemas de lodo cementante.

### *Objetivos específicos:*

- Caracterizar los fluidos de perforación a ser utilizados como base para formular las lechadas, mediante las especificaciones API Spec 13B-1.
- Formular el sistema de lodo cementante para cada fluido de perforación a evaluar.
- Evaluar la mezclabilidad para cada sistema de fluido a estudiar.
- Evaluar las propiedades físicas de cada lechada de lodo cementante formulada, mediante las especificaciones API RP 10B.
- Evaluar las propiedades mecánicas del sistema cementante, tales como: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, flexión y expansión.
- Verificar la factibilidad técnica de usar este tipo de lechadas en revestimientos de producción.
- Comparar su factibilidad económica con respecto a lechadas formuladas a partir de cemento Portland.

## MARCO TEÓRICO

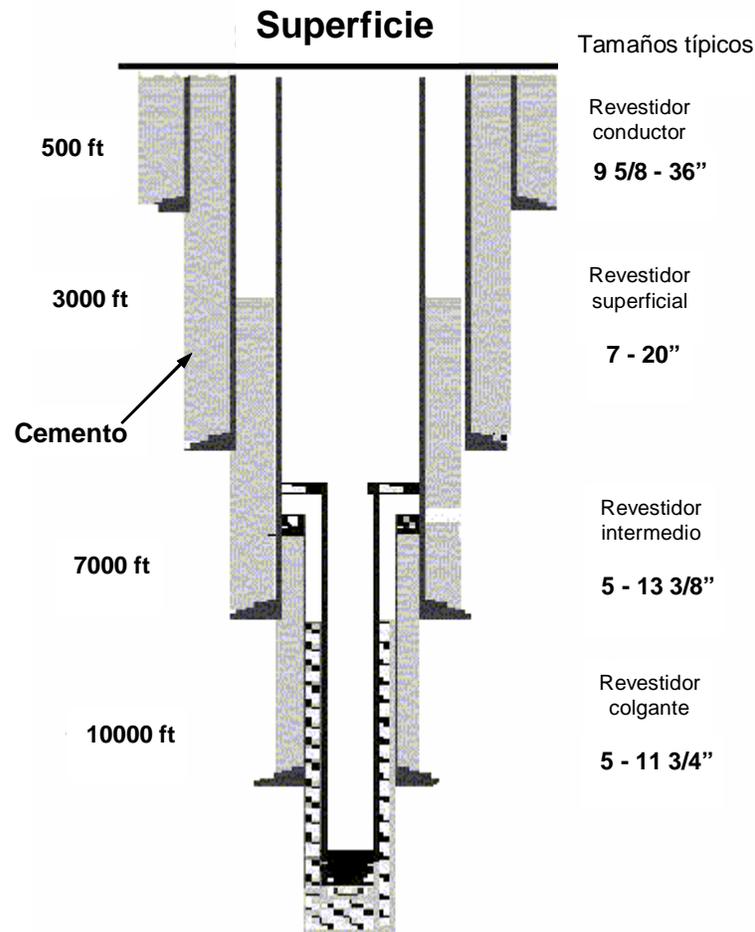
### 1. PROCESO DE PERFORACIÓN

Todo proceso de búsqueda de petróleo, comienza con la actividad de exploración geológica, caracterización del yacimiento, cuantificación en términos de barriles y estrategia de explotación del yacimiento.

Una vez que se ha determinado que existe probablemente un reservorio petrolífero, la única manera de averiguarlo es perforando. La perforación es el proceso mediante el cual se penetra en las capas subterráneas de la tierra con el fin de establecer un canal que permita extraer el crudo atrapado en el yacimiento (Pérez, 1996). En la antigüedad este proceso se realizaba a través del método de percusión, que posteriormente cambió a un método rotatorio. Este nuevo método consiste en una mecha colocada en la extremidad de una tubería de perforación que a su vez es sostenida por un sistema de cable/bloques en la torre de perforación. Con el fin de romper la roca, esta sarta se hace girar a través de una mesa rotaria.

Para enfriar y lubricar continuamente la mecha y retirar los recortes del agujero, se bombea un fluido de perforación (lodo) dentro de la tubería. Al alcanzar la mecha, este lodo pasa a través de las toberas, choca contra el fondo del agujero y luego sube por el espacio anular acarreando los recortes que están suspendidos en él.

La perforación se realiza por etapas, de tal manera que el tamaño del pozo en la parte superior es ancho y en las partes inferiores es cada vez más angosto, de forma telescópica. Esto le da consistencia y evita derrumbes, para lo cual se van utilizando mechas y tuberías de menor tamaño en cada sección (ver Figura 1), lo que finalmente permite tener un conducto entre la arena petrolífera y la superficie (Pérez, 1996).



**Figura 1:** Diagrama tipo telescopio de un pozo petrolero

Para proteger el pozo de filtraciones, derrumbes o cualquier otro problema propio de la perforación, se colocan tuberías de revestimientos por etapas dentro del hoyo, y se aseguran con un sistema cementante que se inyecta a través de la misma tubería y se desplaza en ascenso por el espacio anular, donde se solidifica (Pérez, 1996). El proceso de cementación y los materiales usados para ello será explicado en detalle más adelante.

Al finalizar la perforación, el pozo queda literalmente entubado (revestido) desde la superficie hasta el fondo, lo que garantiza su consistencia y facilitará posteriormente la extracción del petróleo en la etapa de producción (Pérez, 1996).

## **2. FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

El fluido de perforación es un líquido lubricante y transportador de los ripios, que se utiliza para perforar pozos petroleros. Este fluido se bombea hasta la mecha o punta del taladro y arrastra hasta arriba, todos los pedazos de tierra y ripios que se han taladrado hasta el momento (Barberii, 2001).

### **2.1 Funciones más comunes de un fluido de perforación:**

- Remover y transportar el ripio del fondo del hoyo hacia la superficie.
- Enfriar y lubricar la mecha y la sarta de perforación.
- Cubrir la pared del hoyo con un revoque liso, delgado, flexible e impermeable.
- Controlar las presiones de las formaciones.
- Transmitir potencia hidráulica a la mecha.
- Mantener en suspensión, cuando se interrumpe la circulación, el ripio y el material densificante.
- Soportar por flotación, parte del peso de la sarta de perforación y la tubería de revestimiento, durante su inserción en el hoyo.
- Mantener en sitio y estabilizada la pared del hoyo, evitando derrumbes.
- Ofrecer un medio apto para llevar a cabo evaluaciones a través de perfilaje.

### **2.2 Tipos de fluidos de perforación:**

#### **2.2.1 Lodos base agua:**

Son aquellos lodos donde el agua, bien sea dulce o salada, constituye la fase continua o el elemento de mayor proporción que mantendrá en suspensión los diferentes aditivos que forman las otras fases. Entre las otras fases, se encuentran la coloidal constituida por la arcilla, que será el elemento primario utilizado para darle cuerpo al fluido, una fase inerte que está constituida por el material densificante y los sólidos no deseables como la arena y sólidos de perforación, y por último la fase química, constituida por iones y sustancias en solución tales como dispersantes, emulsificantes, reductores de filtrado, y otras sustancias

químicas, que controlan el comportamiento de las arcillas y se encargan de mantener el fluido según lo requerido por el diseño (Bourgoyng et al., 1991).

### **2.2.2 Lodos base aceite:**

Los lodos base aceite son aquellos fluidos de perforación en los cuales el mayor componente (por volumen) y principal medio de acarreo es el aceite. Estos fluidos contienen típicamente sólidos suspendidos y agua dulce o salmuera en diferentes concentraciones, comúnmente denominado emulsión inversa o emulsión “agua en aceite”, para lograr propiedades específicas (Barberii, 2001; Bourgoyng et al., 1991).

Entre los componentes más importantes en los lodos base aceite se encuentran la fase continua, los emulsificantes, la cal hidratada, la arcilla organofílica, los humectantes y el agua. La *arcilla organofílica* es un componente importante que se usa para producir modificaciones en el punto cedente y la fuerza de gel, mejorando la limpieza del hoyo y la suspensión del material densificante; el *humectante* es utilizado para mantener humedecidos los sólidos con aceite, los *emulsificantes* hacen que el agua se emulsione en el aceite formando un sistema estable y la *cal hidratada* tiene como función primaria hacer más efectiva la acción del emulsificante y como función secundaria actuar como secuestrador de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>. Hoy en día es usado aceite mineral como fase continua por su menor cantidad de aromáticos comparado con el gasoil, y como ultimo componente de los fluidos base aceite se encuentra el *agua* que se halla en forma de pequeñas gotas dispersas y suspendidas en el aceite, actuando cada una de ella como una partícula sólida, proporcionando viscosidad, mejor capacidad de suspensión y un control del filtrado (Bourgoyng et al., 1991).

### **2.2.3 Fluidos Neumáticos:**

La perforación con aire, gas o niebla es bastante común en áreas donde la pérdida de circulación severa constituye un problema, ya que se necesitan fluidos de baja densidad. Como su nombre lo indica, el fluido de perforación es aire, una niebla de agua, una espuma o, en algunos casos, gas natural. Tiene como fase continua un gas a los cuales se le agrega

poca cantidad de líquido para formar fluidos denominados neblinas o una cantidad mayor para formar espumas (Barberii, 2001).

### **3. FLUIDOS POLIMERICOS**

Un fluido de perforación polimérico es aquel que posee en su formulación polímeros para darle las propiedades deseadas. Un polímero es cualquier tipo o clase de sustancia originada de unidades estructurales que se repiten en cadena mediante un proceso de polimerización. Son coloides orgánicos de cadena larga que se utilizan hoy día como viscosificadores, agentes de control de filtrado, adelgazantes o como encapsulantes de los sólidos perforados. Son sustancias compuestas por grandes moléculas que a su vez, están formadas por la unión de varias moléculas simples denominadas monómeros (Wikipedia, 2004).

#### **3.1 Clasificación de los polímeros:**

Según su origen (Wikipedia, 2004), los polímeros se clasifican en naturales, modificados y sintéticos.

Los polímeros naturales se originan como su nombre lo indica de forma natural y no requieren de cambios químicos en el proceso de manufactura. Estos son bastante complejos. Las unidades o monómeros que se repiten son siempre conocidas y el peso molecular puede variar. El almidón y la goma guar son ejemplos de este grupo.

Los polímeros modificados son alterados químicamente con el fin de mejorar su tolerancia a la sal, su solubilidad y su estabilidad térmica. El HEC (hidroxi-etil-celulosa) es un buen ejemplo de este grupo.

Los polímeros sintéticos son elaborados haciendo reaccionar un monómero repetidas veces para poder formar un homopolímero, o monómeros diferentes para formar un copolímero. La posibilidades de formar polímeros sintéticos son ilimitadas, pero muchas veces el costo

es prohibitivo. Los poliacrilatos y las poliacrilamidas son polímeros sintéticos típicamente solubles en agua.

### **3.2 Fluidos poliméricos a utilizar en este estudio para la formulación de las lechadas de lodo cementante:**

#### **3.2.1 Sistema A:**

Este sistema es un fluido tipo viscoelástico, conocidos también con el nombre de biopolimérico, son fluidos pseudoplásticos que se caracterizan por tener propiedades viscoelásticas, son viscosos como un líquido y elásticos como un sólido.

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por dar altas viscosidades a bajas tasas de corte y desarrollar altos geles instantáneos pero frágiles y de fácil ruptura; además de ofrecer baja resistencia al flujo con mínima presión de bomba.

Los fluidos viscoelásticos se utilizan para perforar pozos horizontales y/o direccionales por su gran capacidad de limpieza y suspensión. Su capacidad de suspensión es tal que aún en condiciones estáticas minimizan la formación de lechos de ripios que se forman usualmente en el punto de máxima desviación del pozo.

El fluido viscoelástico denominado Sistema A utilizado en este estudio para la formulación de las lechadas de lodo cementante, es una nueva tecnología desarrollada por la compañía PDVSA, donde los componentes principales que lo forman son (Kadkajian et al., 2004):

- El agua como la fase continua del fluido.
- Un polímero A: polisacárido natural. Utilizado como el principal viscosificante.
- Un polímero B: polisacárido modificado, con alta capacidad de viscosificar y desarrollar control de filtrado.
- Un almidón natural, usado como controlador de filtrado en segundo frente.

- Aceite mineral, utilizado como lubricante de la sarta.
- Glycol, usado como inhibidor de arcillas.
- Cloruro de potasio, sal soluble en agua para inhibir el hinchamiento de arcillas.
- Óxido de magnesio, controlador de pH.
- Carbonato de calcio, usado como agente de peso y agente puenteante.

Kadkajian et al. (2004) señala que entre las principales ventajas de fluido se encuentran:

- Verdaderas propiedades viscoelásticas.
- Fluido con excelentes propiedades de acarreo de sólidos y limpieza de pozo.
- No causa daños a la formación productora.
- Efectivo sello para control de pérdida de circulación.
- Fluido de propiedades estables probadas hasta 280°F, resistente a la contaminación con sólidos y crudos.

Una formulación típica del sistema desarrollado por PDVSA y sus propiedades más comunes son:

**Tabla 1:** Formulación típica del sistema A

<b>Aditivos</b>	<b>Concentración</b>
Agua	0,8 – 0,98 bbl
Polímero 1	1,0 – 3,0 lb/bbl
Polímero 2	1,5 – 2,0 lb/bbl
Cloruro de potasio	0 – 7,0 lb/bbl
Almidón	0 – 4,0 lb/bbl
Carbonato de Calcio	0 – 150 lb/bbl
Aceite mineral	Hasta 0,1 bbl

**Tabla 2:** Propiedades más comunes recomendadas para el sistema A

<b>Propiedades más comunes</b>	
Densidad	8,7 – 16,5 lpg
VP/PC	10-20/25-60
Filtrado API	> 2cc/30 mín

### 3.2.2 Sistema B:

El Sistema B es un fluido de Perforación / Terminación / Rehabilitación diseñado para zonas de baja presión que, por su baja densidad, permite perforar, terminar o reparar pozos en yacimientos depletados, maximizando la producción (Blanco et al, 2003).

Es una tecnología que consiste en una emulsión de fase continua agua 70/30 con una densidad entre 7,2 y 11 lpg, térmicamente estable hasta 300°F, con excelentes propiedades reológicas, de bajo daño a la formación, y un mínimo impacto ambiental.

El diámetro de gotas del fluido preparado es una propiedad importante que debe ser tomada en cuenta, ya que tiene relación directa con las propiedades reológicas y la estabilidad del fluido. La distribución del diámetro de gotas, recomendada en la preparación del fluido, debe ser del 90% de las gotas por debajo de 10 $\mu$  (Blanco et al, 2003).

Los principales componentes del sistema B desarrollado por la compañía PDVSA lo forman:

- Una mezcla de surfactantes biodegradables. Se usa junto con el gasoil u otro aceite y el agua para formar la emulsión.
- Un almidón para alta temperatura utilizado para controlar filtrado.
- Un biocida basado en Glutaraldehido.
- Una solución buffer utilizada para mantener la alcalinidad.
- Cloruro de potasio, una sal encargada de suministrar iones potasio para inhibir el hinchamiento de las arcillas y la dispersión de las mismas.
- Carbonato de calcio, utilizado como agente densificante o agente de puenteo.

Entre las principales ventajas del fluido se encuentran:

- Altamente inhibitorio.
- Térmicamente estable hasta 300°F.
- Mínimo daño a la formación.

- Excelente lubricidad.
- Excelentes propiedades reológicas.
- Densidad variable entre 4,5 (aireado) y 10 lpg.
- Diseñado para yacimientos de baja presión.

Una formulación típica del sistema B puede venir dado por:

**Tabla 3:** Formulación típica del sistema B

<b>Aditivos</b>	<b>Concentración</b>
Aceite	0,7 – 0,35 bbl
Agua	0,3 – 0,6 bbl
Surfactante	15 – 20 lb/bbl
Alcali	0,1 lb/bbl
Inhibidor de arcillas	0,2 – 1 lb/bbl
Controlador de filtrado	0 – 2 lb/bbl
Agente de peso	0 – 150 lb/bbl

**Tabla 4:** Propiedades más comunes recomendadas para el sistema B

<b>Propiedades más comunes</b>	
Densidad	4,5 – 10 lpg
VP/PC	10-50/10-50
Filtrado API	1 – 3 cc/30 mín

### 3.2.3 Sistema C:

El sistema C es un fluido de perforación base aceite, que puede ser de tipo 100% o emulsión w/o, utilizado para perforación de yacimientos profundos con altas temperaturas, estable térmicamente hasta 400°F (Mas et al, 1996).

Los principales componentes del fluido son el aceite mineral, el polímero C, arcilla organofílica, humectante, cal y el agente densificante. El viscosificante principal es un copolímero tipo estireno-butadieno, mientras que la arcilla organofílica junto con el humectante le imparten el esfuerzo de cedencia y la fuerza de gel al sistema (Mas et al, 1996).

Entre las principales ventajas del sistema C se encuentran:

- Altamente inhibitorio.
- Térmicamente estable hasta 400°F.
- Efecto viscosificante y de control de filtrado con mínimo contenido de sólidos.
- Mínimo daño a la formación.
- No tóxico cuando se usa aceite mineral o sintético.

Una formulación típica del sistema puede venir dado por:

**Tabla 5:** Formulación típica del sistema C

<b>Aditivos</b>	<b>Concentración</b>
Aceite mineral	0,6 – 0,95 bls
Polímero C	2,0 – 6,0 lb/bbl
Arcilla Organofílica	0 – 10,0 lb/bbl
Humectante	3,0 – 6,0 lb/bbl
Cal hidratada	0,2 – 5,0 lb/bbl
Densificante	Conc. dens. Req.

**Tabla 6:** Propiedades más comunes recomendadas para el sistema C

<b>Propiedades más comunes</b>	
Densidad	7,0 – 15 lpg
VP/PC	12-45/5-25
Filtrado HPHT	2,5 – 12cc/30 mín

## **4. PROCESO DE CEMENTACIÓN**

La cementación es un proceso que consiste en mezclar cemento seco más aditivos con agua para formar una lechada que es bombeada al pozo a través de la sarta de revestimiento y colocarlo en el espacio anular, entre el hoyo y el exterior del revestidor. Luego se deja fraguar y endurecer formando una barrera permanente e impermeable al movimiento de fluidos detrás del revestidor (Nelson, 1990).

### **4.1 Tipos de cementación:**

#### **4.1.1 Cementación primaria:**

Es la realizada a los pozos nuevos y requiere de mayor volumen de mezcla para cubrir las zonas de interés, ya que en algunos casos el relleno se hace hasta la superficie, o en varias etapas (si el revestidor es muy largo) para evitar inconvenientes operacionales (Economides, Watters.& Dunn, 1998; Nelson, 1990).

Según Economides (1998), los objetivos que se persiguen con esta cementación son:

- Adherir y fijar la sarta de revestimiento.
- Restringir el movimiento de fluidos entre las formaciones productoras y el confinamiento de los estratos acuíferos.
- Proteger la sarta contra la corrosión.
- Reforzar la sarta contra el aplastamiento debido a fuerzas externas y reforzar la resistencia de la sarta a presiones de estallido.
- Proteger la sarta durante los trabajos de cañoneo (completación).
- Sellar la pérdida de circulación en zonas “ladronas”.

Estos requerimientos hacen de la cementación primaria, la operación más importante desarrollada en un pozo. Sin un completo aislamiento zonal en el hoyo, el pozo nunca podría alcanzar un completo potencial de producción.

#### **4.1.2 Cementación secundaria:**

La cementación secundaria o remedial consiste en aplicar presión hidráulica para forzar a la lechada de cemento a entrar a través de espacios vacíos presentes en el anular. Su objetivo principal es crear un sello en el anular con la finalidad de lograr el aislamiento zonal. La más común es la cementación forzada o “squeeze”. Con esta cementación se busca corregir trabajos defectuosos de cementación primaria (falta de cemento en cierto tramo de la sarta), separar una zona productora de hidrocarburos de las zonas que producen otros fluidos, reparar fugas de la tubería, controlar producción excesiva de agua, abandonar intervalos productivos agotados y abandonar zonas (Economides et al, 1998).

#### **4.2 Materiales usados en la cementación:**

##### **4.2.1 Cemento Portland:**

El cemento Portland es el material más común usado para la cementación de pozos petroleros. Existen varias clases de cementos, que son clasificados desde la letra A hasta la H según el Instituto Americano del Petróleo, cumpliendo cada uno con funciones específicas. Los cementos clase G y H son los más usados hoy en día y son diseñados para ser utilizados desde superficie hasta 8000 pies de profundidad, usados con retardadores o aceleradores para cubrir un amplio rango de presiones y temperaturas (American Petroleum Institute [API], 1990).

El clinker es el principal componente del cemento Portland y presenta los siguientes compuestos básicos: silicato tricálcico  $C_3S$  ( $Ca_3SiO_5$ ), silicato dicálcico  $C_2S$  ( $Ca_2SiO_4$ ), aluminato tricálcico  $C_3A$  ( $Ca_3SiO_5$ ) y ferroaluminato tetracálcico  $C_4AF$  ( $Ca_2AlFeO_5$ ) (Nelson, 1990).

A temperatura ambiente los silicatos presentes en el cemento reaccionan con el agua para formar hidratos de silicato cálcico, que es un material cuasi-amorfo llamado comúnmente gel CSH. Constituye aproximadamente el 70% del cemento hidratado a temperatura

ambiente y es el responsable mayor del desarrollo de la resistencia a la compresión temprana.

Mientras que el gel CSH es el principal responsable del desarrollo de resistencia y de la durabilidad del cemento fraguado, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , llamado comúnmente porlandita, es muy poco resistente desde el punto de vista mecánico y es vulnerable a la presencia de agua, sulfatos y otros agentes (Economides et al, 1998; Nelson, 1990).

#### **4.2.2 Cementos ultrafinos:**

Las partículas de estos cementos son mucho más pequeñas que las del cemento Portland. El tamaño promedio de sus partículas es de  $2\mu\text{m}$  en comparación con los cementos convencionales cuyas partículas poseen un tamaño entre  $50$  y  $100\mu\text{m}$ . La principal aplicación de estos cementos es como un cemento de peso liviano (densidad baja) con un desarrollo de resistencia temprano. También son usados para reparar fracturas en el cemento, reparar fisuras en el revestimiento, cerrar flujos de agua u otros problemas similares, debido a que son capaces de penetrar aberturas pequeñas gracias al mínimo tamaño de sus partículas (Economides et al, 1998).

#### **4.2.3 Cementos Epoxy:**

Son materiales comúnmente usados cuando el cemento está expuesto a fluidos corrosivos. Estos cementos no son solubles en ácido pero son muy costosos. Generalmente son usados en pozos inyectoros donde se utilizan fluidos con bajo pH. Son productos puros y muy consistentes (Economides et al, 1998).

#### **4.2.4 Puzolanas:**

Son materiales silíceos y aluminosos que poseen poco o ningún valor cementoso pero que al reaccionar con el hidróxido de calcio a temperaturas moderadas forman compuestos con propiedades de cemento. El más común de estos compuestos es el “fly ash”, el cual se

obtiene como residuo de las plantas eléctricas de carbón. Las puzolanas naturales provienen generalmente de las actividades volcánicas. Cuando estos compuestos son utilizados en combinación con el cemento Portland, el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento, reacciona con los aluminosilicatos presentes en la Puzolana para formar compuestos cementosos con propiedades cohesivas y adhesivas. El “fly ash” es el que más comúnmente es combinado con el cemento Portland debido a su bajo costo, no lo diluye e incrementa la resistencia a la compresión del mismo. Sin embargo, debido a su inconsistencia, solo es usado a temperaturas por debajo de los 200 °F (Economides et al, 1998).

#### **4.2.5 Escoria:**

La composición de este material es principalmente silicato monocálcico, silicato dicálcico y aluminosilicato dicálcico. Este compuesto es altamente tolerante a la contaminación con fluidos de perforación (Economides et al, 1998). Una de sus principales aplicaciones es la tecnología de conversión de lodo en cemento, aplicada a escala nacional en pozos sometidos a inyección de vapor con muy buenos resultados. Una explicación de este tipo de sistemas se encuentra en detalle a continuación.

### **5. TECNOLOGÍA DE CEMENTACIÓN CON LODO**

La tecnología de cementación con lodo consiste en la solidificación del fluido de perforación base agua, mediante la incorporación de un subproducto del proceso de fabricación del acero denominado escoria y cierta cantidad de activadores químicos. Esta escoria es un material hidráulico latente que por sus características físico - químicas muy similares al cemento Portland tiene la capacidad de producir sistemas que desarrollan consistencia.

En un proceso de cementación convencional existen numerosos problemas que pueden llevar al aumento de costos en la perforación del pozo, como son una deficiente remoción del fluido de perforación y una contaminación del lodo sobre las propiedades físicas y mecánicas de la lechada de cemento. Sin embargo, la tecnología de lodo cementante debido

a que se formula a partir de los fluidos de perforación utilizados en el pozo, tiene la ventaja de tener una mejor compatibilidad cemento-fluido, disminuir y/o eliminar costosos sistemas de preflujos así como reducir pasivos ambientales, por disposición de volúmenes de fluidos de perforación que se deban almacenar o desechar (Blanco et al, 2002).

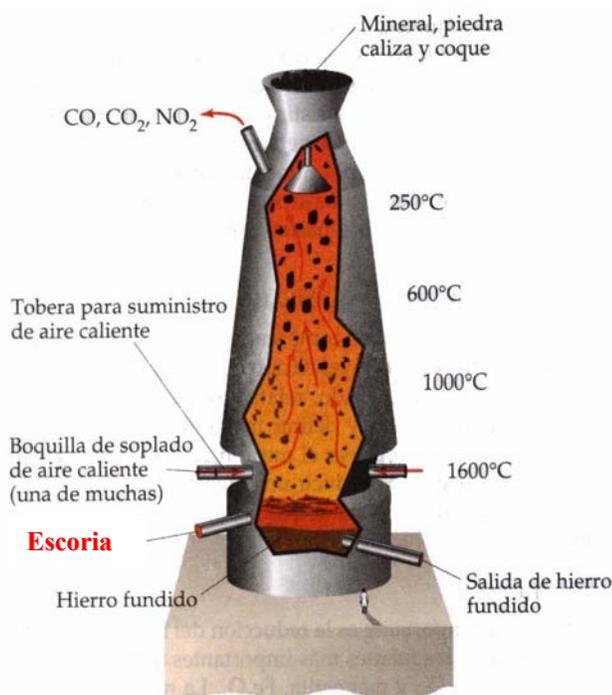
### **5.1 Proceso de obtención de la escoria**

En la naturaleza el hierro se encuentra normalmente como mineral, en combinación química con otros elementos, como el oxígeno y otras impurezas. Con el fin de separar esta unión química se necesita una sustancia apropiada que se combine con el oxígeno presente, por ejemplo, el coque, el carbón, el gas del carbón o el hidrógeno, además de calor (Crispina, 2000).

El alto horno es un reactor químico muy grande utilizado para la obtención del hierro. Se carga por la parte superior con una mezcla de mena de hierro, coque y piedra caliza. El coque es hulla que ha sido calentada en ausencia de aire para expulsar los componentes volátiles; contiene alrededor de 85 a 90 por ciento de carbono. El coque sirve como combustible que produce calor a medida que se quema en la parte baja del horno. Este material es también la fuente de los gases reductores CO y H<sub>2</sub>. La piedra caliza, CaCO<sub>3</sub>, sirve como fuente del óxido básico en la formación de escoria. El aire, que entra en el alto horno por el fondo después de un precalentamiento, es también una materia prima importante, pues se requiere para la combustión del coque. La producción de 1 Kg. de hierro crudo, llamado hierro de arrabio, requiere aproximadamente 2 Kg. de mena, 1 Kg. de coque, 0,3 Kg. de piedra caliza y 1,5 Kg. de aire. Aproximadamente por cada tonelada de arrabio se obtiene un promedio de 600 Kg. de escoria (Weld, 2002).

El hierro fundido se recoge en la base del horno. Por arriba de él hay una capa de escoria fundida formada por la reacción del CaO con el sílice presente en la mena. La capa de escoria sobre el hierro fundido ayuda a protegerlo de la reacción con el aire que entra. Periódicamente, el horno se vacía para drenar la escoria y el hierro fundido (ver Figura 2). El hierro producido en el horno se puede moldear en lingotes sólidos; sin embargo, casi

todo se usa directamente para fabricar acero. Para este propósito, el hierro se transporta, todavía líquido, al taller siderúrgico (Weld, 2002).



**Figura 2:** Esquema de alto horno para reducción del mineral de hierro. Tomado de Crispina, L. (2000)

Algunos elementos reducidos (C, Si, Mn, S, P) permanecen con el hierro y los elementos oxidados (CaO, CaS, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO) se disuelven en la escoria (Crispina, 2000).

La necesidad de caracterización de la escoria de alto horno puede presentarse en distintas circunstancias, ya sea cuando se trata de procesar el producto para obtener escoria granulada de alto horno molida o para obtener cementos mezcla por sustitución parcial de cemento portland por escoria de alto horno (Centro internacional de investigaciones para el desarrollo [CIID], 1997).

## 5.2 Propiedades de la escoria

La propiedad más importante a los fines de utilizar la escoria granulada de alto horno molida como material cementante es su hidraulicidad. La reactividad de la escoria depende de factores tales como: contenido vítreo, composición química, composición mineralógica y tamaño de grano (Rendon & Tintori, 1983).

### 5.2.1 Grado de vitrificación:

El contenido vítreo es uno de los parámetros que más afecta la reactividad de la escoria y el proceso de enfriamiento influencia directamente su capacidad hidráulica. Dos escorias con la misma composición química pueden tener propiedades hidráulicas significativamente diferentes dependiendo del proceso de enfriamiento. Si el proceso de enfriamiento es lento, los óxidos componentes van cristalizando paulatinamente y con ello llegan a perder su capacidad de aglomerantes hidráulicos. Por el contrario si el enfriamiento de la escoria es rápido, se vitrifican sus componentes y adquiere un estado estructural amorfo, con alta energía interna, inestable termodinámicamente y muy reactiva químicamente (Cowan, Hale & Nahm, 1992). El enfriamiento rápido se logra por medio de chorros de aire o por la inmersión brusca de la escoria en el agua.

Según CIID (1997), la bibliografía indica que no existe un contenido de fase vítrea mínimo para asegurar adecuada hidraulicidad, aunque los resultados óptimos se obtendrían para aproximadamente un 95% contenido vítreo. Aún así, no hay buena correlación entre los resultados de resistencia a la compresión y el contenido de fase vítrea.

La manera de conocer la característica de hidraulicidad de una escoria, es a través del llamado Índice de Hidraulicidad (F) que viene dado por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{CaO + CaS + 1/2MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO} \quad (\text{Ec. 1})$$

Valores de F superiores a la unidad indican una hidraulicidad moderada. Suelen ser escorias de color verdoso o negro, difíciles de moler. Valores de F comprendidos entre 1,5 y 1,9 pertenecen a escorias de buena hidraulicidad, generalmente de colores claros y de molienda más fácil, aunque siguen siendo duras. Valores de F superiores a 1,9 y hasta 2 indican escorias excelentes en cuanto a hidraulicidad. Si el valor de F es inferior a la unidad se trata de escoria ácida no hidráulica (Rendon & Tintori, 1983).

### **5.2.2 Composición química:**

La composición química está determinada por el funcionamiento del alto horno y existe un rango más o menos amplio de composiciones para las cuales la escoria presenta buena hidraulicidad. Se han definido distintos índices para determinar la reactividad potencial en función de su composición química, pero ninguno presenta buena correlación con la resistencia a la compresión obtenida (CIID, 1997).

### **5.2.3 Finura de molido:**

La finura es un factor importante en cuanto la misma influye en la ganancia de resistencia que se puede alcanzar en el cemento. Un aumento de la finura lleva a un incremento en la velocidad de reacción, otorgando mayor resistencia.

Las finuras usuales son mayores a las del cemento Portland y se encuentran entre 380 y 600 m<sup>2</sup>/kg, dependiendo de las características propias de las diferentes escorias y las propiedades deseables para el producto (CIID, 1997).

### **5.2.4 Tipo de activación:**

El tipo de activación es determinante de la forma y velocidad con que se manifiestan las características de hidráulica latente de las escorias. Existen numerosas sustancias, la mayoría de ellas alcalinas o de reacción alcalina en solución (CIID, 1997).

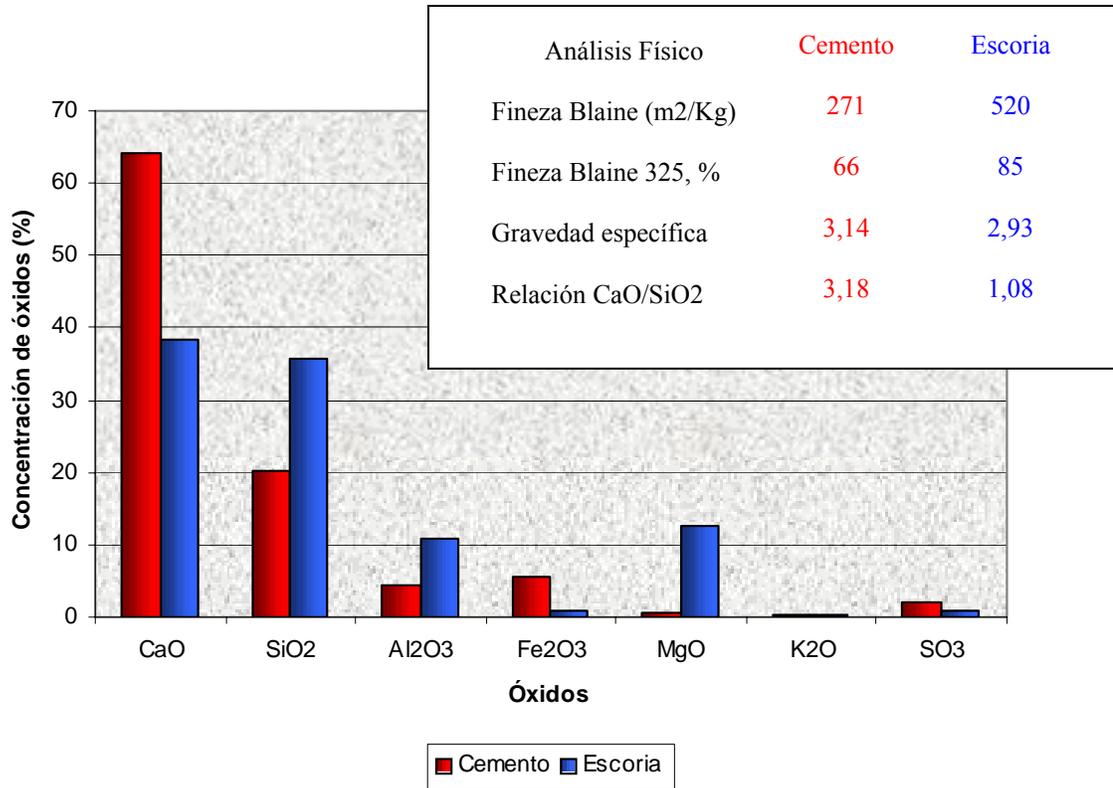
### **5.3 Comparación de la escoria con el cemento Portland:**

Como se dijo anteriormente, las escorias de altos hornos son silicatos complejos de calcio, aluminio y magnesio, mezclados con pequeños porcentajes de óxidos de hierro y manganeso, sulfuro de manganeso y pequeñas cantidades de azufre y otros elementos. Según esto, la composición química de la escoria de altos hornos es muy similar a la del cemento Portland (Blanco et al, 2002).

Debido a que la escoria se forma en estado fundido, la uniformidad en composición química del material es más alta que la del cemento Portland. En la Figura 3, se presenta la comparación en composición química y física de ambos materiales, en la que se destaca el alto contenido de silicio, aluminio y magnesio en la escoria, lo cual le imparte a este material comportamiento estable a altas temperaturas y con características expansivas. Adicionalmente la escoria posee una relación de óxido de calcio/sílice de 1,08 promoviendo la formación de fases mineralógicas más estables a altas temperaturas que en el caso del cemento Portland (Blanco et al, 2002).

### **5.4 Proceso de hidratación y diseño del sistema de lodo cementante**

Un factor importante a considerar en el diseño de estas lechadas es la densidad del fluido de perforación que se utiliza como base, ya que dependiendo de la cantidad necesaria de escoria para alcanzar buenas propiedades cementantes, se requiere diluir el fluido de perforación para llevar la mezcla inicial desde la densidad adecuada para perforar hasta la necesaria para conseguir una mezcla cementante óptima mediante la incorporación de la escoria (Silva, Miranda, D'Almeida, Campos & Bezerra, 1997).



**Figura 3:** Comparación entre el cemento y la escoria en cuanto a su composición física y química

Las propiedades del fluido de perforación, deben ser lo suficientemente estables entre el tiempo en que la muestra del fluido es tomada para diseñar la mezcla y el tiempo en que el trabajo de cementación es realizado, para asegurar la consistencia de las propiedades de la lechada entre el laboratorio y el campo. Este es un punto especialmente crítico para fluidos de perforación orgánicos y con alto contenido de sólidos, debido a que las excesivas fluctuaciones en el tipo y cantidad de sólidos pueden alterar la reología de la mezcla y generar un tiempo de bombeo excesivamente largo o muy corto. Una manera de lograr la estabilidad de las propiedades del fluido de perforación en campo es aislando el volumen a utilizar (Silva et al, 1997).

El volumen requerido de fluido de perforación es aislado para ser acondicionado en el momento de la operación. Las muestras de este lodo son usadas en el laboratorio para

realizar el diseño del sistema cementante y evaluar el desarrollo de propiedades requerido para adaptarlo a las condiciones operacionales deseadas.

La metodología de diseño para sistemas de lodo con escoria requiere aproximaciones algo diferentes. El cemento Portland requiere solo la adición de agua para fraguar. En contraste, la escoria empleada en el proceso de cementación con lodo es un material hidráulico latente que requiere ser activado para desarrollar propiedades cementantes. Esta activación puede ser realizada por medio de energía térmica o por acción química, mediante el uso de álcalis, materiales que incrementan el pH del lodo. El mecanismo básico de activación es el ataque alcalino de los  $\text{OH}^-$  sobre la estructura vítrea para disolverla, con la consecuente combinación con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y precipitación de productos cementantes tipo CSH (Escalante & Gómez, 2001).

Entre algunos de los activadores químicos comúnmente usados se incluyen: soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), silicato de sodio ( $\text{NaSiO}_2$ ), hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), sulfato de aluminio y otros. Con la excepción de la soda cáustica, muchos de los activadores tienen solo un ligero efecto cuando son usados. Debido al bajo costo y amplia disponibilidad, la soda cáustica y el carbonato de sodio (también llamado soda ash) ha resultado ser una de las combinaciones más efectivas (Cowan et al., 1992; Mueller & Dickerson, 1994).

La relación y concentración de los activadores pueden variar dependiendo de la densidad del sistema y las condiciones de temperatura de hoyo. Estudios sugieren que para los sistemas de lodo cementante, la soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ) influencia el tiempo de espesamiento, mientras que el desarrollo de resistencia a la compresión parece estar ligado a la concentración de soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Cowan et al., 1992; Mueller & Dickerson, 1994; Silva et al., 1997).

En pozos profundos donde las temperaturas son altas, se requiere menor cantidad de activadores químicos. En cambio, para el diseño y trabajo a bajas temperaturas es más dificultoso, debido a la necesidad de agregar altas concentraciones de aditivos para que la

escoria pueda ser activada y se alcance valores mínimos requeridos de resistencia a la compresión. La concentración total de activadores en las formulaciones generalmente está en el intervalo entre 10 y 25 lb/bbl de mezcla para la mayoría de las formulaciones que dependen de la temperatura (Silva et al, 1997).

La hidratación de la escoria como se dijo anteriormente, es función de su composición química, área superficial, tipo y concentración de activadores. Durante la hidratación, el silicato hidratado de calcio (C-S-H) producido es más bajo en óxidos de calcio y más rico en óxidos de aluminio y magnesio que el formado durante la hidratación del cemento Portland. La estructura cristalina también es diferente, ya que en la hidratación de la escoria no se produce hidróxido de calcio (portlandita), ni sulfoaluminato de calcio (etringita) o fibras de C-S-H gel. Esto tiene el efecto global de bajar la relación calcio/sílice y produce en consecuencia que la escoria sea menos susceptible al efecto de la retrogresión (Escalante & Gómez, 2001).

### **5.5 Proceso de mezclado**

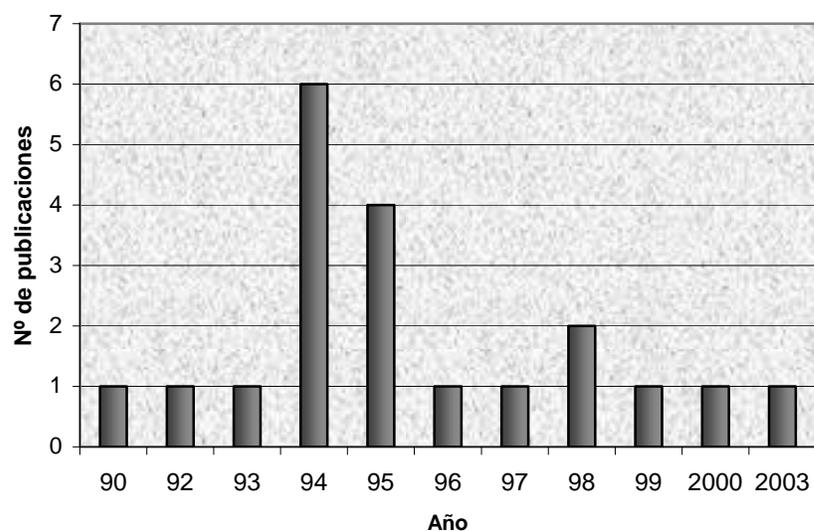
El procedimiento general de mezclado utilizado para preparar las lechadas con escoria, tanto en campo como en el laboratorio, presenta ciertas variantes respecto a los sistemas convencionales, debido al uso del fluido de perforación en el sistema. En primer lugar el fluido de perforación se mezcla con el agua y los activadores, una vez homogeneizado se agregan los aditivos controladores de filtrado y dispersantes, si fuera necesario, para luego adicionar la escoria, sílica y otros aditivos (Casares et al, 2002).

En campo se aísla un volumen adecuado del fluido de perforación, que se mezcla con los activadores, controladores de filtrado y dispersantes, con suficiente tiempo antes de comenzar la operación de cementación, debido a lo exotérmico de la reacción, para asegurar que la mezcla tenga una temperatura adecuada que permita ser mezclada con la escoria sin problemas (Casares et al, 2002).

El procedimiento de mezclado de la lechada en campo se puede realizar al vuelo o premezclando la misma. Siendo esta última la opción más recomendable por la homogeneidad que se logra en la mezcla. Por supuesto esto dependerá de las condiciones del taladro y la ubicación geográfica del pozo (Casares et al, 2002).

## 5.6 Antecedentes mundiales

En la búsqueda de documentación sobre el tema, se encontraron algunos estudios que han servido de guía y apoyo en la elaboración del presente trabajo. A partir del año 1990 se empezaron a publicar artículos que trataban acerca de la nueva tecnología de conversión de lodo a cemento, teniendo su mayor auge en los años 94 y 95, como se puede notar en la siguiente gráfica:



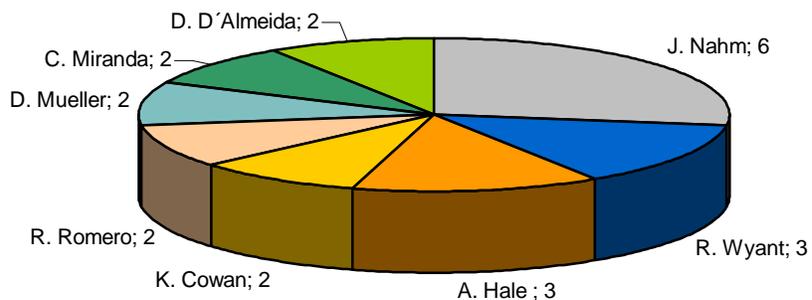
**Figura 4:** Número de publicaciones por año

Estas publicaciones están presentadas como trabajos ante la Sociedad de Ingenieros de Petróleo (SPE), y los principales autores y compañías encargados de realizarlos, se presentan en la Tabla 7.

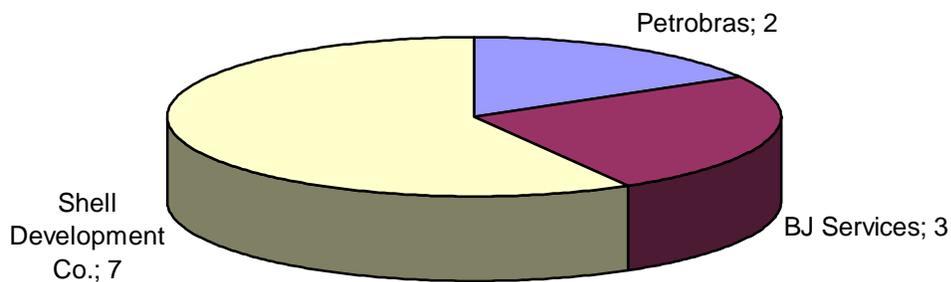
**Tabla 7:** Estudios publicados hasta la fecha acerca de la conversión de lodo a cemento

<b>Año</b>	<b>Paper SPE</b>	<b>Autores</b>	<b>Compañía</b>
1990	20452	W. Wilson, R. Carpenter, R. Bradshaw	Arco Oil & Gas Co
1992	24575	K. Cowan, A. Hale y J. Nahm	Shell Development Co
1993	25988	K. Cowan, A. Hale y J. Nahm	Shell Development Co
1994	27448	J. Nahm, R. Romero, A. Hale y R. Wyant	Shell Development Co
1994	26324	R. Schlemmer, N. Branam	Fluids Research Asoc., Baroid Drilling Fluids
1994	28821	A. Saasen, B. Salmelid	Rogaland Research Institute
1994	28474	J. Leimkuhler, F. Rambow, P. Warren	Shell Oil Co. Y Shell Development Co.
1994	27449	O. Bengge, W. Webster	Mobil E&P Technical Center
1994	28475	D. Mueller, J. Dickerson	BJ Services
1995	30512	R. Sweatman, J. Nahm, D. Loep, D. Porter	Halliburton Energy Services, Shell E&P Co, BJ Services
1995	29472	D. Daulton, S. Bosworth, B. Pumphrey	The Western Co., Union Pacific Resources Co.
1995	29407	J.Nahm, R. Romero, R. Wyant, K. Javanmardi	Shell Development Co y Shell Offshore Inc.
1995	30513	D. Mueller, G. DiLullo, J. Hibbeler, P. Kelly	BJ services
1996	35085	F. Sabins, T. Edwards, R. Maharidge y M. Weiss	Westport Technology Center International y Gas Research Institute
1997	39005	M. Silva, C. Miranda, A. D'Almeida	Petrobras
1998	39384	J. Nahm, R. Wyant, J. Rask, M. Thant y G. Cannon	Shell E&P Technology Co, Shell Western E&P Inc y Baker Hughes Inteq
1998	47800	U. Tare, F. Growcock, N. Takach, S. Miska, N. Davis	The University of Tulsa, Amoco EPTG, Chevron Petroleum Technology
1999	53689	A. Blanco, A. Colina, W. Rodriguez, R. Bolivar	PDVSA INTEVEP
2000	64758	M. Song, W. Wang, K. Ma	China Natl Star Petr Corp
2003	80988	A. D'Almeida, C. Miranda y G. Campos	Petrobras

A continuación se discretizan los autores y compañías con mayor número de participación en los estudios de esta tecnología.



**Figura 5:** Número de participaciones en estudios por autor



**Figura 6:** Compañías con mayor número de participaciones en estudios de conversión de lodo a cemento

Como se mencionó anteriormente los primeros trabajos de conversión de lodo a cemento fueron publicados en el año de 1990 por los autores W.N. Wilson y R.D. Carpenter pertenecientes a la compañía Arco Oil & Gas Co. Estos estudios surgen con el fin de reducir los costos asociados a los procesos de cementación y mejorar su calidad, buscando mejorar la compatibilidad con el fluido de perforación y la eficiencia de su desplazamiento en el espacio anular.

Para ellos los dos pasos básicos en la conversión de lodo a cemento eran la determinación de la cantidad óptima de agua y cemento para mezclar con el fluido de perforación y obtener la densidad de la lechada deseada; y la cantidad requerida de dispersantes para realizar la mezcla.

Realizaron investigaciones de laboratorio donde fueron convertidos tres sistemas de fluidos: lodos nativos, PHPA, y lodo de lignosulfonato de cromo. Debían ser utilizados dispersantes poliméricos especiales para evitar una mezcla imbombeable, Se realizaron once aplicaciones de campo con estos fluidos donde se obtuvieron excelentes resultados en el aislamiento zonal y en las pruebas de integridad del cemento (Wilson, Carpenter & Bradshaw, 1990).

En el mes de octubre del año 1991, fue publicada la patente de solidificación de fluidos de perforación base agua por los autores Arthur Hale y Kenneth Cowan, pertenecientes a la compañía Shell Oil Company. Para luego en el año 1992, con el auge de la tecnología, los mismos autores publicaron su trabajo en la SPE acerca de la conversión de fluidos de perforación a cemento utilizando escoria de alto horno. Este material con una composición química muy parecida al cemento Portland podía ser agregado al lodo de perforación debidamente activado, bien sea química o térmicamente, para poder hidratarse y producir un sistema cementante. El control del tiempo de espesamiento y el desarrollo de compresión estaban influenciados por la cantidad de álcalis, y la pérdida de filtrado de la lechada dependería de la calidad del lodo (Cowan et al., 1992; Hale & Cowan, 1991).

La aplicación de la escoria podía ser de dos tipos: la solidificación del lodo para formar cementos que puedan ser usados en cementaciones primarias o trabajos remediales, y la incorporación de la escoria en el lodo durante el proceso de perforación. Este segundo método denominado fluido universal, consiste en agregar escoria a bajas concentraciones para causar un bajo impacto en las propiedades reológicas del lodo, formando un revoque que pueda endurecer y crear un sello primario en la cara de la formación. Si llegaran a quedar restos de lodo con escoria sin desplazar en el espacio anular, no habrían problemas de compatibilidad con la lechada y no se formarían canales que puedan dañar el trabajo de cementación.

Se realizaron pruebas para determinar el efecto de la escoria incorporada en el lodo durante la perforación y sus propiedades, si el revoque formado por un lodo que contiene pequeñas concentraciones de escoria podía ser convertido en cemento y la aplicabilidad de la escoria para solidificar una amplia variedad de lodos base agua, entre ellos: lodos salinos, lodos de cal, lodos de almidón y base poliacrilamida.

Alrededor de 50 aplicaciones en campo fueron llevadas a cabo usando esta tecnología en el Golfo de México. Las condiciones y tipos de pozos variaron desde pozos de alta temperatura (600°F) hasta pozos profundos de baja temperatura (40°F) (Cowan et al, 1992).

Este mismo grupo de investigadores formado por Hale y Cowan continuaron promocionando el uso de la escoria en una serie de artículos posteriores. En el año de 1993 publicaron un trabajo acerca de la tecnología de conversión con escoria y su relación con el ambiente. Las estadísticas obtenidas para ese año en el campo Auger (Golfo de México) fueron exitosas debido a que las descargas de lodo fueron reducidas en 70% y ahorros económicos de \$500.000 por pozo (Naham, Javanmardi, Cowan & Hale, 1993).

Ya en el año de 1994 se dieron a conocer mayor cantidad de estudios a favor y en contra del uso de esta tecnología.

Los autores Nahm, Romero y Hale (1994) de la compañía Shell introdujeron más a fondo el concepto de fluido universal: un fluido de perforación para reducir pérdidas de circulación y mejorar la cementación. Este fluido universal es típicamente un fluido base agua que ha sido tratado con pequeñas cantidades de escoria, manteniendo las características apropiadas para perforar. La escoria se concentra en el revoque formado enfrente de las formaciones permeables, endureciéndose lentamente para producir una capa dura íntimamente adherida a la formación. Ellos llegan a la conclusión de que un verdadero aislamiento zonal puede ser obtenido usando este tipo de fluido para luego aplicar una cementación con lodo basado en escoria. Los esfuerzos para remover el revoque y el desplazamiento completo del lodo ya no son necesarios, debido a que revoque formado, básicamente presenta la misma composición que la lechada con escoria, ayudando a tener una buena interfase cemento-formación. Un total de nueve pruebas de campo fueron llevadas a cabo en California y el oeste de Canadá, donde probaron que el fluido universal podía ser usado operacionalmente y controlar pérdidas de circulación durante la perforación y la cementación del pozo.

Ese mismo año los autores Schlemmer y Branam publicaron su trabajo acerca de la conversión de fluidos: Selección y uso de cemento Portland o escoria de alto horno. Ellos llegaron a la conclusión de que el rendimiento y las consideraciones económicas de las dos clases de materiales cementantes proporcionan ventajas demostrables y específicas cuando se usan con un fluido de perforación en particular. Fluidos con bajas a moderadas concentraciones de dispersantes con lignosulfonatos son convertidos más fácilmente y económicamente con escoria. En cambio, el cemento Portland puede proporcionar economía y máximo desarrollo de compresión en conversiones de fluidos salinos no dispersos, según los resultados obtenidos.

Presentando ideas en contra de la tecnología, Bengue y Webster (1994) dieron a conocer una serie de resultados experimentales contradiciendo las ventajas que podía proporcionar la escoria como material cementante en algunas aplicaciones de campo. Al mismo tiempo cuestionaron la dificultad de cumplir con los aspectos de seguridad en el sitio de la perforación, debido al uso de materiales altamente alcalinos como la soda cáustica.

Ya durante el año 1995, la mayoría de los artículos presentados fueron evaluaciones de aplicaciones de la tecnología de lodo cementante en diferentes campos, teniendo como tema principal la migración de gas y el sistema de fluido universal.

J. Nahm y R. Romero (1995) realizaron pruebas de laboratorio y evaluaron los resultados obtenidos en el Golfo de México con respecto a pozos con problemas de migración de gas, donde pudieron llegar a la conclusión de que este tipo de sistemas con escoria no solo presentan buenas propiedades físicas y mecánicas, sino que también ayudan por su carácter tixotrópico a evitar la migración.

En el año 1997 los autores Blanco et al, pertenecientes a la compañía PDVSA INTEVEP publicaron su trabajo acerca del uso de la tecnología de lodo cementante en pozos de inyección de vapor. Estas aplicaciones fueron llevadas a cabo en Venezuela con buenos resultados, proporcionando un sistema compatible con el lodo, con baja permeabilidad, de carácter expansivo y con buen desarrollo de propiedades mecánicas antes y después de la inyección de vapor, asegurando un buen aislamiento zonal y mejorando la calidad del proceso.

Durante el año 2000 la compañía China Natl Star Petr Corp. en nombre de sus autores Mingquan Song y Wenli Wang, presentaron un trabajo denominado “Técnicas de conversión de lodo con escoria resuelven problemas de cementación en pozos complejos”. Ellos llegan a la conclusión de que este tipo de sistemas no solamente tiene las propiedades requeridas para una cementación normal, sino que también presenta ventajas en la reología, tiempo de transición de la fuerza de gel estática, estabilidad, expansión y compatibilidad con el fluido de perforación. Fueron llevadas a cabo 130 aplicaciones en campos de China, tanto en pozos de alta presión con problemas de migración de gas como en pozos direccionales de baja presión, obteniéndose un 100% de éxito en todos los trabajos realizados.

En el año 2003 fue la última publicación acerca de los sistemas de lodo cementante, donde los autores D’Almeida et al. de la compañía Petrobras introdujeron el concepto de lechadas

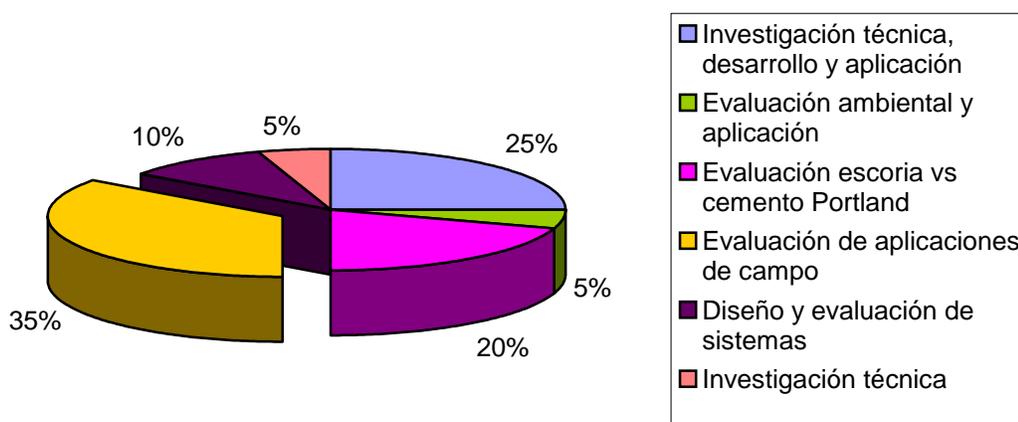
almacenables con escoria. Estas consisten en mezclar todos los componentes de la lechada sin los activadores, o en una cantidad insuficiente para que no puedan reaccionar. Ellos probaron con sus estudios que este tipo de lechadas se mantienen fluidas durante un largo período de tiempo (tres días a varios meses) a temperatura ambiente, sin el uso de retardadores. Además, son capaces de mantener las propiedades aptas para la cementación del pozo, y pueden ser fácilmente preparadas debido a sus bajos parámetros reológicos. El uso de esta tecnología puede reducir costos, bien sea disminuyendo los tiempos de operación debido a la preparación de la lechada, minimizando los riesgos y reduciendo los equipos necesitados para llevar a cabo la operación de cementación.

Para presentar una idea general de todos los estudios realizados, la Tabla 8 expone una clasificación de acuerdo al tipo de trabajo, el lugar de aplicación y el principal tema tratado.

**Tabla 8:** Estudios clasificados de acuerdo al tipo de trabajo, lugar de aplicación y tema principal tratado

<b>Año</b>	<b>Paper</b>	<b>Tipo de trabajo</b>	<b>Lugar de aplicación</b>	<b>Tema principal</b>
1990	20452	Investigación técnica, desarrollo y aplicación	Texas	Propiedades físicas y mecánicas
1992	24575	Investigación técnica, desarrollo y aplicación	Golfo de México	Bases teóricas de la escoria
1993	25988	Evaluación ambiental y aplicación	Golfo de México	Disposición de desechos
1994	27448	Investigación técnica, desarrollo y aplicación	California y oeste de Canadá	Fluido universal
1994	26324	Evaluación escoria vs cemento Portland	--	Propiedades físicas y mecánicas
1994	28821	Evaluación de aplicaciones de campo	Mar del Norte	Propiedades físicas, mecánicas y aspectos ambientales
1994	28474	Evaluación de aplicaciones de campo	Golfo de México, California y Texas	Estadísticas de las aplicaciones
1994	27449	Evaluación escoria vs cemento Portland	--	Propiedades físicas, mecánicas y aspectos ambientales
1994	28475	Diseño y evaluación de sistemas	--	Propiedades físicas y mecánicas
1995	30512	Evaluación de aplicaciones de campo	Texas	Migración de gas
1995	29472	Evaluación de aplicaciones de campo	Texas	Fluido universal
1995	29407	Evaluación de aplicaciones de campo	Golfo de México	Migración de gas
1995	30513	Diseño y evaluación de sistemas	Indonesia y Nueva Zelanda	Mezcla de escoria con cemento
1996	35085	Evaluación escoria vs cemento Portland	--	Migración de gas y propiedades mecánicas
1997	39005	Evaluación escoria vs cemento Portland	Brasil	Simulación y resistencia al ataque de ácidos
1998	39384	Investigación técnica, desarrollo y aplicación	Louisiana	Fluido universal
1998	47800	Investigación técnica	--	Reducir invasión de filtrado
1999	53689	Evaluación de aplicaciones de campo	Venezuela	Pozos de inyección de vapor
2000	64758	Evaluación de aplicaciones de campo	China	Pozos complejos, migración de gas
2003	80988	Investigación técnica, desarrollo y aplicación	Brasil	Conservación de lechadas

En la Figura 7 se puede observar que el mayor porcentaje de trabajos estuvo concentrado en evaluaciones de aplicaciones de campo, esto comprende estudios tanto técnicos, económicos y estadísticos de los resultados obtenidos, así como las ventajas y desventajas de haber usado la tecnología de lodo cementante en el lugar de aplicación. El segundo mayor porcentaje estuvo enfocado en la investigación técnica, desarrollo y aplicación, donde se trabajan sistemas de fluidos, se desarrollan trabajos de laboratorios y si los resultados obtenidos son buenos, se aplican y evalúan en campo.



**Figura 7:** Comparación de los tipos de trabajos realizados entre los años 1990-2003

Los mayores lugares de aplicación de la tecnología, como se puede notar en la Tabla 8, estuvieron concentrados especialmente en el Golfo de México y Texas, principales lugares de trabajo para la compañía Shell, que fue la de mayor participación en los estudios de conversión de lodo a cemento con escoria. Igualmente se aplicaron en otros lugares como Brasil, Venezuela, Mar del Norte, Canadá, Estados Unidos, China, entre otros.

Otros de los aspectos importantes a nombrar, son los fluidos de perforación utilizados para la formulación de las lechadas de lodo cementante. La mayoría de los estudios estuvieron concentrados en los siguientes fluidos:

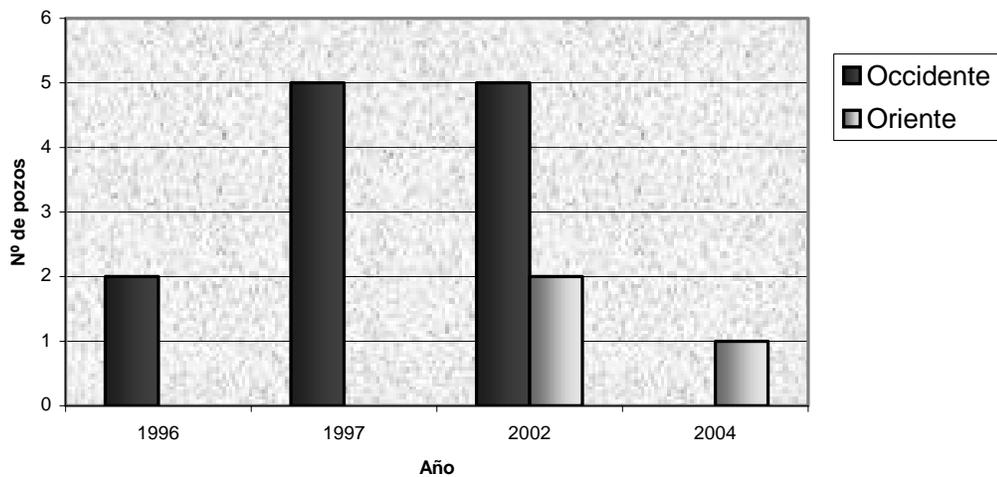
- Lodos nativos “Spud Muds”
- Poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas “PHPA”
- Lignosulfonatos
- Lodos de almidón “Starch Muds”
- Lodos de cal “Lime muds”
- Lodos poliméricos con KCl
- Lodos salinos “Brine muds”
- Sistemas CBM
- Sistemas Drill In

Igualmente, se puede hacer mención que las aplicaciones de la tecnología variaron desde revestimientos conductores hasta de producción, pozos costa afuera y en tierra, pozos de baja temperatura hasta pozos con altas temperaturas o de inyección de vapor, obteniéndose en todos resultados favorables.

### **5.7 Antecedentes de la tecnología en Venezuela**

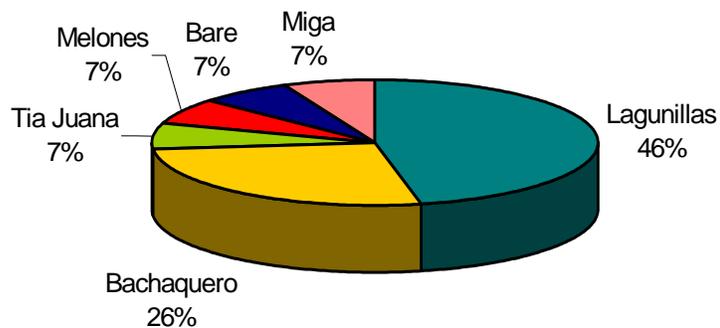
La utilización de la técnica de lodo cementante en Venezuela comienza durante el año 1996, con el fin de reducir problemas presentados en pozos de inyección de vapor. Según estudios publicados por Blanco et al. (1999), los sistemas de escoria tienen la tendencia a desarrollar mayores valores de resistencia a la compresión cuando son sometidos a condiciones de choque térmico, así como también presentan mayor estabilidad térmica, en comparación con los sistemas de cemento convencional.

Con el fin de reducir los problemas de vapor en superficie, pérdida de circulación y gas superficial, se comenzó a aplicar la tecnología en el área de Occidente, específicamente en las zonas de Lagunillas, Tía Juana y Bachaquero. A partir de ese año y observando los buenos resultados que se estaban obteniendo, se realizaron posteriores aplicaciones, como se puede notar en la Figura 8.



**Figura 8:** Frecuencia de pozos por año

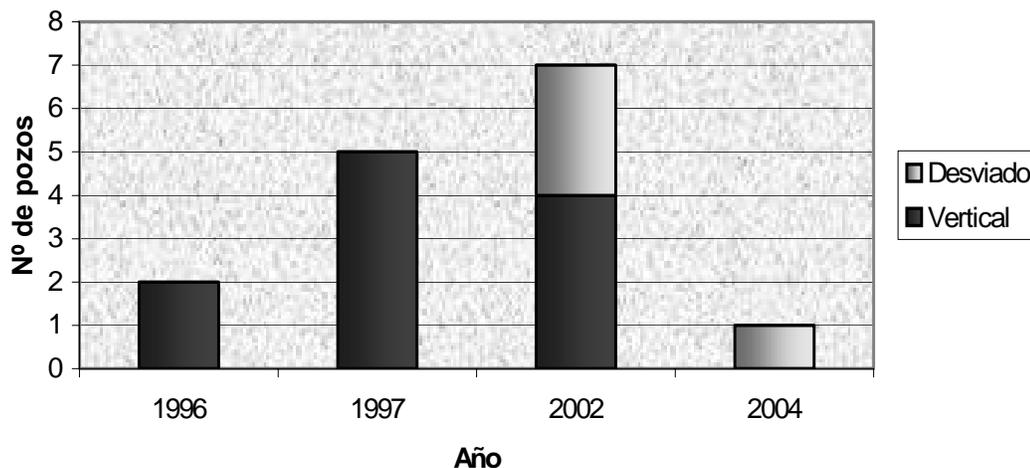
La mayor cantidad de aplicaciones se han realizado en el área de Occidente, y durante los últimos años en el área de Oriente, específicamente en los campos Melones, Bare y Miga. A continuación se muestra una proporción de cómo ha sido el uso de estos sistemas en los diferentes campos a lo largo de la historia en Venezuela, pudiéndose observar que el campo donde se ha tenido mayor aplicación es el de Lagunillas.



**Figura 9:** Porcentaje de uso de la tecnología en función de la zona de aplicación

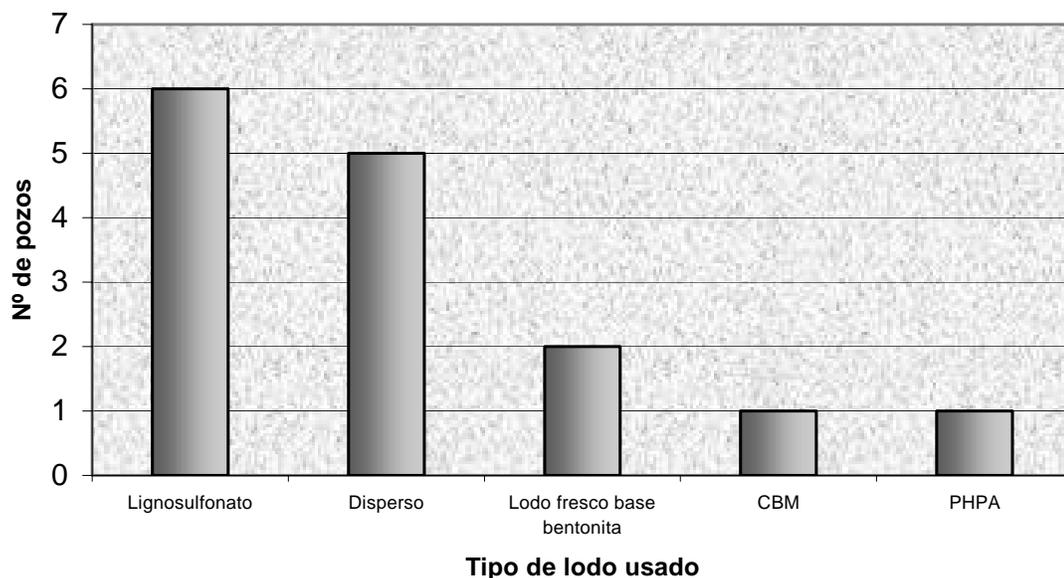
Para comenzar el proceso de adaptación durante el año 1996, se seleccionaron pozos de baja complejidad operacional, principalmente pozos verticales, de manera de favorecer el

proceso de aprendizaje de aplicación de la tecnología. Ya durante los últimos años, se han aplicado en pozos desviados y altamente inclinados, como se puede notar en la estadística presentada en la Figura 10.



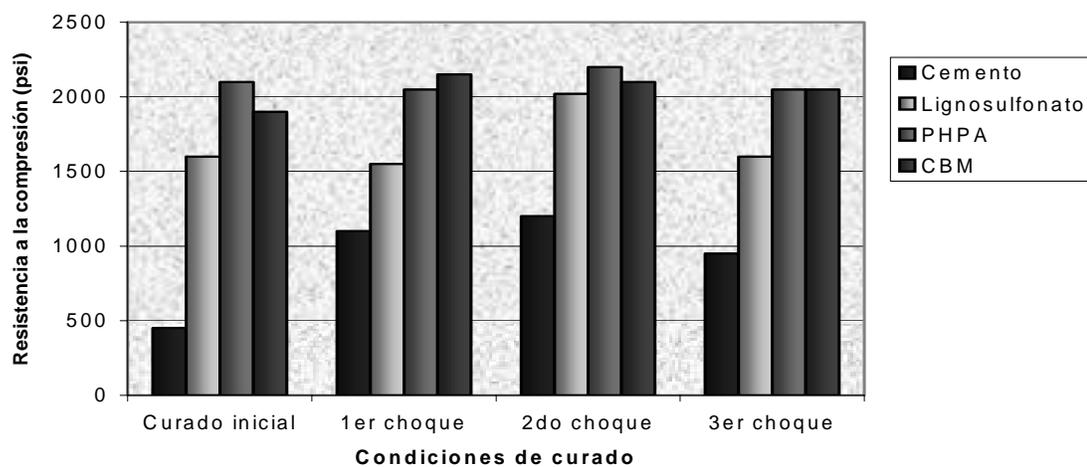
**Figura 10:** Frecuencia de uso de la tecnología de acuerdo al tipo de pozo

Como se conoce, este tipo de sistemas de escoria son formulados a partir de fluidos de perforación, especialmente base agua. En Venezuela se han usado mayormente tres clases de fluidos para la elaboración de las lechadas, que son los lodos tipo lignosulfonatos, dispersos y sistemas base bentonita. Una visión de cómo ha sido el uso de estos fluidos de acuerdo al número de pozos de aplicación se presenta a continuación:



**Figura 11:** Frecuencia de uso de diferentes tipos de fluidos de perforación

Para explicar como ha sido el desempeño de estos sistemas en los procesos de inyección de vapor, un estudio presentado en el año 1999 por Blanco et al. de la compañía PDVSA INTEVEP, muestra como es la variación de la resistencia a la compresión del cemento Portland comparado con los sistemas de escoria ante la aplicación de choques térmicos (Figura 12).



**Figura 12:** Efecto del choque térmico sobre la resistencia a la compresión

En la figura anterior se puede observar como todos los sistemas presentaron mejores valores de compresión que el cemento Portland. Esta diferencia tiene su base en la formación de la fase Portlandita en el cemento y no en los demás sistemas. Como se sabe esta fase es la encargada de los bajos valores de resistencia a la compresión en los cementos convencionales.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a las aplicaciones realizadas en Venezuela, ellos llegaron a la conclusión de que los sistemas con lodo cementante presentaron mejor estabilidad térmica y desarrollo de compresión que los sistemas convencionales de cemento Portland, después de haber pasado por choques térmicos que simularon un proceso de inyección de vapor. Además obtuvieron otras ventajas que fueron: excelente aislamiento zonal de acuerdo a los registros realizados, buenas propiedades para control de migración de gas, y lechadas menos costosas, debido a que las formuladas con escoria necesitaron de menor cantidad de aditivos que las realizadas con cemento Portland. (Blanco et al., 1999)

Una tabla detallada de los pozos cementados hasta la fecha en Venezuela con la tecnología de lodo cementante se muestra a continuación:

**Tabla 9:** Pozos cementados hasta la fecha en Venezuela con la tecnología de lodo cementante

Año	Pozo	Área	Zona	Tipo de lodo	Tipo de pozo
1996	LS 4841	Occidente	Lagumillas	Lodo fresco (bentonita)	Vertical
	LB 804		Bachaquero	Lodo fresco (bentonita)	Vertical
1997	LSE 5023	Occidente	Lagumillas	PHPA	Vertical
	LS 2236		Lagumillas	Bentonita	Vertical
	LB 2487		Bachaquero	Lignosulfonato	Vertical
	LB 2536		Bachaquero	Lignosulfonato	Vertical
	LB 2539		Bachaquero	Lignosulfonato	Vertical
	LS 5572		Lagumillas	Disperso	Vertical
2002	LS 5573	Occidente	Lagumillas	Disperso	Vertical
	LS 5574		Lagumillas	Disperso	Vertical
	LSJ 5575		Tia Juana	Disperso	Inclinado
	LS 5589		Lagumillas	Disperso	Vertical
	MEL 199		Melones	Lignosulfonato	Inclinado
2004	MFB 625	Oriente	Bare	Lignosulfonato	Inclinado
	MG-125		Miga	Lignosulfonato	Inclinado

## **6.8 Consideraciones económicas sobre el lodo cementante**

El costo de una lechada de lodo cementante se debe básicamente al fluido de perforación y la escoria. En Venezuela, la escoria es un producto importado que se trae al país a través de las compañías de servicio a muy alto precio, si se compara con el cemento Pórtland que es de producción nacional. Hoy en día, el precio de la escoria se encuentra alrededor de los 530 \$/ton, que equivale a 19,2 \$ por saco de 80 lbs cada uno, este precio es sumamente alto si se compara con un saco de cemento Pórtland que está alrededor de los 4 \$.

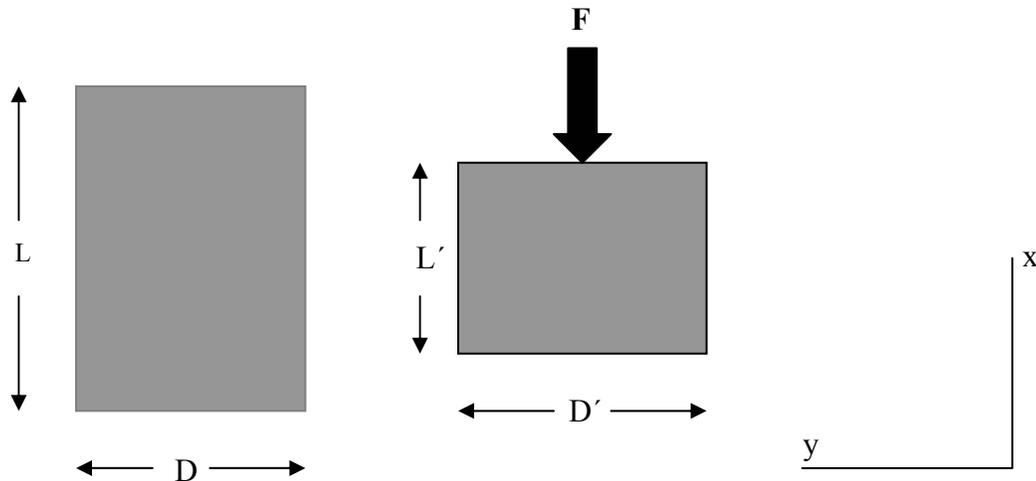
Sin embargo, a pesar de este alto precio, el costo por volumen del lodo cementante, generalmente es menor que el de las lechadas con cemento Pórtland, principalmente porque no se emplean aditivos costosos. Estos son ahorros evidentes especialmente en condiciones de pozos profundos, donde se presentan altas temperaturas y en pozos con problemas de alta presión de gas, ésta última por el empleo de lechadas antimigratorias de cemento Pórtland de muy alto costo. Adicionalmente a esto, existe un ahorro a considerar en las cementaciones de pozos profundos, en las que se elimina el uso de preflujos que representan entre un 20 y 60% de los costos de los aditivos (Cowan et al., 1992).

## **6. TEORÍA SOBRE ELASTICIDAD Y PROPIEDADES MECÁNICAS**

La mayoría de los materiales tienen una habilidad para resistir y recuperarse de deformaciones producidas por alguna fuerza. Esta habilidad se denomina elasticidad (Fjaer, 1992).

La teoría de elasticidad descansa en dos conceptos básicos que son el esfuerzo y la deformación. Podemos definir esfuerzo, como la capacidad que tiene un cuerpo de resistir carga por unidad de área. El esfuerzo se mide frecuentemente en Pascal ( $N/m^2$ ), bar, atmósferas, lpc o dinas/cm<sup>2</sup>. La deformación puede ser definida como la relación que existe entre la nueva magnitud o forma de un elemento y su configuración original o no alterada, cuando es sometido a fuerzas externas.

La teoría de elasticidad trata con situaciones donde hay relaciones lineales y no lineales entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes. Consideremos una muestra de longitud  $L$  y sección transversal de área  $A = D^2$ , tal como lo muestra la Figura 13.



**Figura 13:** Deformación de un cuerpo rígido por acción de una fuerza.

Cuando la fuerza  $F$  es aplicada sobre la superficie, la longitud de la muestra se reduce a  $L'$ . El esfuerzo aplicado es  $\sigma_x = F/A$ , y su correspondiente elongación es  $\epsilon_x = (L-L')/L$ . Si la muestra se comporta linealmente, existe entonces una relación lineal entre  $\sigma_x$  y  $\epsilon_x$ , la cual podemos escribir:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta ecuación, es conocida como la Ley de Hooke. El coeficiente  $E$  es el *Módulo de Young*. Este es una medida de la resistencia de la muestra a ser comprimida por esfuerzos uniaxiales. Este módulo, pertenece a un grupo de coeficientes llamados módulos elásticos, y es considerado como una medida de la rigidez del cuerpo, ya que a través de este es posible cuantificar que tanto se deforma un material en respuesta a una fuerza externa.

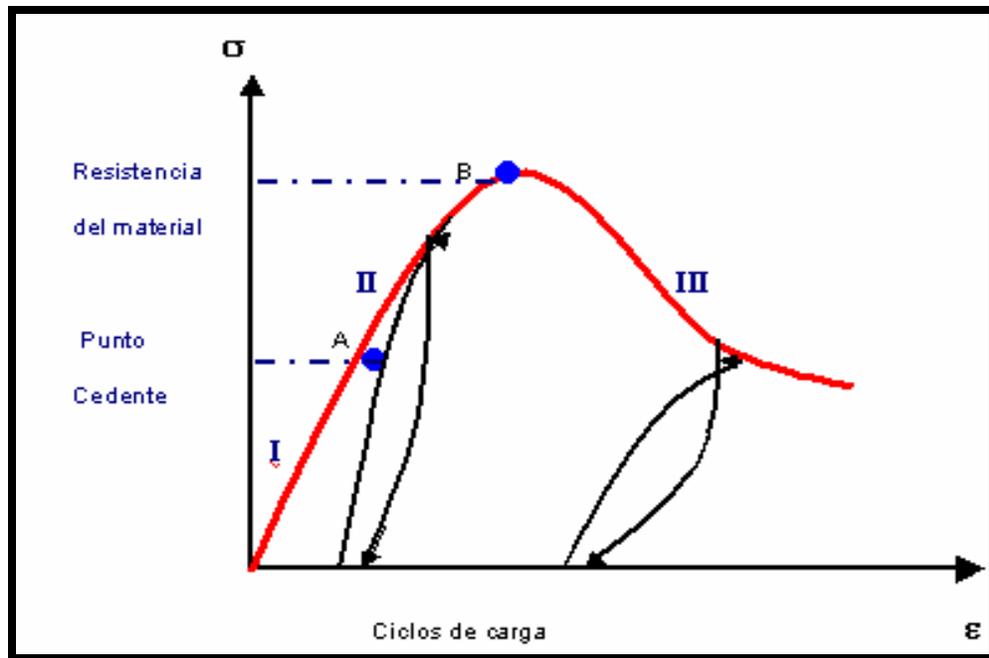
Otra consecuencia del esfuerzo  $\sigma_x$  aplicado, es un incremento en el ancho D de la muestra. La elongación lateral es  $\varepsilon_y = \varepsilon_z = (D-D')/D$ . Por lo general,  $D' > D$ , y por lo tanto,  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$  son negativos.

La relación definida como:  $\nu = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$  (Ec. 3), es otro parámetro elástico conocido como

*Relación de Poisson*. Esta es una medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal. Es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal observada, cuando una fuerza es aplicada al eje longitudinal de un material. Este parámetro es considerado como una medida de la dureza del material (Fjaer, 1992).

### **6.1 Comportamiento Esfuerzo – Deformación:**

Para observar el proceso de deformación y falla del material, el método más común consiste en la compresión axial de cilindros hechos del material que será evaluado, para los cuales se miden las deformaciones laterales y axiales en función de la carga axial aplicada, para luego graficar los esfuerzos vs. las deformaciones y efectuar su posterior interpretación. La Figura 14 presenta una curva tipo con su correspondiente análisis en función de las zonas de importancia.



**Figura 14:** Curva esfuerzo-deformación típica

En la región I, la cual, es ligeramente convexa hacia arriba, el comportamiento es prácticamente elástico. La histéresis puede estar presente pero el proceso de carga y descarga no produce deformaciones permanentes. En la región II, la pendiente de la curva se degrada progresivamente hasta llegar a cero, al incrementarse los esfuerzos. En esta región se producen deformaciones irreversibles. El punto máximo de la curva (B) se conoce como resistencia máxima del material o resistencia a la compresión, y es en este punto donde la curva esfuerzo - deformación marca el punto de transición entre el comportamiento dúctil y el comportamiento frágil o quebradizo del material (Sánchez & Vásquez, 1999).

Se dice que un material es dúctil bajo condiciones en las cuales, este puede mantener una deformación permanente sin perder su habilidad de resistir carga. Al entrar en la zona III, el material se comporta como un material quebradizo o frágil (Sánchez & Vásquez, 1999).

El proceso de falla se produce una vez que avanzamos a través de la región III. El punto A en el cual ocurre la transición entre el comportamiento elástico y el comportamiento dúctil es denominado punto cedente (Sánchez & Vásquez, 1999).

## **6.2 Propiedades mecánicas del cemento:**

Son parámetros que sirven de medida o comparación para determinados cálculos, encontrándose entre estos (Aguilera, 2001):

- Resistencia a la Compresión: es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza de carácter compresivo que es aplicado a su eje. Es medida en lpc
- Resistencia a la Tensión: es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza que actúa en forma tangencial sobre unidad de área. Es medida en lpc.
- Resistencia a la Flexión: es el grado de resistencia que opone un material ante una fuerza que trata de provocar el doblamiento del cuerpo. Es medida en lpc
- Módulo de Young: este es una medida de la resistencia de la muestra a ser comprimida por esfuerzos uniaxiales. Este módulo, pertenece a un grupo de coeficientes llamados módulos elásticos, y es considerado como una medida de la rigidez del cuerpo, ya que a través de él es posible cuantificar que tanto se deforma un material en respuesta a una fuerza externa. Es medido en lpc
- Relación de Poisson: esta es una medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal. Es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación longitudinal observada, cuando una fuerza es aplicada al eje longitudinal de un material. Este parámetro es considerado como una medida de la dureza del material. Es un parámetro adimensional.

## **6.3 Ensayos mecánicos:**

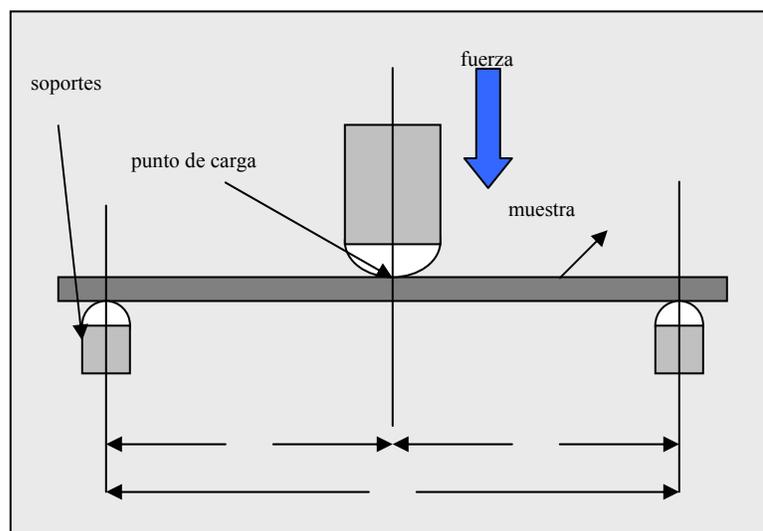
### **6.3.1 Resistencia a la compresión:**

La determinación de la resistencia a la Compresión se realiza en una celda triaxial, en la cual se realizan pruebas destructivas para determinar el comportamiento mecánico de materiales tales como, núcleos geológicos y de cemento. Las muestras son colocadas en la

celda triaxial, son sometidas a ciclos de carga, y el equipo arroja la información que permite realizar las curvas esfuerzo – deformación. A partir de estas curvas, es posible calcular los valores de Módulo de Young, Relación de Poisson y Resistencia a la Compresión.

### 6.3.2 Resistencia a la flexión:

La resistencia a la flexión, puede ser determinada usando la norma Norma ASTM D 790 – 99, en la cual una barra es colocada con carga en el punto central. El método cubre la determinación de la resistencia a la flexión de muestras en forma de barras rectangulares moldeadas directamente a través de una celda (Aguilera, 2001). La Figura 15 muestra un esquema del dispositivo utilizado para la realización de la prueba.

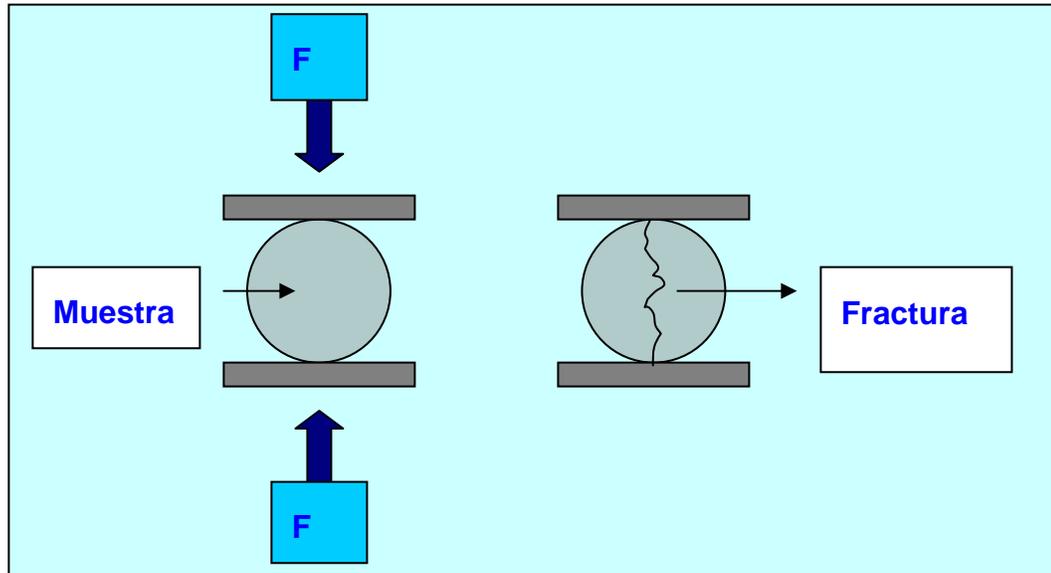


**Figura 15:** Esquema del equipo para la determinación de la Resistencia a la Flexión

### 6.3.3 Resistencia a la tensión:

Hoy en día solo existen métodos directos e indirectos que no son reconocidos como API para la determinación de la resistencia a la tensión en muestras de cemento. Los más comunes son los regidos por las normas ASTM C 496-90 y C 190-85. Siendo el primero de ellos conocido como el método Brasilerio, que fue el utilizado en el presente trabajo de investigación.

Se realiza en un equipo que se emplea para medir de manera rápida y efectiva la resistencia a la tensión de un material frágil. La prueba se caracteriza por ser de carácter destructivo. El equipo utiliza un sistema de prensas que permite suministrar y distribuir la carga sobre la muestra de cemento (Aguilera, 2001). La Figura 16 muestra un esquema del equipo utilizado para la realización de la prueba.

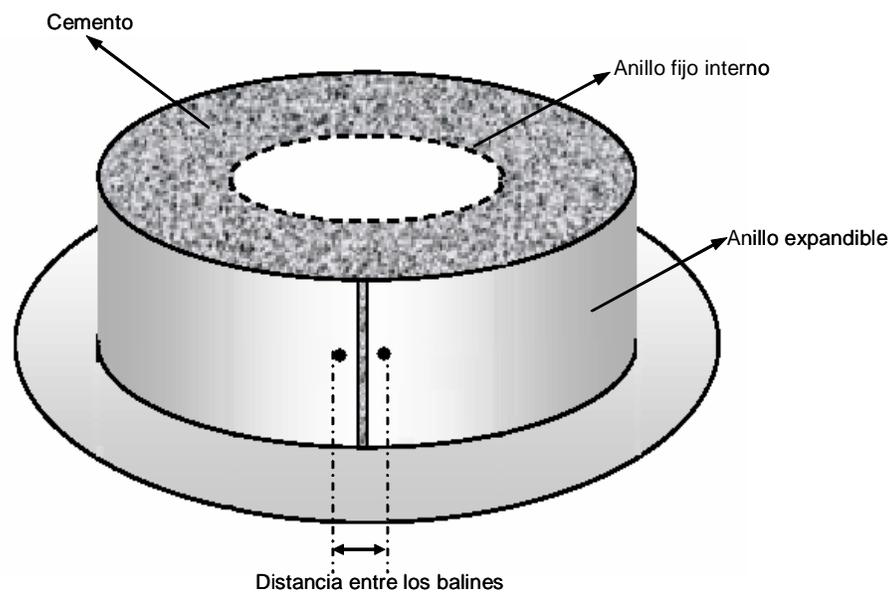


**Figura 16:** Esquema del equipo utilizado para la determinación de la Resistencia a la tensión.

#### **6.3.4 Prueba de expansión:**

El molde de expansión con forma de anillo es un dispositivo desarrollado por la compañía Halliburton para simular las propiedades de expansión de las composiciones de cemento cuando son colocadas en un ambiente de curado que simule el anular de un pozo. Este molde consiste en una placa inferior y superior, un anillo fijo interno que simula el revestimiento y un anillo expandible externo que simula la formación. Cuando el cemento colocado en el interior endurece y se expande, el diámetro del anillo externo crece y las distancia entre los balines de acero colocados en él aumenta (Baumgarte, Thiercelin & Klaus, 1999).

Debido a esto, la prueba consiste en medir con un micrómetro la separación del anillo expandible cada 24 horas durante 3 días, una vez que el dispositivo haya sido extraído de la cámara de curado. La expansión lineal de la lechada es calculada a través de una diferencia de lecturas multiplicadas por un factor que depende de la circunferencia del molde (Baumgarte et al., 1999).



**Figura 17:** Esquema del molde utilizado para la determinación del porcentaje de expansión de la lechada

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo de investigación, se emplearon los materiales, equipos y procedimientos descritos a continuación:

### 1. Materiales:

**Fluidos de perforación:** para la formulación de los fluidos preparados, como fueron el sistema A, B y C, utilizados para el diseño de los sistemas de lodo cementante, se emplearon todos los aditivos mencionados en las Tablas 12, 13 y 14.

**Hidróxido de sodio (NaOH):** aditivo usado como activador en las lechadas de lodo cementante, con influencia principalmente en el tiempo de espesamiento. También llamado Soda Cáustica, es un material sólido, blanco, cristalino, sin olor que absorbe humedad del aire. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor. Es sumamente corrosivo y puede causar quemaduras graves en todo tejido con el cual entra en contacto. Tiene un pH de 12 y una gravedad específica de 2,13.

**Carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>):** aditivo usado como activador en las lechadas de lodo cementante, con influencia en el desarrollo de la resistencia a la compresión. También llamado Soda Ash, es un material alcalino sólido de gránulos blancos sin olor, que puede causar irritación de los ojos y piel. Tiene un pH de 11,3 y una gravedad específica de 2,53.

**Lignito:** aditivo utilizado como dispersante en los fluidos de perforación y lechadas de cemento. El lignito es un polvo de color negro, proveniente del carbón, con un peso específico de 1,7. Además de dispersar la lechada, tiene la característica de retardar y mejorar el control del filtrado.

**Escoria:** la escoria utilizada fue la fabricada por la compañía “Blue Circle Cement” bajo el nombre de “NewCem”. Es un polvo de color “beige” de gravedad específica 2,93 y una fineza “Blaine” promedio de 520 m<sup>2</sup>/kg, que presenta la siguiente composición química:

**Tabla 10:** Composición química de la escoria “New Cem”

Componentes (%)	Escoria
Oxido de calcio	38,42
Oxido de silicio	35,63
Oxido de aluminio	10,70
Oxido férrico	0,96
Oxido de magnesio	12,48
Azufre	0,94
Oxido de potasio	0,36

## 2. Equipos de laboratorio:

En esta sección se mencionan y describen brevemente los equipos empleados para realizar las diferentes pruebas en el laboratorio, comenzando con los equipos utilizados para caracterizar los fluidos de perforación, y luego para la caracterización de las lechadas de lodo cementante.

### 2.1 Equipos usados en la preparación y pruebas de los fluidos de perforación:

- a) **Balanza Electrónica Marca Mettler, Modelo PE 1600:** usada para pesar los aditivos según la formulación del fluido de perforación. Tiene una capacidad máxima de  $1600 \pm 0,01$  gramos.



**Figura 18:** Balanza Electrónica, Marca Mettler PE 1600

- b) **Agitadores Marca Fann, Modelo Hamilton Beach Commercial:** equipo utilizado para la preparación del fluido de perforación. Consta de un vaso metálico que al colocarlo sobre un soporte acciona el motor del equipo, haciendo girar el eje del agitador. Tiene la capacidad de soportar tres vasos para la preparación de mezclas independientes con tres velocidades de agitación distintas cada una.



**Figura 19:** Agitadores

- c) **Horno para rolado:** utilizado para el envejecimiento del fluido de perforación según procedimiento descrito en las especificaciones API Spec 13B-1. Este horno está equipado con rodillos o sistemas de poleas para rotar las celdas a velocidad constante, durante 16 horas a la temperatura en estudio. Una celda tiene la capacidad para un barril de laboratorio (350cc) de fluido de perforación.



**Figura 20:** Horno de rolado

- d) **Balanza Marca Fann, Modelo 140:** balanza usada para medir la densidad del fluido de perforación. Esta diseñada tal que la copa para lodo, situada en un extremo del brazo de la balanza, es balanceada por un contrapeso en el extremo opuesto y un carril libre de movimiento a lo largo de la escala graduada. Una burbuja de nivel es colocada sobre el brazo para permitir un balanceo exacto.



**Figura 21:** Balanza de lodo

- e) **Viscosímetro Marca Chandler Engineering, Modelo 35:** equipo usado para determinar las propiedades reológicas del fluido de perforación y de las lechadas de cemento. Es un viscosímetro rotatorio de lectura directa, que consta de una camisa de calentamiento donde se agrega el lodo o lechada, un dial que da la lectura del equipo y una perilla para variar las revoluciones del motor.



**Figura 22:** Viscosímetro

- f) **Medidor de pH Marca Oakton:** equipo digital para medir el pH de los fluidos de perforación. Tiene una precisión de  $\pm 0,01$  adimensional.



**Figura 23:** Medidor de pH

- g) **Equipo para filtrado API Marca Fann, Modelo Series 300:** equipo utilizado para medir la pérdida de filtrado de los fluidos de perforación a temperatura ambiente, según procedimiento descrito en las especificaciones API Spec 13B-1. Tiene la capacidad para 4 celdas de filtrado.



**Figura 24:** Equipo para filtrado API

- h) **Retorta Marca OFI Testing Equipment Inc, Serial 98-11:** equipo de medición de contenido de agua, aceite y sólidos. Un volumen de 50 cc de lodo se calienta para evaporar los componentes líquidos los cuales son condensados y recogidos en un receptor graduado. Los volúmenes de líquido son determinados mediante la lectura de las mediciones de las fases de agua y aceite en el receptor y el volumen de sólidos se obtiene por diferencia.



**Figura 25:** Retorta

## **2.2 Equipos usados en la caracterización de las lechadas de lodo cementante:**

Para el desarrollo del trabajo de laboratorio, formulación de las lechadas y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los sistemas se requirió del uso de los siguientes equipos:

- a) **Balanza electrónica, Marca Mettler, Modelo PM2000:** utilizada para pesar los aditivos de la lechada de lodo cementante según la formulación. Tiene una capacidad máxima de  $2000 \pm 0,01$  gramos.



**Figura 26:** Balanza electrónica, Marca Mettler PM2000

- b) **Mezcladora, Marca Chandler Engineering Company, Modelo 3060-110V:** mezclador con aspas y botones para manipularlo, con 2 velocidades ( $4000 \pm 200$  rpm. y  $12000 \pm 500$  rpm.) en modo automático y velocidades variables en modo manual, utilizado para preparar la lechada según la formulación.



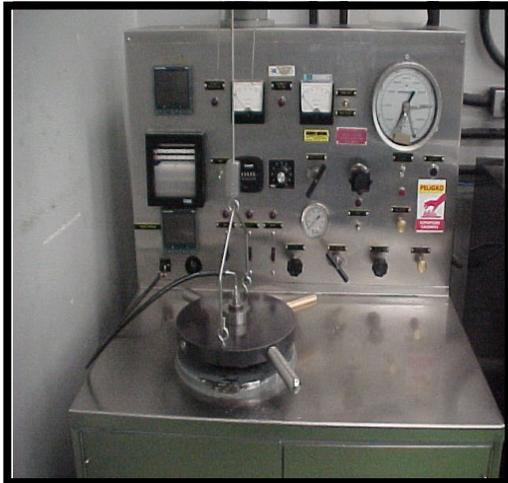
**Figura 27:** Mezcladora

- c) **Balanza para densidad de fluidos presurizada, Marca Halliburton Company, Modelo único:** utilizada para medir la densidad de la lechada de cemento, según procedimiento descrito en las especificaciones API RP 10B.



**Figura 28:** Balanza presurizada

- d) **Consistómetro presurizado, Marca Chandler Engineering Company, Modelo Cp8:** utilizado para determinar el tiempo en que la lechada de cemento es bombeable dentro del pozo a presión y temperaturas simuladas, según procedimiento descrito en las especificaciones API RP 10B.



**Figura 29:** Consistómetro presurizado

- e) **Cámara de curado presurizada, Marca Chandler Engineering Company, Modelo CCI:** utilizada para curar la lechada de cemento a la presión y temperatura de pozo, con la finalidad de determinar posteriormente los estudios mecánicos y la sedimentación de la muestra estudiada. La lechada de cemento es colocada en moldes ya preparados, los cuales se introducen en el recipiente de curado presurizado a la temperatura deseada para iniciar la prueba (normalmente  $80 \pm 5$  °F). Se aplica calor y presión de acuerdo al programa de la prueba y se deja la muestra por un lapso de veinticuatro horas.



**Figura 30:** Cámara de curado presurizada

- f) **Prensa mecánica, Marca Shimadzu, Modelo UH-20A:** utilizada para realizar los ensayos de resistencia a la compresión convencional y flexión de una muestra de cemento. El ensayo realizado es de tipo destructivo, y la carga es expresada en toneladas-fuerza (Tonf).



**Figura 31:** Prensa mecánica

- g) **Consistómetro atmosférico, Marca Chandler Engineering Company, Modelo 1250:** empleado para acondicionar la lechada a la temperatura en estudio, a la cual se le determinará posteriormente la reología, pérdida de filtrado y el fluido libre.



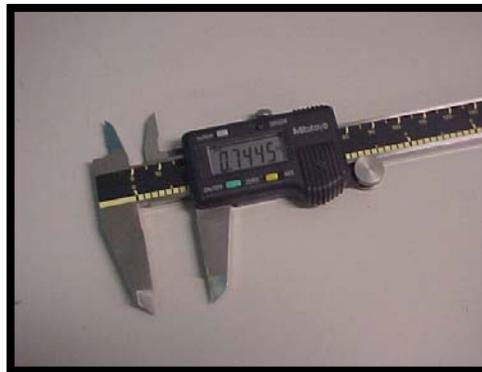
**Figura 32:** Consistómetro atmosférico

- h) **Cámara de filtrado, Marca OFI, Modelo PCA:** esta cámara es utilizada para medir la pérdida de filtrado en la lechada de cemento y la misma consiste en una celda de filtrado de 500 cc, la cual está diseñada para operar a altas presiones y temperaturas.



**Figura 33:** Cámara de filtrado

- i) **Vernier, Marca Mitutoyo:** utilizado para medir longitudes de las muestras de cemento, en los ensayos de resistencia a la compresión convencional, flexión y sedimentación. Viene en unidades de milímetros y pulgadas, con precisión de  $\pm 0,0001$  pulgadas ó  $0,0001$  milímetros.



**Figura 34:** Vernier

- j) **Cilindro graduado de 250cc:** utilizado para estimar el agua libre en la lechada de cemento según procedimiento descrito en las especificaciones API RP 10B.
- k) **Estufa, marca Memmert, Modelo 400:** este equipo se empleó para secar los núcleos de cemento a una temperatura de 40°C, su rango de operación es de 20 a 220°C.



**Figura 35:** Estufa

- l) **Celdas BP:** celdas utilizadas como moldes para generar los núcleos de cemento que serán utilizados para las pruebas de sedimentación y ensayos mecánicos.



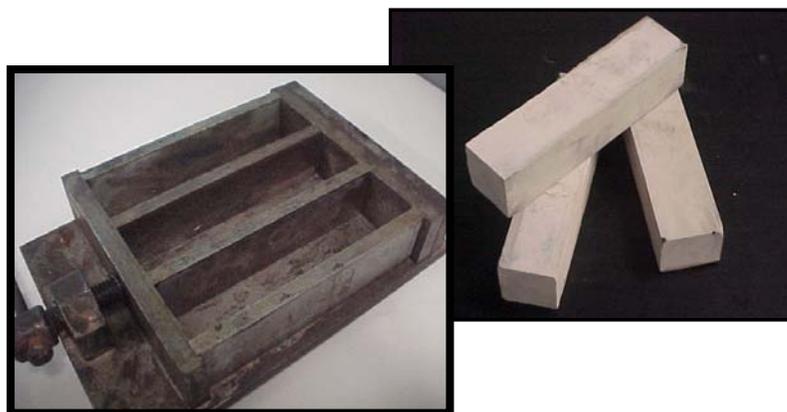
**Figura 36:** Celda BP

- m) **Celda Triaxial para Prueba de Resistencia a la Compresión y Tensión Indirecta:** equipo en el cual se efectúan pruebas destructivas para determinar las propiedades mecánicas del cemento, tales como Resistencia a la Compresión, el Módulo de Young y la Relación de Poisson, así como la resistencia a la tensión indirecta.



**Figura 37:** Celda triaxial

- n) **Celda de ensayo de flexión:** molde empleado para formar las barras con las lechadas de lodo cementante, utilizadas en los ensayos de flexión. Tiene la capacidad para tres muestras.



**Figura 38:** Celda para ensayo de flexión

- o) **Celdas de expansión:** moldes con forma de anillo que simulan el anular de un pozo, empleados para medir la expansión de una muestra de cemento. Consta de un anillo expandible con dos balines de acero.



**Figura 39:** Celdas de expansión

- p) **Tornillo micrométrico, Marca VIS:** equipo empleado para medir la distancia entre los dos balines de acero presentes en las celdas de expansión. Posee una capacidad de medición máxima de una pulgada con precisión de  $\pm 0,0001$ ".



**Figura 40:** Tornillo micrométrico

### 3. Condiciones de evaluación:

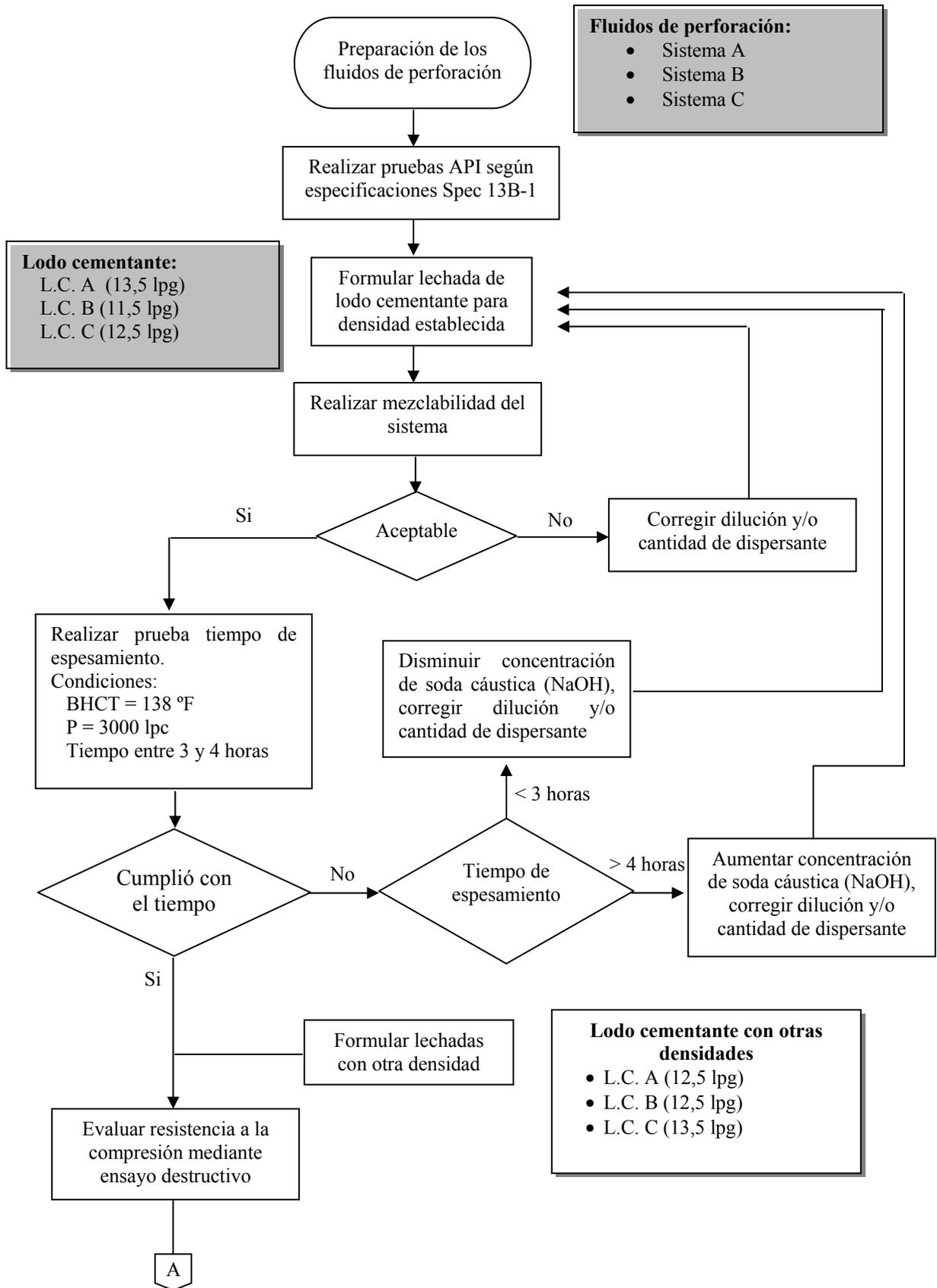
Para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación y poder desarrollar todas las pruebas fundamentales que ayuden a la obtención de los resultados, se hace necesario la escogencia de ciertos parámetros de evaluación con el fin de simular condiciones reales de pozo a nivel de laboratorio. Estas condiciones fueron tomadas de un pozo típico del área de Lagunillas, las cuales se presentan a continuación:

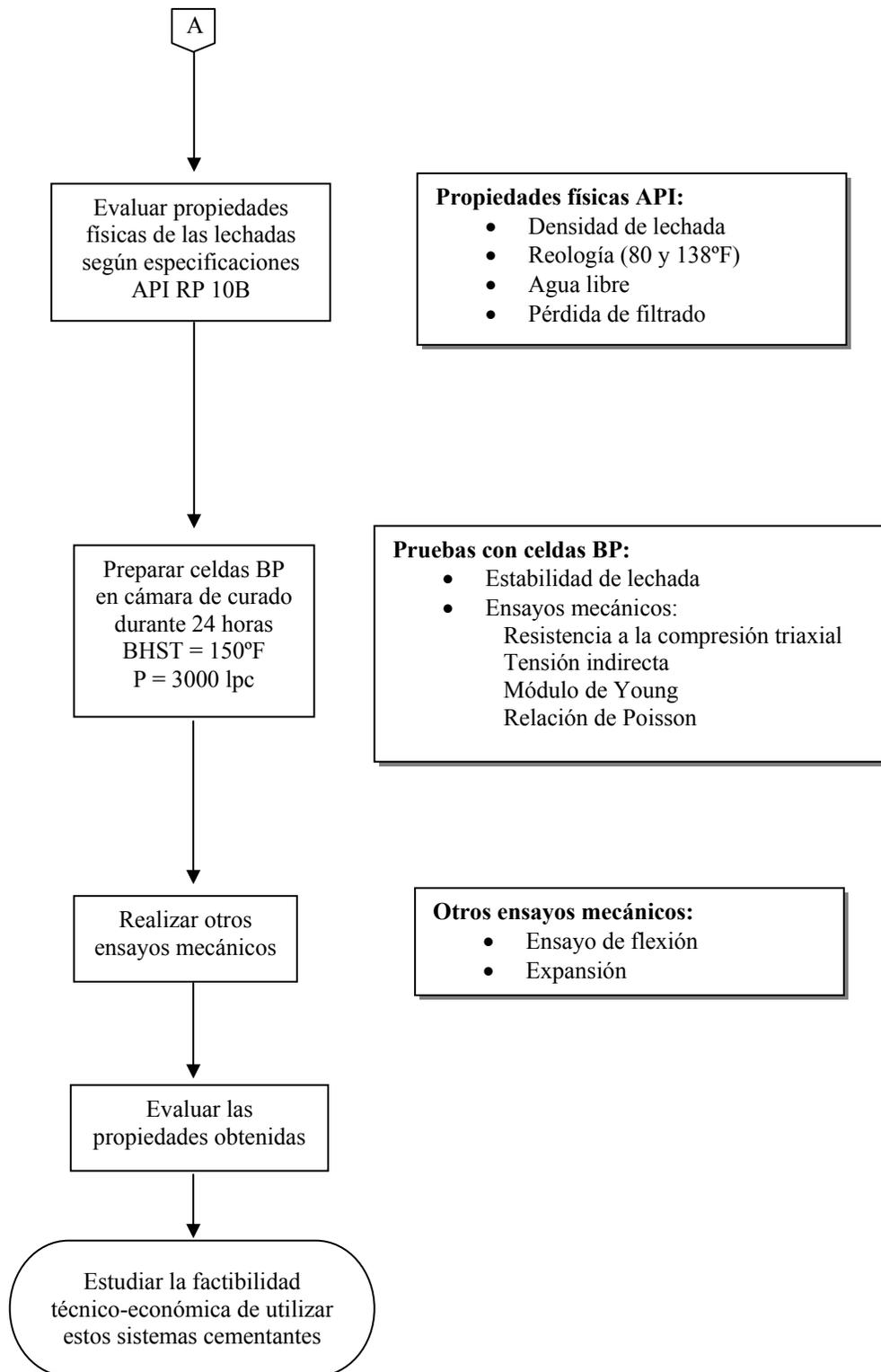
**Tabla 11:** Condiciones de evaluación de los sistemas

Presión estática promedio	3000 lpc
Temperatura estática de fondo (BHST)	150 °F
Temperatura circulante de fondo (BHCT)	138 °F
Tiempo de espesamiento recomendado	3 – 4 horas

### 4. Procedimiento experimental:

A continuación se presenta un esquema general del procedimiento realizado para desarrollar este trabajo de investigación, enfocado principalmente a los pasos llevados a cabo en el laboratorio para obtener los resultados experimentales de las propiedades físicas y mecánicas de las lechadas diseñadas. Comenzando con la preparación de los fluidos de perforación, diseño de las lechadas, ajuste de las propiedades de tiempo de espesamiento, resistencia a la compresión, y la evaluación de otras propiedades físicas y mecánicas, permitieron estudiar la factibilidad técnica de utilizar los fluidos de perforación poliméricos comerciales A, B y C como base para elaborar lechadas de lodo cementante.





**Figura 41:** Esquema general de la metodología desarrollada en el trabajo de investigación

#### 4.1 Preparación de los fluidos de perforación:

Como primer paso se procedió a la elaboración y caracterización de los fluidos de perforación a ser utilizados como base para elaborar las lechadas de lodo cementante (ver detalles apéndice A.1, A.2 y A.3). Las formulaciones presentadas a continuación fueron las utilizadas en esta investigación, han sido probadas en diferentes campos de Venezuela, cumpliendo satisfactoriamente con las funciones para la cual fueron diseñadas, tal como se mencionó la sección 4.2 (ver Marco Teórico).

**Tabla 12:** Formulación del Sistema A

<b>Componentes</b>	<b>Función</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Agua	Fase continua	Bbl	0,84
Cloruro de potasio	Inhibidor de arcillas	Lb/bbl	10,50
Almidón	Controlador de filtrado secundario	Lb/bbl	3,00
Polímero 1	Viscosificante	Lb/bbl	2,00
Biocida	Bactericida	Lb/bbl	0,50
Polímero 2	Viscosificante-Controlador de filtrado secundario	Lb/bbl	1,50
Oxido de Magnesio	Controlador de pH	Lb/bbl	0,50
Aceite mineral	Lubricante	%	10,00
Glycoll	Inhibidor de arcillas	Lb/bbl	6,00
Carbonato de calcio	Controlador de filtrado primario	Lb/bbl	50,00

**Tabla 13:** Formulación del Sistema B

<b>Componentes</b>	<b>Función</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Agua	Fase continua	Bbl	0,32
Surfactante	Emulsificante	Lb/bbl	18,00
Almidón	Controlador de filtrado	Lb/bbl	2,00
Cloruro de Potasio	Inhibidor de arcillas	%	0,50
Aceite mineral	Fase dispersa	Bbl	0,68
Buffer	Controlador de pH	Gotas	20,00
Antiespumante	Evitar la formación de espumas en el mezclado	cc/bbl	1,00

**Tabla 14:** Formulación del Sistema C

<b>Componentes</b>	<b>Función</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Aceite mineral	Fase continua	Lb/bbl	270,00
Viscosificante 1	Viscosificante	Lb/bbl	5,00
Emulsificante 1	Humectante y emulsificante	Lb/bbl	2,00
Polímero C predisoluto	Controlador de filtrado	cc/bbl	40,00
Cal	Activador del emulsificante	Lb/bbl	3,00
Emulsificante 2	Humectante secundario	Lb/bbl	2,00
Carbonato de calcio	Agente de peso	Lb/bbl	107,00

#### **4.2 Caracterización de los fluidos de perforación:**

En esta sección se mencionan y describen las diferentes propiedades que se evaluaron para caracterizar cada uno de los fluidos de perforación preparados, siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API Spec 13B-1.

- a) Preparación del fluido de perforación siguiendo la formulación mostrada en las Tablas 12, 13 y 14.
- b) Determinación de la densidad: la medida se realizó en una balanza de lodos a temperatura ambiente (ver Figura 21, sección equipos) antes y después de envejecer con el fin de verificar que la densidad se encuentre en el valor esperado para la formulación utilizada.
- c) Envejecimiento del lodo durante 16 horas a 150°F (BHST) y 150lpc, empleando el equipo mostrado en la Figura 20.
- d) Determinación de la reología: las propiedades del lodo se midieron antes y después del envejecimiento a una temperatura de 120°F en un viscosímetro de cilindros concéntricos como el que se muestra en la Figura 22. Las lecturas tomadas fueron a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm, así como los geles a los 10 segundos y 10 minutos, siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API Spec 13B-1. Los valores de viscosidad plástica y punto cedente fueron obtenidos con base en el Modelo de flujo plástico de Bingham, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\mu_p = L_{600} - L_{300} \quad \text{(Ec. 4)}$$

donde:

$\mu_p$  = viscosidad plástica (cps)

$L_{600}$  = lectura del viscosímetro a 600 rpm (lbf/100pie<sup>2</sup>)

$L_{300}$  = lectura del viscosímetro a 300 rpm (lbf/100pie<sup>2</sup>)

$$\tau_o = L_{300} - \mu_p \quad \text{(Ec. 5)}$$

donde:

$\tau_o$  = punto cedente (lbf/100pie<sup>2</sup>)

- e) Determinación del filtrado API: en esta prueba se determinó el filtrado a los 30 minutos de cada uno de los sistemas preparados, con 100 lpc de presión y a temperatura ambiente con el equipo de filtración API (ver Figura 24, sección equipos), siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API Spec 13B-1 para pérdida de filtrado.
- f) Determinación del contenido de sólidos: en esta prueba se determinó el porcentaje de sólidos (%m/v) de cada uno de los sistemas con la retorta mostrada en la Figura 25 (ver sección equipos). Se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{sólidos calculado (m/v)} = \frac{(Plodo - Pfilt)}{Plodo} \times 100 \quad \text{(Ec. 6)}$$

donde:

$Plodo$  = peso del lodo colocado dentro de la celda de la retorta (grs)

$Pfilt$  = peso del filtrado obtenido de la prueba de retorta (grs)

Este contenido de sólidos también se pudo calcular teóricamente, para compararlo con el porcentaje obtenido de la prueba de retorta. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\%sólidos\ teórico(m/v) = \frac{Psólidos}{350} \times 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

$Psólidos$  = cantidad de material densificante por barril según formulación (grs)

- g) Determinación de pH: medición de ph de los fluidos con el equipo mostrado en la Figura 23 (ver sección equipos).

Una vez preparado cada uno de los sistemas de fluidos por primera vez y verificado que cumplieran con todas las propiedades recomendadas (Tablas 2, 4 y 6), solo se realizaron los pasos a, c y d para cada lote de lodo preparado con lo cual se garantiza la reproducibilidad de los resultados. Estos lotes serían utilizados próximamente para la formulación de las lechadas de lodo cementante.

### **4.3 Formulación de las lechadas de lodo cementante:**

El diseño de las lechadas se realizó mediante una hoja de cálculo, siguiendo el procedimiento descrito a continuación (ver también hoja de cálculo anexa – Apéndice B):

- 1) Introducir aditivos del fluido de perforación, entre ellos la cantidad de agua, aceite y material densificante por barril, esto para obtener una densidad aproximada del fluido, así como para calcular el porcentaje de sólidos teórico (Ec. 7).
- 2) Introducir el porcentaje de sólidos óptimo, generalmente hasta 8%, que debe tener el lodo para utilizarlo en la formulación de una lechada.
- 3) En caso de que el lodo tenga un porcentaje de sólidos mayor al óptimo, este debe mezclarse con algún fluido de dilución, principalmente agua. Este programa calcula la densidad que debe tener como mínimo el fluido de perforación para cumplir con

el porcentaje de sólidos óptimo. Esta densidad puede seguirse disminuyendo si la mezclabilidad al momento de realizar la lechada no es buena.

- 4) Introducir la cantidad en libras por barril de los aditivos que se usaran en la lechada, entre ellos los activadores (soda cáustica y soda ash), dispersante, sílica, entre otros.
- 5) Introducir la cantidad de escoria en libras por barril que se usarán en la preparación de la lechada. Variando la cantidad de escoria puede ajustarse la densidad requerida.
- 6) De la hoja de cálculo, se obtienen las cantidades de cada uno de los aditivos para preparar la lechada tanto a nivel de laboratorio como de campo.

Para el desarrollo de esta investigación, se decidió ajustar la densidad de las lechadas de lodo cementante según las presentadas en la Tabla 15.

**Tabla 15:** Densidades de lechadas para cada uno de los sistemas formulados

<b>Lechadas formuladas a partir del sistema:</b>	<b>Densidades ajustadas para cada sistema (lpg)</b>
A	12,5
	13,5
B	11,5
	12,5
C	12,5
	13,5

Igualmente se diseñaron lechadas con cemento Pórtland a las densidades presentadas en la tabla anterior, con el fin de comparar ensayos de resistencia a la compresión, flexión y tensión en los análisis de resultados. Esta lechada de cemento Pórtland es la más sencilla que puede ser formulada, que consta de cemento clase H + 5% bentonita. Esta bentonita simplemente es un aditivo utilizado como extendedor, para bajar la densidad de las lechadas.

#### **4.4 Mezclabilidad de los sistemas:**

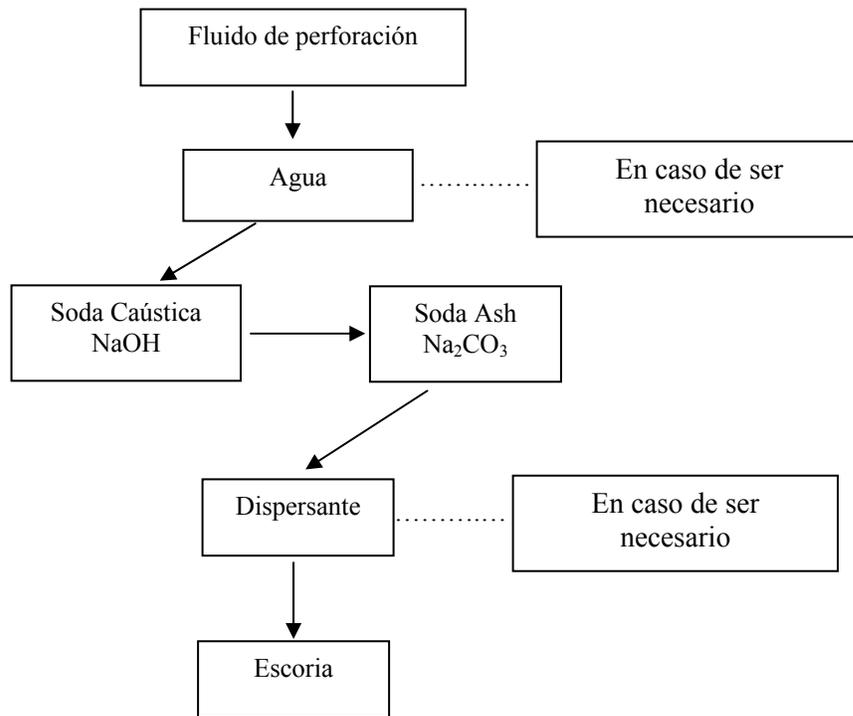
Las pruebas de mezclabilidad consisten en la determinación de la concentración óptima de lodo, agua, activadores, dispersante, y escoria para diseñar la lechada. Mediante observación se determina si todos los elementos se dispersan uniformemente, principalmente la escoria, siguiendo el procedimiento de mezcla presente en las especificaciones A.P.I. Spec10B.

Uno de los parámetros a tomar en cuenta al realizar la mezclabilidad es el contenido de sólidos (%m/v) del fluido de perforación, que no debe sobrepasar el 8% como se dijo anteriormente. En caso de ser mayor, se debe determinar el porcentaje mínimo de mezcla con agua que debe realizarse para asegurar el contenido de sólidos adecuado.

Al momento de la preparación de la lechada si no se presenta una buena dispersión de la escoria u otro de los aditivos utilizados, entonces, en el diseño se puede incluir y/o aumentar la cantidad de dispersante e incluso aumentar el porcentaje de dilución con agua para mejorar la calidad de mezcla y por ende la reología de la lechada.

Para esta fase, la concentración de activadores (NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) en libras por barril se mantiene constante, y la densidad de las lechadas para cada sistema fueron ajustadas con 13,5 lpg para el lodo cementante A, 11,5 lpg para el lodo cementante B y 12,5 lpg para el lodo cementante C.

A continuación se presenta el orden de mezcla general seguido para la preparación de las lechadas con cada uno de los sistemas de fluidos de perforación utilizados como base para su formulación. En el Apéndice A.4, A.5 y A.6 se presentan los pasos detallados de la preparación.



**Figura 42:** Orden de mezcla para la formulación de la lechada a partir de los fluidos de perforación A y B

Para el caso de la preparación de la lechada a partir del fluido C, una modificación al orden de mezcla debe realizarse. Como se sabe, la escoria necesita de agua para poder hidratarse y desarrollar consistencia. Siendo el fluido C un sistema 100% base aceite, se hace necesario la adición de una mezcla de surfactantes (molécula compatible con sistemas hidrófilos – hidrófobos) antes de agregar el agua, esto con el fin de cambiar la base al fluido y crear un sistema donde el agua pase a ser la fase continua y el aceite la fase dispersa.

#### 4.5 Caracterización de las lechadas mediante sus propiedades

a) **Densidad:** las densidades de cada lechada fueron ajustadas según los valores presentados en la Tabla 15 con la hoja de cálculo y verificadas con una balanza para densidad de fluidos presurizada como la observada en la Figura 28 (ver sección equipos), según procedimiento descrito en las especificaciones API RP 10B.

**b) Tiempo de espesamiento:**

El tiempo de espesamiento debía ser ajustado entre 3 y 4 horas según las condiciones expuestas en la Tabla 11. Esta prueba se realizó en un consistómetro presurizado como el mostrado en la Figura 29 (ver sección equipos).

En el tiempo de espesamiento de la lechada influyen principalmente la concentración de soda cáustica, dispersante y el porcentaje de dilución con agua. Para este estudio, se procedió a ajustar el tiempo de espesamiento variando el primero de ellos, en caso de ser muy corto (<3 horas), se disminuyó la concentración de soda cáustica, y en caso de ser muy largo (>4 horas), se aumentó. También puede variarse la concentración de dispersante, que tiene influencia como retardador, siempre y cuando la buena mezclabilidad del sistema se mantenga.

**c) Resistencia a la compresión mediante ensayo destructivo:**

Una vez ajustado el tiempo de espesamiento, se procedió a determinar la resistencia a la compresión convencional mediante el ensayo destructivo. Este método consiste en colocar la lechada en moldes cúbicos de 5x5 cm y llevarlo a la cámara de curado (ver Figura 30) durante 24 horas a la presión de 3000 lpc y 150°F (parámetros de evaluación). Luego, estos moldes son desmontados y los cubos de cemento ya fraguados son sometidos a presión con una prensa mecánica como la mostrada en la Figura 31 para determinar su resistencia a la compresión. La concentración del activador soda ash así como la cantidad de escoria son los principales responsables de la compresión del sistema.



**Figura 43:** Muestra de los cubos obtenidos con el lodo cementante C a 12,5 lpg para los ensayos de resistencia a la compresión mediante el ensayo destructivo

**d) Reología:**

La medición de la reología de cada una de las lechadas fueron realizadas, mediante el uso del viscosímetro rotacional (mostrado en la Figura 22), previo acondicionamiento de la lechada en el consistómetro atmosférico por 20 minutos, según el procedimiento descrito en las especificaciones API RP 10B, pruebas realizadas a una temperatura de 80° F y 138°F (BHCT). Se realizaron lecturas en el viscosímetro a las siguientes velocidades de corte: 1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200 y 300 rpm., primero en forma ascendente y luego en forma descendente, así como los geles a 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos. Luego se tomó un promedio de las lecturas a dichas velocidades de corte. Se graficó, el esfuerzo de corte vs. velocidad de corte y a partir de esta curva (ver Apéndice C) se obtuvo el comportamiento reológico al cual se adaptó cada sistema (Rodrigues, 1998).

**e) Agua libre:**

Para obtener el valor de la cantidad de agua libre presente en la lechada, se siguió el método recomendado en el procedimiento API RP 10B. Se acondiciona la lechada por 20 minutos en el consistómetro atmosférico a 80°F, se vuelve a aplicar agitación en la mezcladora por 35 seg. a 12000 rpm, y luego se traslada a un cilindro graduado de 250 cc, y se deja reposar por un tiempo de 2 horas. Al finalizar las dos horas, se procede a la

medición de la cantidad de agua que se encuentra por encima de la columna de cemento (Rodrigues, 1998).

**f) Pérdida de filtrado:**

Esta prueba fue realizada de dos maneras, la primera mediante el procedimiento normal API y la segunda mediante un método modificado denominado “contrarevoque”, ambas en la cámara de filtrado como la mostrada en la Figura 33. El segundo método reproduce de forma más real el comportamiento en el pozo.

En el procedimiento normal API, la muestra de lechada de cemento es acondicionada previamente en el consistómetro atmosférico por 20 minutos a la temperatura de 138 °F, igualmente la cámara de filtrado debe precalentarse a esta temperatura. Luego, la lechada es introducida en la celda y en la parte inferior es colocado un papel filtro (Marca Whatman grado 4) con una malla metálica. La celda es introducida en la cámara precalentada y se le aplica una presión de 1000 lpc como lo expresa la especificación API RP 10B. Sobre una balanza analítica se va recogiendo el filtrado en un cilindro graduado de 50cc hasta cumplir 30 minutos o hasta que la lechada de cemento se deshidrate en un tiempo menor al especificado (Rodrigues, 1998).

En el procedimiento modificado denominado “contrarevoque”, la diferencia se basa en que la lechada ahora pasará a través de un revoque de lodo como medio filtrante en la celda. Utilizando el mismo papel filtro Marca Whatman, se forma un revoque con el lodo utilizado para la preparación de la lechada, como lo expresa el procedimiento API para fluidos de perforación Spec. 13B-1, con 100 lpc de presión y temperatura ambiente. Una vez formado el revoque con el fluido, se extrae el lodo que queda dentro de la celda y se coloca la lechada, acondicionada previamente en el consistómetro, siguiendo el mismo procedimiento API para lechadas de cemento explicado anteriormente, aplicando 1000 lpc de presión y 138°F de temperatura. Igualmente, se recoge el filtrado en un cilindro graduado hasta cumplir 30 minutos o hasta que la lechada de cemento se deshidrate. (A. Blanco, comunicación personal, 25 Febrero, 2004).

Para aquellas pruebas que duren 30 minutos sin que exista escape de gas, se debe medir el volumen de filtrado recolectado, duplicar el valor y reportarlo como el valor del volumen de filtrado. En caso de que el tiempo sea menor al especificado, la pérdida de filtrado a los 30 minutos puede ser calculada a través de la siguiente fórmula (Rodrigues, 1998):

$$\text{Pérdida de filtrado API calculada} = \frac{2Qt \cdot 5,477}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

$Qt$  = filtrado obtenido durante el tiempo de la prueba (cc)

$t$  = tiempo de duración de la prueba (mín.)

**g) Estabilidad de lechada:**

Esta prueba consiste en determinar la capacidad de suspensión de la lechada por medio de la determinación de la densidad de una columna de cemento ya fraguado en distintos puntos, para determinar su uniformidad. La lechada es preparada e introducida en celdas denominadas BP (ver Figura 36), y luego llevadas a la cámara de curado durante 24 horas a la presión de 3000 lpc y 150°F. Una vez pasado el tiempo, las celdas son desmontadas y los núcleos de cemento obtenidos son cortados en longitudes de 2 pulgadas, estableciendo claramente la base y el tope de la muestra.

Cada uno de estos núcleos son pesados en seco para determinar su masa, por desplazamiento de agua son determinados los volúmenes, y dividiendo la masa entre el volumen es obtenida la densidad. La densidad de los núcleos son comparadas para evaluar su homogeneidad.



**Figura 44:** Determinación de la masa de los núcleos

**h) Resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson:**

Los núcleos obtenidos de la prueba de estabilidad de lechada son utilizados para los ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la tensión. Deben ser almacenados en alcohol etílico hasta el momento de realizar los ensayos, esto con el fin de detener la reacción del cemento. Los núcleos cuando van a ser usados, deben ser colocados en una estufa (ver Figura 35, sección equipos) a 40 °C durante dos horas para ser secados.

Esta prueba de resistencia se realiza en una celda triaxial, como la mostrada en la Figura 37 (ver sección equipos) donde cada núcleo es colocado en la celda de prueba. Se inicia el proceso de aplicación e incremento de carga sobre cada una de las muestras en evaluación y se reportan las condiciones de carga bajo las cuales ocurre la falla. La resistencia a la compresión de cada sistema fue reportada en lpc. Luego, se generaron curvas esfuerzo – deformación a partir de la información registrada por los transductores de desplazamiento en el momento de aplicación de la carga.

El Módulo de Young de cada uno de los sistemas es determinado como la pendiente de la curva esfuerzo – deformación correspondiente a cada sistema en el punto que corresponde al 50% del esfuerzo compresivo.

El valor de la relación de Poisson de cada sistema es determinado como el valor de la abcisa que intercepta verticalmente el valor de la pendiente de la curva esfuerzo – deformación que corresponde al 50% del esfuerzo compresivo.

i) **Resistencia a la tensión (Método Brasileño):**

La prueba para la determinación de la resistencia a la tensión se caracteriza por ser del tipo destructivo. El equipo utilizado presenta un sistema de prensas que permite suministrar y distribuir la carga sobre la muestra.

Se elaboraron muestras cilíndricas con el mismo procedimiento con el cual se elaboraron para la prueba de resistencia a la compresión, con la condición de que la longitud del cilindro debe ser mayor o igual a la longitud del radio.

Se aplicó a través de las prensas una carga lineal que generó una distribución de esfuerzo normal a lo largo del diámetro paralelo al eje de carga. Luego, se reportaron las condiciones de carga a las cuales ocurre la falla de cada muestra. La resistencia a la tensión fue determinada haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$T_o = 92245,44 \frac{F \text{ máx}}{D \times L} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde,

$T_o$  = Resistencia a la tensión (lpc)

$F_{\text{máx}}$  = carga a la cual la muestra falla (KNw)

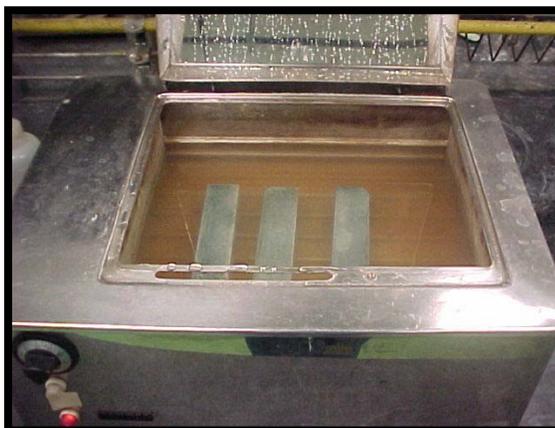
$D$  = Diámetro de la muestra (mm)

$L$  = longitud de la muestra (mm)

j) **Ensayo de flexión:**

Las pruebas para la determinación de la resistencia a la flexión, se realizaron siguiendo las especificaciones de la Norma ASTM D 790 – 99. “Método Estándar de Prueba para la Determinación de las Propiedades Flexurales de Materiales Plásticos Reforzados y no Reforzados y Materiales Aislantes de Electricidad”.

La lechada es preparada y colocada en una celda (ver Figura 38) durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se desmoldan las barras, 3 por cada celda, y se sumergen en un baño de María, como el mostrado en la Figura 45, a la temperatura de 150°F y presión atmosférica por 48 horas más. En total el tiempo de curado de estas muestras es de 72 horas.



**Figura 45:** Curado de las muestras en baño de María

Pasadas las 72 horas de curado, se retiran las muestras del baño, y son llevadas a la prensa mecánica para la medición de la carga soportada por cada barra. El método de carga aplicada fue el de carga en el punto medio de la longitud de la muestra.

En el instante en que las muestras fallaron, se tomaron las lecturas registradas en el equipo. Estas lecturas se reportan por equipo en Tnf. Para la determinación de la resistencia a la flexión de cada sistema, se utilizó la siguiente ecuación

$$\sigma_f = \frac{3 \times P \times l}{2bd^2} \times (2016) \quad \text{(Ec. 10)}$$

donde,

$\sigma_f$  = Resistencia a la Flexión (lpc)

$P$  = Carga aplicada a la muestra (lbf)

$l$  = Longitud de la muestra (pulgadas.)

$b$  = Ancho de la muestra (pulgadas)

$d$  = altura de la muestra (pulgadas)

2016 = Factor de conversión de Tnf a lbf

k) **Prueba de expansión:**

Esta prueba consiste en medir la expansión producida por el fraguado del cemento, mediante moldes con forma de anillo como los observados en la Figura 39.

El procedimiento consiste en preparar la lechada y acondicionarla en el consistómetro atmosférico por 20 minutos a 80°F, luego la lechada es introducida en cada uno de los moldes limpios y engrasados. Con un tornillo micrométrico se mide la distancia entre la parte externa de los balines de acero colocados a cada lado de la rendija del anillo expandible como primera medida. Luego, estas celdas son llevadas a la cámara de curado a una presión de 3000 lpc y 150°F. Cada 24 horas las celdas son sacadas de la cámara, se mide con el tornillo micrométrico la distancia entre los balines y son llevadas nuevamente a presión y temperatura, hasta una duración total de 72 horas.

La fórmula para determinar el porcentaje de expansión viene dada por:

$$\% \text{ expansión} = (Mt - Mi) \times 10,95 \quad \text{(Ec. 11)}$$

donde:

$Mt$  = medición del micrómetro en el tiempo de curado (pulgadas)

$Mi$  = primera medición del micrómetro (pulgadas)

#### 4.6 Factibilidad económica

La factibilidad económica en este trabajo de investigación está dada por una comparación del costo por barril de lechada, bien sea formulada con cemento Pórtland, un lodo cementante disperso como los usados en el año 2002, y los diseñados en este trabajo de investigación, que son los formulados a partir de los sistemas de fluidos A, B y C.

Tomando las características de un pozo del área de Lagunillas, se procedió a determinar la cantidad de barriles que haría falta para cementarlo. Una vez obtenido esto, se diseñaron a través de la hoja de cálculo usando las formulaciones finales de lechada presentes en la Tabla 26 la cantidad de aditivos que se necesitarían para formular el lodo cementante a partir de los fluidos estudiados.

El diseño de la lechada de cemento Pórtland y el lodo cementante disperso, fue tomado de una estimación de costos presentado por una compañía de servicio para esas características de pozo. Igualmente, fueron tomados los costos de servicios y equipos, suponiendo que se mantienen constantes para las lechadas diseñadas con los fluidos A, B y C.

## **PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se presentan y analizan los diferentes resultados obtenidos de esta investigación, cuyo objetivo principal es el estudio de factibilidad técnico-económica del uso de fluidos poliméricos comerciales en la formulación de sistemas de lodo cementante. Este estudio de factibilidad está dado por una comparación de las propiedades físicas y mecánicas de las lechadas obtenidas a partir de los tres sistemas de fluidos evaluados, así como también una comparación con antiguos sistemas de lodo cementante que han sido utilizados hasta la fecha en Venezuela y el mundo. Durante la discusión de los resultados se utilizará la nomenclatura L.C (lodo cementante) seguido de la letra del tipo de fluido de perforación utilizado para diseñarlo.

### **1. Caracterización de los fluidos de perforación:**

Esta caracterización está dada por una evaluación de las propiedades físicas de los fluidos de perforación tomados como base para formular las lechadas de lodo cementante. La densidad, reología, filtrado API, pH y contenido de sólidos fueron las propiedades medidas en el laboratorio siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API Spec13B-1, para luego ser comparadas con las obtenidas en las distintas aplicaciones de campo que se han realizado.

A continuación se presentan las lecturas reológicas obtenidas para los tres sistemas de fluidos de perforación preparados, como fueron el sistema A, B y el fluido 100% base aceite C, antes y después de ser envejecidos 150°F, esta temperatura escogida de acuerdo a las condiciones de evaluación expuestas en la Tabla 11.

**Tabla 16:** Lecturas reológicas obtenidas a 120°F de la formulación presentada para el sistema A antes y después de ser envejecido durante 16 horas a 150°F

Tasa de corte		Lecturas del viscosímetro (lbf/100pie <sup>2</sup> )	
Rpm	seg <sup>-1</sup>	Natural	Envejecido
600	1021	42	54
300	511	33	43
200	340	28	40
100	170	24	34
6	10	14	20
3	5	12	19

**Tabla 17:** Lecturas reológicas obtenidas a 120°F de la formulación presentada para el sistema B antes y después de ser envejecido durante 16 horas a 150°F

Tasa de corte		Lecturas del viscosímetro (lbf/100pie <sup>2</sup> )	
Rpm	seg <sup>-1</sup>	Natural	Envejecido
600	1021	120	136
300	511	81	91
200	340	64	79
100	170	44	52
6	10	13	13
3	5	10	11

**Tabla 18:** Lecturas reológicas obtenidas a 120°F de la formulación presentada para el sistema C antes y después de ser envejecido durante 16 horas a 150°F

Tasa de corte		Lecturas del viscosímetro (lbf/100pie <sup>2</sup> )	
Rpm	seg <sup>-1</sup>	Natural	Envejecido
600	1021	29	32
300	511	16	19
200	340	11	12
100	170	7	8
6	10	3	3
3	5	3	3

Se puede notar que las lecturas reológicas de los fluidos cambian ligeramente antes y después de ser envejecidos, esto se debe a que los polímeros presentes en la formulación de cada uno de ellos tienen una mejor interacción con los demás aditivos, ayudado por la temperatura y el tiempo de agitación del envejecimiento, que son de 16 horas. Con estas lecturas pueden ser obtenidas las propiedades reológicas del fluido, que son presentadas en la Tabla 19.

**Tabla 19:** Propiedades reológicas obtenidas a 120 °F de las formulaciones presentadas para los tres sistemas de fluidos de perforación después de ser envejecidos a 150°F

Propiedad reológica	Sistema de fluido de perforación					
	A		B		C	
	Ref.*	Medido	Ref.*	Medido	Ref.*	Medido
Viscosidad plástica, $\mu_p$ (cps)**	10-20	11	10-50	45	12-45	13
Punto cedente, $\tau_0$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )**	25-60	32	10-50	46	5-25	6
Fuerza de Gel 10'' (lbf/100pie <sup>2</sup> )	--	22	--	11	--	3
Fuerza de Gel 10' (lbf/100pie <sup>2</sup> )	--	26	--	12	--	3

\* valores de referencia tomados de las Tablas 2, 4 y 6.

\*\* valores calculados de las ecuaciones 4 y 5.

Como se puede notar en la tabla anterior, las propiedades reológicas obtenidas para los tres sistemas de fluidos de perforación cumplen con las propiedades recomendadas por los fabricantes de este tipo de sistemas. En la columna de referencia se muestra un intervalo de valores de viscosidad plástica y punto cedente para distintas densidades que han sido estudiados y evaluados en campo como indispensables para que el fluido pueda cumplir con sus funciones. Además de las propiedades reológicas, fueron medidas otras propiedades físicas que ayudan a la caracterización de los fluidos, como son la densidad, filtrado API, pH y el porcentaje de sólidos. Estas propiedades se presentan a continuación:

**Tabla 20:** Propiedades físicas obtenidas para la formulación del sistema A después de ser envejecido durante 16 horas a 150°F

Propiedades	Valor		
Densidad	8,8 lpg		
Filtrado API	3cc/30mín		
pH	9,5		
% de sólidos teórico (m/v)	14,28 %		
% de sólidos calculado (m/v)*	13,7 %	<i>Plodo</i> **	46,0 grs
		<i>Pfilt</i> **	39,7 grs

\* valor calculado a partir de la ecuación 6.

\*\* *Plodo* y *Pfilt* valores obtenidos de la prueba de retorta

**Tabla 21:** Propiedades físicas obtenidas para la formulación del sistema B después de ser envejecido durante 16 horas a 150°F

Propiedades	Valor		
Densidad	7,3 lpg		
Filtrado API	Sin control		
pH	9,9		
% de sólidos teórico (m/v)	0 %		
% de sólidos calculado (m/v)*	0,6 %	<i>Plodo</i> **	43,21 grs
		<i>Pfilt</i> **	42,95 grs

\* valor calculado a partir de la ecuación 6

\*\* *Plodo* y *Pfilt* valores obtenidos de la prueba de retorta

**Tabla 22:** Propiedades físicas obtenidas para la formulación del sistema C después de ser envejecido durante 16 horas a 150°F

Propiedades	Valor		
Densidad	8,6 lpg		
Filtrado API	0cc/30mín		
% de sólidos teórico (m/v)	30,57 %		
% de sólidos calculado (m/v)*	31,5 %	<i>Plodo</i> **	51,90 grs
		<i>Pfilt</i> **	35,55 grs

\* valor calculado a partir de la ecuación 6

\*\* *Plodo* y *Pfilt* valores obtenidos de la prueba de retorta

En las Tablas 20, 21 y 22 se presentan las propiedades físicas obtenidas para los tres sistemas de fluidos de perforación estudiados. Las densidades obtenidas fueron las ajustadas de acuerdo a la formulación, el pH para los base agua se encuentra dentro del rango usado en los fluidos, generalmente entre 9 y 10,5 (IMCO Services, 1996), y el porcentaje de sólidos calculado fue similar al valor teórico.

En la propiedad de filtrado API, los fluidos A y C cumplieron con los valores recomendados (según Tablas 2 y 6), sin embargo, para el fluido B no fue así. Este tipo de fluido tiene la característica de bajo o ningún contenido de sólidos en su formulación ya que son utilizados para la perforación de zonas depletadas o de baja presión, por lo tanto, los únicos aditivos responsables para cumplir con esta propiedad son los pocos sólidos presentes, bien sea los ripios provenientes de la formación y agentes de peso, y el controlador de filtrado. Además, ha sido comprobado que este tipo de fluidos al pasar a través de la mecha mejora la dispersión y tamaño de las gotas de aceite en el agua, haciendo que éstas se comporten como un sólido y mejoren la propiedad del filtrado. Para el caso del laboratorio, no se tenía agentes de peso en la formulación ni sólidos de formación, ni tampoco la energía proporcionada por una mecha en el pozo. Sin embargo, el sistema B fue utilizado para el diseño de las lechadas de lodo cementante en este trabajo de investigación, ya que la formulación utilizada ha sido probada en campo numerosas veces, aunque la propiedad del filtrado no pudo ser verificada en el laboratorio.

## **2. Caracterización de las lechadas:**

Una vez probado que los fluidos de perforación cumplen con las condiciones óptimas y las más cercanas obtenidas en campo, se procedió a diseñar las lechadas de lodo cementante a partir de estos fluidos, con el fin de verificar su factibilidad técnica.

### **2.1 Mezclabilidad de los sistemas de lodo cementante:**

A continuación se presentan las diferentes pruebas realizadas para el diseño y elaboración de las lechadas a partir de los fluidos de perforación A, B y C, donde fueron ajustadas las cantidades de agua, lodo, dispersante y escoria para obtener la mejor mezcla a la densidad de lechada requerida, mientras que la concentración de activadores se mantuvo constante. Las cantidades de los aditivos usados en la preparación de un barril de laboratorio fueron ajustados con el uso de la hoja de cálculo, como la presentada en el Apéndice B.

**Tabla 23:** Pruebas de mezclabilidad realizadas para la formulación de la lechada a partir del sistema A, ajustada a una densidad de 13,5 lpg

	N° de prueba						
	1	2	3	4	5	6	7
Densidad fluido base (lpg)	8,80	8,80	8,80	8,80	8,8	8,80	8,80
Agua (lb/bbl)	103	103	103	142	142	167	192
Densidad fluido diluido (lpg)	8,60	8,60	8,60	8,52	8,52	<b>8,47</b>	8,42
% de dilución con agua	43%	43%	43%	60%	60%	<b>70%</b>	80%
NaOH (lb/bbl)	4	4	4	4	4	<b>4</b>	4
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (lb/bbl)	8	8	8	8	8	<b>8</b>	8
Dispersante (lb/bbl)	0	1	2	1	2	<b>2</b>	2
Observaciones	No aceptable. No se llegó a mezclar con escoria por presentar aspecto muy viscoso	No aceptable. No se llegó a mezclar con escoria por presentar aspecto muy viscoso	No aceptable. Aspecto muy viscoso a simple vista, y mala dispersión de la escoria	No aceptable. Aspecto muy viscoso a simple vista, y mala dispersión de la escoria	No aceptable. Buena dispersión de la escoria pero no presentaba buena fluidez la lechada	<b>Aceptable. Buena fluidez y dispersión de la escoria</b>	Aceptable. Muy fluida la lechada con mucha cantidad de espuma

Lo primero realizado en el diseño de la mezclabilidad de la lechada de lodo cementante a partir del sistema A fue verificar el contenido de sólidos del sistema. De las pruebas de caracterización realizadas al fluido, se obtuvo que las 50 lbs/bbl de carbonato de calcio usado como material puenteante, representan aproximadamente un 14% de contenido de sólidos, por consiguiente, el fluido debía ser diluido como mínimo con un 43% de agua para asegurar el porcentaje de sólidos óptimo, que es de 8%. La relación de NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en la lechada se mantuvo constante y la densidad se ajustó a 13,5 lpg antes de proceder a realizar las pruebas. Debido a que la viscosidad de la mezcla dificultaba la dispersión de la escoria, se procedió a incluir y evaluar la concentración óptima del dispersante. Igualmente, se decidió aumentar el porcentaje de dilución con agua debido a que la concentración del dispersante ya era la máxima recomendada y no se lograba aún una buena mezcla. El mejor

diseño obtenido mostró ser la formulación número 6, donde el fluido fue diluido con 70% de agua, y la concentración del dispersante fue de 2 lb/bbl.

**Tabla 24:** Pruebas de mezclabilidad realizadas para la formulación de la lechada a partir del sistema B, ajustada a una densidad de 11,5 lpg

	N° de prueba			
	1	2	3	4
Densidad fluido base (lpg)	7,30	7,30	7,30	7,30
Agua (lb/bbl)	0	29	52	70
Densidad fluido diluido (lpg)	7,30	7,42	7,50	7,57
Relación o/w del fluido	70/30	60/40	55/45	50/50
% de dilución con agua	0%	12%	20%	26%
NaOH (lb/bbl)	2	2	2	2
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (lb/bbl)	8	8	8	8
Observaciones	No aceptable. Aspecto muy viscoso a simple vista, y mala dispersión de la escoria	No aceptable. Aspecto muy viscoso a simple vista, y mala dispersión de la escoria	<b>Aceptable. Buena dispersión de la escoria y fluidez de la lechada</b>	Aceptable. Muy fluida la lechada con mucha cantidad de espuma

Debido a que el sistema B no poseía sólidos en su formulación, la primera prueba de mezcla fue realizada utilizando un 100% del lodo sin adicionar más agua a la lechada, sin embargo ésta presentó una alta viscosidad, por lo cual se decidió mezclar con agua para lograr disminuirla. La relación o/w del fluido fue reducida de 70/30 a 60/40, 55/45 y 50/50, manteniendo la relación constante de activadores NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en 2/8 (lb/bbl). El mejor diseño para el lodo cementante B ajustado a una densidad de 11,5 lpg fue con la formulación número 3, con 20% de dilución con agua.

**Tabla 25:** Prueba de mezclabilidad realizada para la formulación de la lechada a partir del sistema C, ajustada a una densidad de 12,5 lpg

	<b>N° de prueba</b>	
	<b>1</b>	
<b>Densidad fluido base (lpg)</b>	8,6	
<b>Densidad fluido diluido (lpg)</b>	8,4	
<b>Surfactante (lb/bbl)</b>	64	Representa un 74% de dilución total
<b>Agua (lb/bbl)</b>	127	
<b>NaOH (lb/bbl)</b>	4	
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (lb/bbl)</b>	10	
<b>Observaciones</b>	Aceptable. Buena dispersión de la escoria y fluidez de la lechada	

El diseño de la lechada a partir del fluido C, se realizó de manera distinta a las formuladas anteriormente, debido a que es un sistema 100% base aceite, y como se sabe, la técnica de cementación con lodo consiste en la solidificación de un fluido de perforación necesariamente base agua por medio de la escoria.

Basado en una tecnología desarrollada por la compañía PDVSA denominada “Lechada Tensoactiva”, se realizó el diseño del lodo cementante a partir del fluido C. Cierta cantidad de agua y surfactantes fueron añadidos en la formulación de la lechada, esto con el fin de formar un sistema homogéneo donde el aceite proveniente del fluido se emulsione en la cantidad de agua adicionada, que ahora pasa a ser la fase continua, y así poder el material cementante hidratarse. Como se sabe, los surfactantes son moléculas con afinidad a dos fases o líquidos no miscibles, logrando la creación de sistemas homogéneos de aceite en agua o de agua en aceite, y por su adsorción en sólidos permite cambiar la mojabilidad de estos al agua o al aceite.

El fluido base C de acuerdo a las propiedades físicas obtenidas de la caracterización, posee en su formulación un porcentaje de sólidos aproximadamente de 30%, por lo cual debía realizarse un 74% de dilución como mínimo para asegurar el contenido de sólidos óptimo.

Este porcentaje de dilución formará la nueva fase continua de la mezcla que será el agua, donde cierto porcentaje de éste será la formulación de surfactantes.

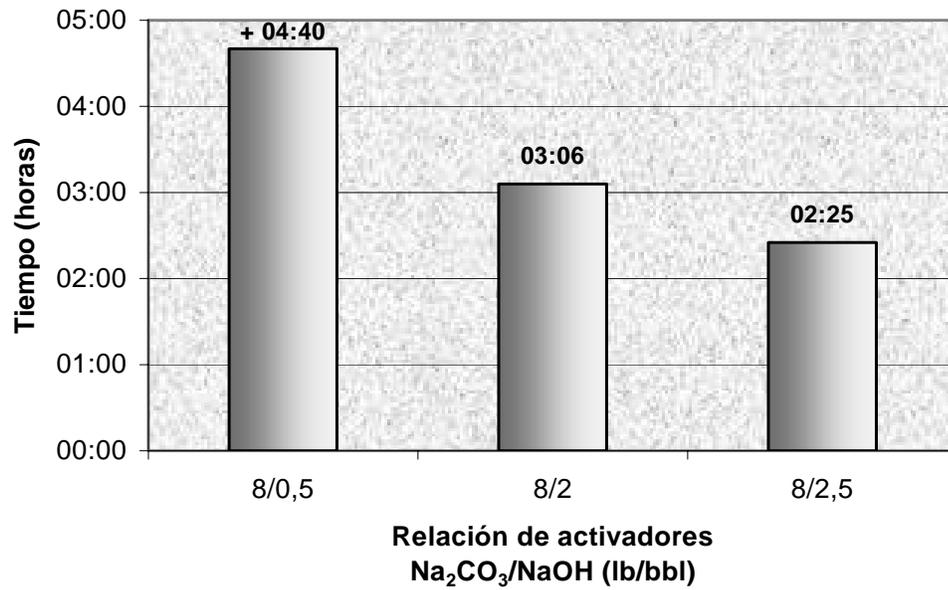
La densidad de la lechada fue ajustada a 12,5 lpg, manteniendo constante la concentración de NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en 4/8 lb/bbl, respectivamente.

## **2.2 Tiempo de espesamiento:**

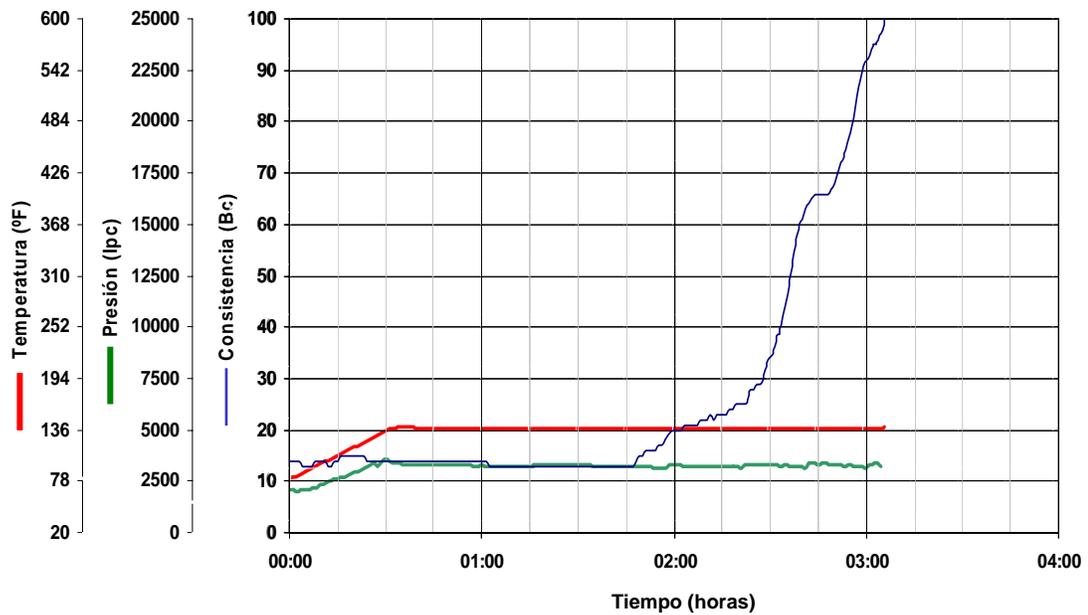
Una vez obtenido el mejor diseño de las lechadas formuladas a partir de los fluidos A, B y C, se procedió a realizar las pruebas de tiempo de espesamiento, que consiste en determinar el tiempo en que la lechada se considera bombeable en el pozo, y viene expresada en unidades Bearden (Bc) de consistencia.

Estudios presentados (Cowan et al., 1992; Mueller & Dickerson, 1994) exponen que la concentración del activador NaOH tiene influencia en el tiempo de espesamiento, a mayor concentración del activador menor será su tiempo. Igualmente, los dispersantes tienen influencia en esta propiedad, tendiendo a aumentarlo.

Según las condiciones de evaluación expuestas en la Tabla 11, las lechadas deben estar ajustadas con un tiempo de espesamiento entre 3 y 4 horas. Para ello, se varió y se pudo comprobar que la concentración del activador NaOH influye en el desarrollo de consistencia de las lechadas, como puede ser notado en las figuras 46, 48 y 50.



**Figura 46:** Tiempo de espesamiento vs relación de activadores para lechada de 13,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema A



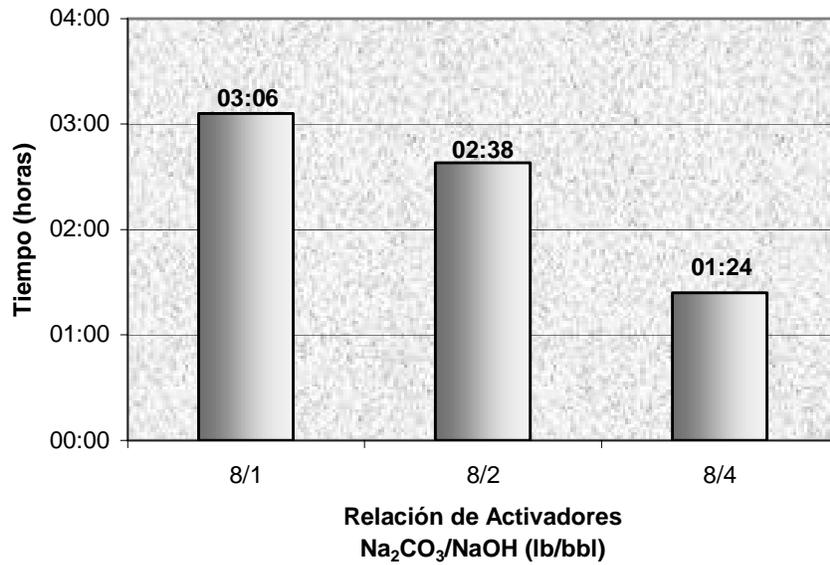
**Figura 47:** Curva de consistencia obtenida para la lechada de 13,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema A

La figura anterior presenta la gráfica obtenida del consistómetro presurizado utilizado para determinar el tiempo de espesamiento, en este caso de la lechada formulada a partir del sistema A que cumplió con el tiempo requerido entre 3 y 4 horas según las condiciones expuestas en la Tabla 11. Se puede notar que las 100 unidades Bc de consistencia fueron alcanzadas a las 3 horas con 6 minutos, y este es el denominado tiempo de espesamiento.

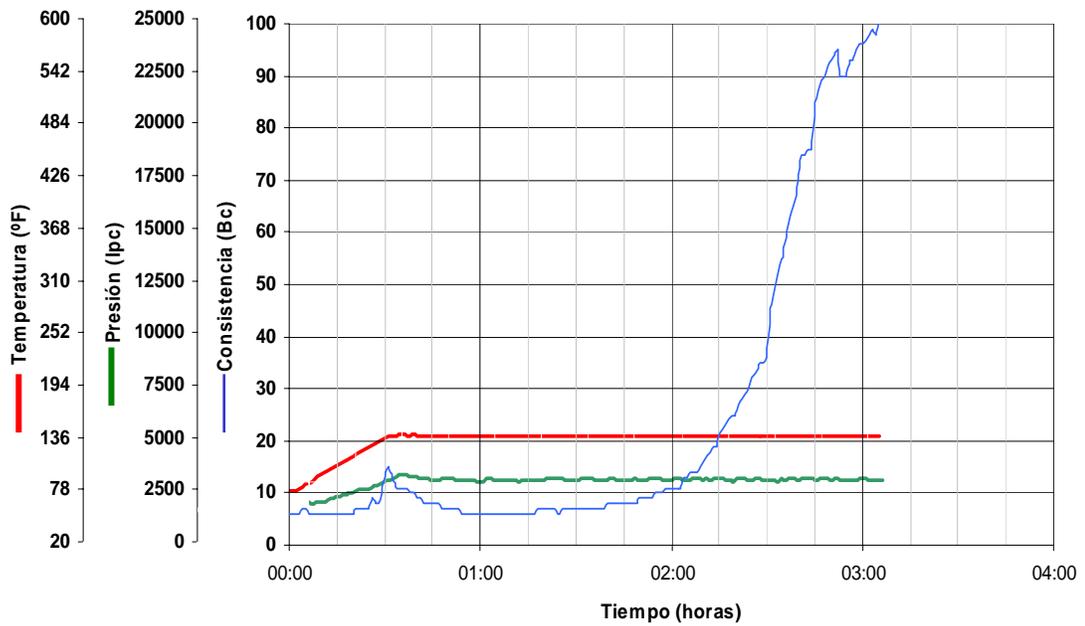
Este tipo de curvas dan una idea de la bombeabilidad de las lechadas en el pozo, y es por esto que es importante hacer destacar que la lechada formulada a partir del sistema A se mantiene con una baja consistencia ( $<30$  Bc) durante el mayor tiempo de su espesamiento, lo que pudiera inferirse que tendrá una colocación efectiva en el pozo, ya que no desarrolla alta consistencia durante la aplicación de presión y temperatura. Por otra parte es importante hacer destacar el rápido desarrollo de consistencia entre las 30 y 70 unidades Bc, sin embargo no se puede decir nada al respecto de su capacidad antimigratoria, ya que habría que hacer el estudio del desarrollo de gel estático a condiciones estáticas para verificar esta propiedad.

Con respecto al mejor diseño de la lechada formulada a partir del fluido B, los tiempos de espesamiento obtenidos con la variación del activador NaOH se presentan en la figura 48. De ésta, se puede comprobar que la concentración del activador NaOH influencia el tiempo de espesamiento de la lechada. A una concentración de 2 lb/bbl de NaOH, se ajustó el tiempo según las condiciones expuestas en la Tabla 11, entre 3 y 4 horas, y la curva de consistencia obtenida para esa concentración se presenta en la figura 49.

A partir de la curva de consistencia obtenida para la lechada formulada a partir del sistema B (ver Figura 50), también se puede inferir que tendrá una colocación efectiva en el pozo, ya que presenta una consistencia baja durante el mayor tiempo de su espesamiento, un comportamiento muy parecido a la lechada diseñada a partir del fluido A.

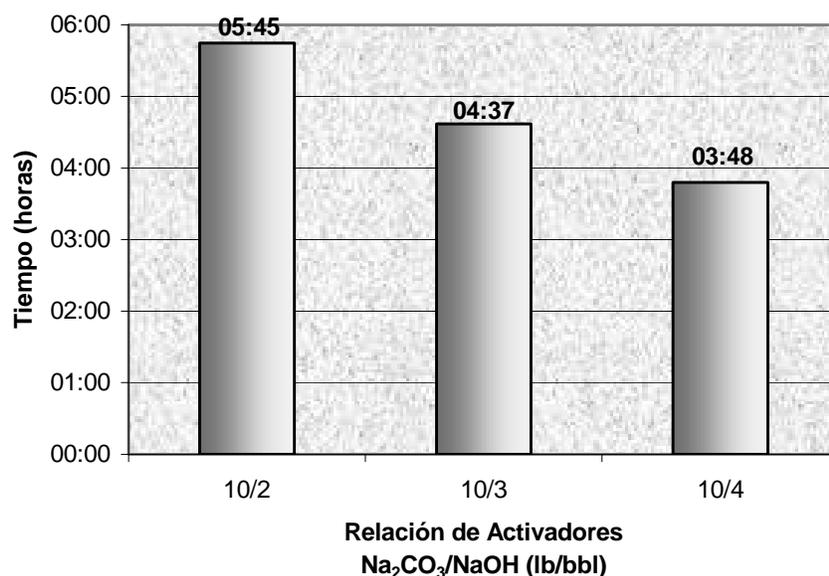


**Figura 48:** Tiempo de espesamiento vs relación de activadores para lechada de 11,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema B



**Figura 49:** Curva de consistencia obtenida para la lechada de 11,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema B

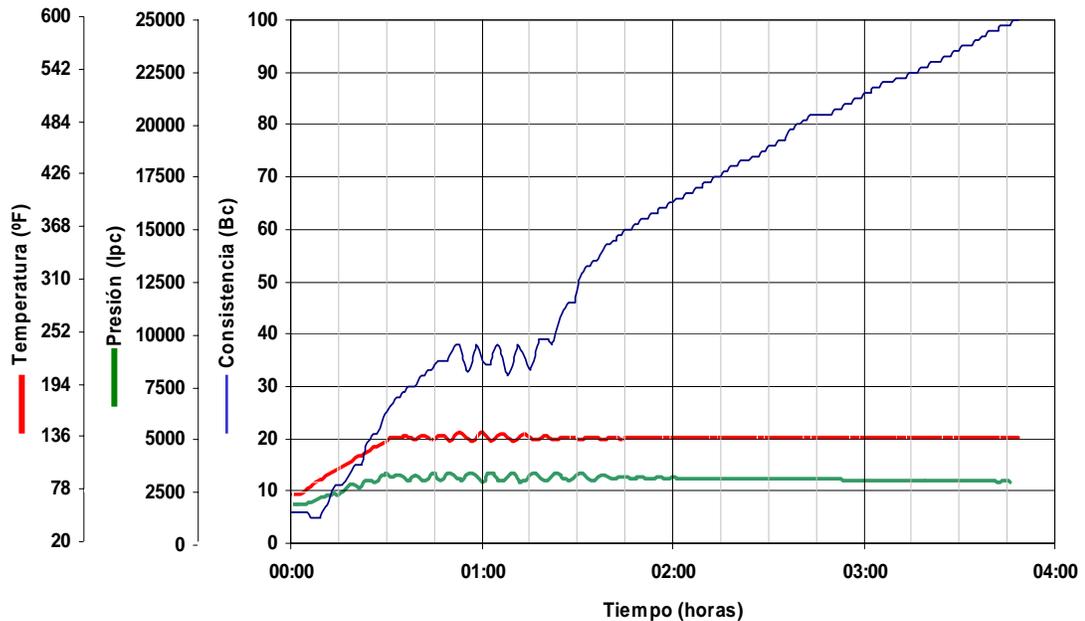
A continuación se presentan las pruebas realizadas de la propiedad de tiempo de espesamiento para la lechada formulada a partir del sistema C, con diferentes concentraciones del activador NaOH.



**Figura 50:** Tiempo de espesamiento vs relación de activadores para lechada de 12,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema C

De la figura 50 también se puede comprobar que la concentración del activador NaOH influye el tiempo de espesamiento de la lechada. A una concentración de 4 lb/bbl de NaOH, se ajustó el tiempo según las condiciones expuestas en la Tabla 11, entre 3 y 4 horas.

De la curva de consistencia presentada en la figura 51, se puede notar que la lechada formulada a partir del sistema C empieza a desarrollar consistencia cuando es sometido a presión y temperatura, un comportamiento muy distinto a los dos sistemas de lechadas anteriores. Esto no se considera bueno en un proceso de bombeo en el pozo, ya que si llegaran a existir paradas operaciones, pudiera haber problemas con la consistencia de la lechada y la retoma de la operación.



**Figura 51:** Curva de consistencia obtenida para la lechada de 12,5 lpg de densidad, formulada a partir del sistema C

Una vez ajustado el tiempo de espesamiento de las lechadas diseñadas a partir de cada uno de los sistemas de fluidos, se procedió a determinar la resistencia a la compresión convencional mediante el ensayo destructivo, siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API RP 10B. Estos resultados son presentados en una sección aparte junto con los demás ensayos mecánicos, esto con el fin de un mejor entendimiento.

Después de haber realizado las pruebas de resistencia a la compresión convencional, se procedió a determinar las demás propiedades físicas y mecánicas, con el fin de estudiar la factibilidad técnica de usar estos fluidos para la elaboración de lechadas de lodo cementante. Tomando en cuenta las pruebas de mezclabilidad y la concentración óptima del activador NaOH para cumplir con el tiempo de espesamiento recomendado, las formulaciones finales usadas para el estudio de las demás propiedades se presentan a continuación:

**Tabla 26:** Formulaciones finales utilizadas para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas de fluidos

<b>Lechada</b>	<b>Formulación</b>
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	Lodo de 8,8 lpg diluido a 8,47lpg (182 lb/bbl agua) + 2 lb/bbl NaOH + 8 lb/bbl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 2 lb/bbl lignito + 250 lb/bbl escoria
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	Lodo de 8,8 lpg diluido a 8,47lpg (167 lb/bbl agua) + 2 lb/bbl NaOH + 8 lb/bbl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 2 lb/bbl lignito + 314 lb/bbl escoria
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	Lodo de 7,3 lpg llevado a 7,5lpg (52 lb/bbl agua) + 1 lb/bbl NaOH + 8 lb/bbl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 232 lb/bbl escoria
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	Lodo de 7,3 lpg llevado a 7,5lpg (48 lb/bbl agua) + 1 lb/bbl NaOH + 8 lb/bbl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 293 lb/bbl escoria
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	Lodo de 8,6 lpg diluido a 8,4lpg (128 lb/bbl agua) + 4 lb/bbl NaOH + 10 lb/bbl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 249 lb/bbl escoria + 64 lb/bbl surfactante
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	Lodo de 8,6 lpg diluido a 8,4lpg (117 lb/bbl agua) + 4 lb/bbl NaOH + 10 lb/bbl Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 313 lb/bbl escoria + 60 lb/bbl surfactante

### 2.3 Densidad y Agua libre:

Las propiedades de densidad y agua libre para las formulaciones presentes en la Tabla 26 fueron determinadas siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API RP 10B. Los resultados obtenidos de estas pruebas se presentan a continuación:

**Tabla 27:** Resultados de las pruebas de densidad y fluido libre para las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas para distintas densidades

<b>Formulación</b>	<b>Densidad medida</b>	<b>Fluido libre</b>
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	12,4 lpg	0 %
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	13,5 lpg	0 %
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	11,3 lpg	0 %
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	12,3 lpg	0 %
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	12,5 lpg	0 %
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	13,4 lpg	0 %

De la Tabla 27 se puede notar que la densidad medida fue igual a la ajustada por medio de la hoja de cálculo, y en algunas la diferencia es de 0,2 lpg, estos errores pueden atribuirse a la precisión del equipo o a la medición de los aditivos en la preparación de la lechada. Es muy importante que una lechada de cemento cumpla con la densidad requerida, esto para controlar los fluidos presentes en la formación.

Por otra parte es indispensable que una lechada de cemento cuando sea colocada en el espacio anular, el agua presente no migre y se acumule en el tope de la columna. Esta propiedad denominada agua libre, puede resultar en un incompleto aislamiento zonal, sobre todo en pozos horizontales o altamente desviados, ya que puede crear canales donde la cementación se hace deficiente o nula y traer problemas de migración de fluidos de formación por detrás del anular, obligando a realizar cementaciones secundarias que aumentan en gran medida el costo del pozo. El fluido libre medido para las lechadas fue de

0%, indicando que posee buena homogeneidad y dispersión de la escoria en el sistema, creado por una suspensión estable de los sólidos presentes.

#### **2.4 Reología:**

La caracterización de la reología en una lechada de cemento es importante para evaluar entre otras cosas su bombeabilidad en el pozo y el cálculo de las caídas de presión. Sin embargo, su estudio es bastante complejo, ya que depende de la variación de agua-material cementante, forma y tamaño de los granos, aditivos y el procedimiento de preparación (Nelson, 1990).

En las Tablas 29, 31, 32, 34 y 35, se presentan las lecturas reológicas obtenidas de las lechadas formuladas a partir de los sistemas de fluidos estudiados, para las temperaturas de 80°F y 138°F (BHCT). Estas lecturas mostradas son el promedio de los valores tomados de acuerdo a la variación de la tasa de corte, en forma ascendente y descendente, según lo dicta las especificaciones API RP 10B. Una disminución de los valores de esfuerzo de corte comparado con los valores medidos con el incremento en las tasas de corte puede indicar de manera cualitativa que la lechada tiene carácter tixotrópico (Nelson, 1990). Para este caso, los tres sistemas de lechadas presentan esta propiedad, importante esto para el control en pozos con problemas de migración de gas. Las lecturas en detalle pueden ser observadas en el Apéndice C.

A partir de las lecturas reológicas promedio mostradas, pueden ser obtenidos los diferentes parámetros que indicarían el mejor ajuste al modelo Plástico de Bingham o Ley de Potencia, según sea el caso. Sin embargo, no se puede establecer un modelo exacto, ya que la toma de valores para hacer estas aproximaciones son muy pocas, y por consiguiente los índices de correlación son muy cercanos. En las Tablas 30, 33 y 36 pueden ser observados los parámetros y modelos reológicos a la cual se ajustaron las lechadas estudiadas.

**Tabla 28:** Lecturas reológicas obtenidas a 80°F de las formulaciones de lodo cementante A para las dos densidades formuladas

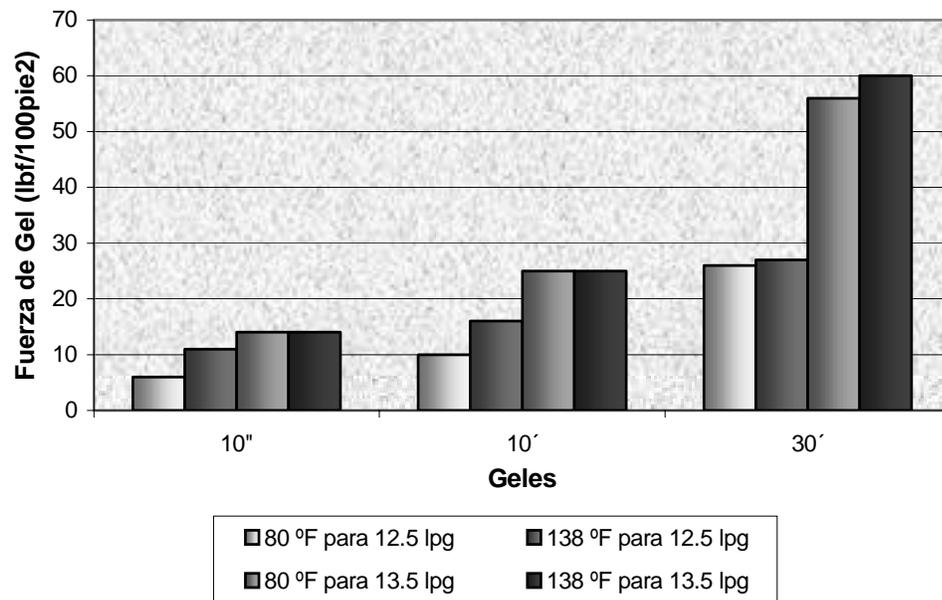
Tasa de corte (rpm)		Lecturas promedio del viscosímetro	
		Densidad de lechada	
		12,5 lpg	13,5 lpg
1		4,0	8,5
2		4,5	11,0
3		5,0	12,0
6		6,0	13,5
10		6,5	14,5
20		7,5	17,0
30		8,5	19,5
60		10,5	25,0
100		14,0	31,5
200		20,5	46,0
300		28,0	60,0
Geles	10 <sup>''</sup>	6	14
	10 <sup>'</sup>	10	25
	30 <sup>'</sup>	26	56

**Tabla 29:** Lecturas reológicas obtenidas a 138°F de las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades formuladas

Tasa de corte (rpm)		Lecturas promedio del viscosímetro	
		Densidad de lechada	
		12,5 lpg	13,5 lpg
1		9,5	13,0
2		10,5	14,0
3		11,5	15,5
6		15,0	19,0
10		18,0	22,5
20		20,5	29,5
30		22,5	32,5
60		26,5	41,0
100		30,5	50,0
200		37,5	67,0
300		46,0	79,0
Geles	10 <sup>''</sup>	11	14
	10 <sup>'</sup>	16	25
	30 <sup>'</sup>	27	60

**Tabla 30:** Parámetros de diferentes modelos reológicos a partir de las lecturas obtenidas en un viscosímetro a 80 °F y 138°F con las formulaciones de lodo cementante A para las dos densidades

Temp.	Modelo reológico	Parámetro	Densidad de lechada	
			12,5 lpg	13,5 lpg
80 °F	Plástico de Bingham	$\mu_p$ (cp)	23,01	49,25
		$\tau_0$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )	5,68	13,36
		R <sup>2</sup>	<b>0,9894</b>	<b>0,9832</b>
	Ley de Potencia	n (adim.)	0,320	0,315
		k (lbf.s <sup>n</sup> /pie <sup>2</sup> )	0,0304	0,0704
		R <sup>2</sup>	0,9434	0,9520
138 °F	Plástico de Bingham	$\mu_p$ (cp)	33,70	65,39
		$\tau_0$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )	16,02	21,59
		R <sup>2</sup>	0,8919	0,9259
	Ley de Potencia	n (adim.)	0,273	0,328
		k (lbf.s <sup>n</sup> /pie <sup>2</sup> )	0,0830	0,1002
		R <sup>2</sup>	<b>0,9925</b>	<b>0,9887</b>



**Figura 52:** Comparación de las fuerzas de gel desarrolladas por las formulaciones de lodo cementante A para distintas densidades y temperatura

La fuerza de gel es definido como el mínimo esfuerzo de corte que tiene que ser aplicado a un fluido para que empiece a moverse. Esta fuerza de gel en la lechada va a depender de la temperatura y la cantidad de material cementante que posea. Los valores obtenidos en la Figura 52 son razonables, ya que son del tipo gel progresivo, que aumentan con la temperatura y la cantidad de escoria que posee la lechada. La temperatura es un factor que aumenta la velocidad de hidratación de los granos de escoria, generando los cristales de gel CSH mucho más rápido y por consiguiente una fuerza de gel mucho mayor en menor tiempo. Igualmente, en una lechada de mayor densidad existe una cantidad superior de granos de escoria que puede aumentar la reacción de hidratación y gelificación.

**Tabla 31:** Lecturas reológicas obtenidas a 80°F de las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades formuladas

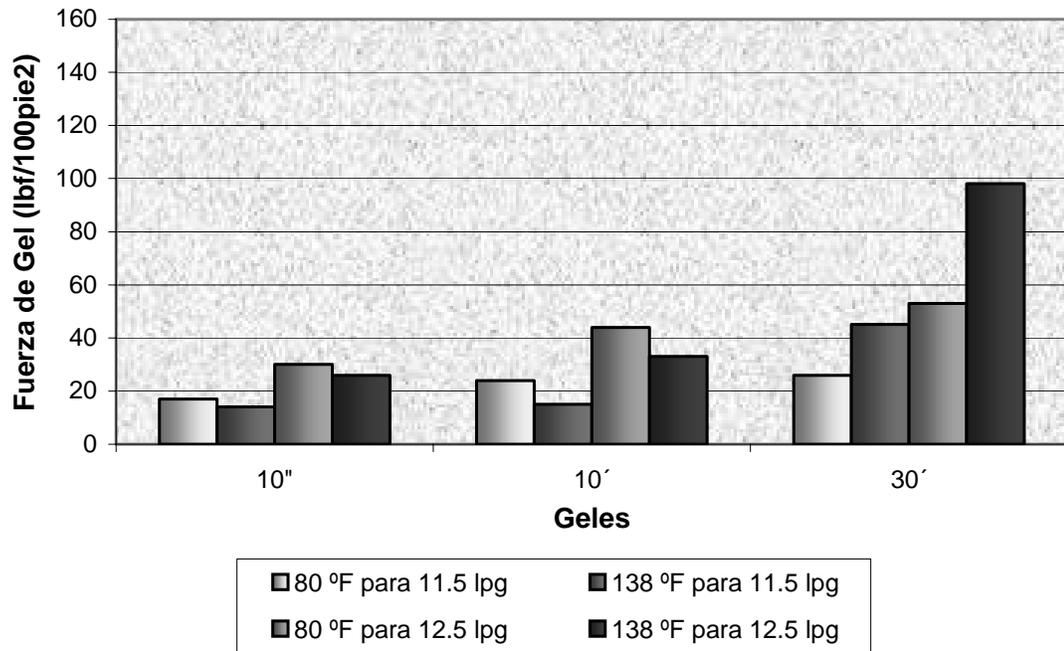
Tasa de corte (rpm)		Lecturas promedio del viscosímetro	
		Densidad de lechada	
		11,5 lpg	12,5 lpg
1		13,5	24,0
2		15,5	28,5
3		17,0	31,5
6		20,0	38,5
10		23,0	44,5
20		28,5	56,5
30		33,0	65,5
60		43,5	87,5
100		56,0	112,5
200		82,5	165,5
300		107,0	212,0
Geles	10 <sup>''</sup>	17	30
	10 <sup>'</sup>	24	44
	30 <sup>'</sup>	26	53

**Tabla 32:** Lecturas reológicas obtenidas a 138°F de las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades formuladas

Tasa de corte (rpm)		Lecturas promedio del viscosímetro	
		Densidad de lechada	
		11,5 lpg	12,5 lpg
1		11,0	19,0
2		13,0	23,0
3		14,0	26,0
6		16,5	31,5
10		19,5	38,0
20		24,0	48,5
30		28,0	57,0
60		37,5	77,5
100		47,5	100,0
200		70,5	147,5
300		91,0	185,0
Geles	10 <sup>''</sup>	14	26
	10 <sup>'</sup>	15	33
	30 <sup>'</sup>	45	98

**Tabla 33:** Parámetros de diferentes modelos reológicos a partir de las lecturas obtenidas en un viscosímetro a 80 °F y 138°F con las formulaciones de lodo cementante B para las dos densidades

Temp.	Modelo reológico	Parámetro	Densidad de lechada	
			11,5 lpg	12,5 lpg
80 °F	Plástico de Bingham	$\mu_p$ (cp)	91,79	184,67
		$\tau_0$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )	20,80	40,13
		R <sup>2</sup>	<b>0,9795</b>	0,9738
	Ley de Potencia	n (adim.)	0,356	0,376
		k (lbf.s <sup>n</sup> /pie <sup>2</sup> )	0,0992	0,1793
		R <sup>2</sup>	0,9657	<b>0,9770</b>
138 °F	Plástico de Bingham	$\mu_p$ (cp)	78,56	164,33
		$\tau_0$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )	17,45	33,96
		R <sup>2</sup>	<b>0,9777</b>	0,9680
	Ley de Potencia	n (adim.)	0,364	0,397
		k (lbf.s <sup>n</sup> /pie <sup>2</sup> )	0,0814	0,1422
		R <sup>2</sup>	0,9693	<b>0,9834</b>



**Figura 53:** Comparación de las fuerzas de gel desarrolladas por las formulaciones de lodo cementante B para distintas densidades y temperatura

En la Figura 53 se puede notar un comportamiento distinto a los geles desarrollados con la lechada formulada a partir del fluido A. Los geles a 10 segundos y 10 minutos a una mayor temperatura para una misma densidad, se observa que tienen una pequeña disminución. Esto puede ser atribuido al surfactante que tiene el fluido de perforación B en su formulación, ya que al aumentar la temperatura el surfactante puede estarse absorbiendo sobre los granos de sílice retardando su hidratación. Ya a los 30 minutos termina por ocurrir la reacción, generando los geles progresivos de la lechada. Este mismo comportamiento puede ser observado en los resultados obtenidos para la lechada formulada a partir del fluido C, presentados en la Figura 54, atribuyéndose el mismo proceso.

**Tabla 34:** Lecturas reológicas obtenidas a 80°F de las formulaciones de lodo cementante C para las dos densidades formuladas

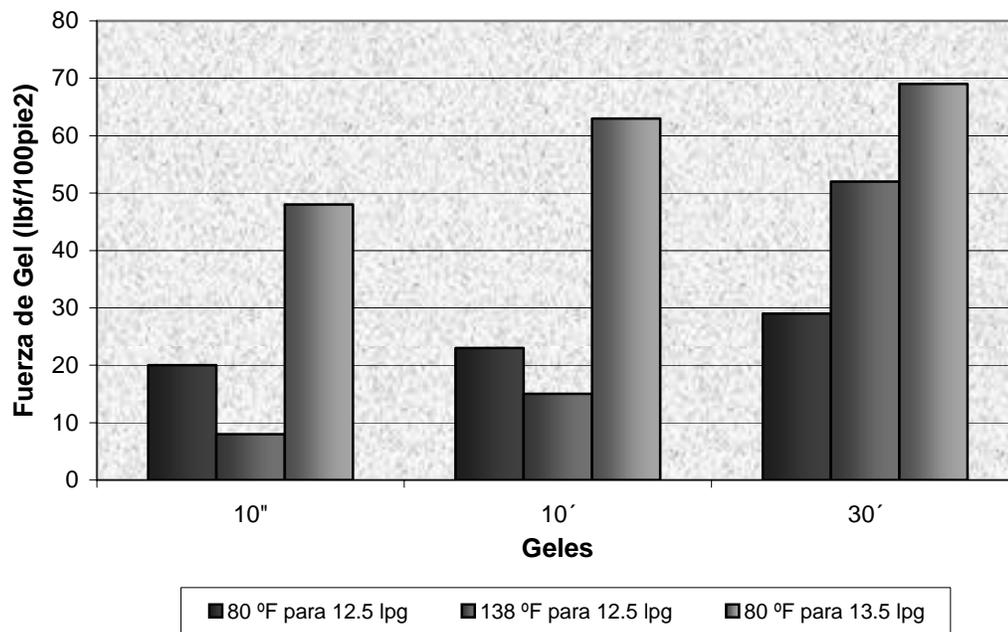
Tasa de corte (rpm)		Lecturas promedio del viscosímetro	
		Densidad de lechada	
		12,5 lpg	13,5 lpg
1		16,5	27,5
2		19,5	38,0
3		20,0	49,5
6		21,5	56,5
10		23,5	61,0
20		25,5	68,5
30		27,0	76,0
60		32,5	91,0
100		37,5	109,5
200		48,5	144,0
300		58,0	171,0
Geles	10 <sup>''</sup>	20	48
	10 <sup>'</sup>	23	63
	30 <sup>'</sup>	29	69

**Tabla 35:** Lecturas reológicas obtenidas a 138°F de las formulaciones de lodo cementante C para las dos densidades formuladas

Tasa de corte (rpm)		Lecturas promedio del viscosímetro	
		Densidad de lechada	
		12,5 lpg	
1		7,5	
2		8,5	
3		8,5	
6		11,0	
10		14,0	
20		21,5	
30		25,5	
60		34,0	
100		42,5	
200		52,0	
300		67,0	
Geles	10 <sup>''</sup>	8	
	10 <sup>'</sup>	15	
	30 <sup>'</sup>	52	

**Tabla 36:** Parámetros de diferentes modelos reológicos a partir de las lecturas obtenidas en un viscosímetro a 80 °F y 138°F con las formulaciones de lodo cementante C para las dos densidades

Temp.	Modelo reológico	Parámetro	Densidad de lechada	
			12,5 lpg	13,5 lpg
80 °F	Plástico de Bingham	$\mu_p$ (cp)	39,24	130,29
		$\tau_o$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )	22,65	55,54
		$R^2$	<b>0,9613</b>	0,9203
	Ley de Potencia	n (adim.)	0,202	0,285
		k (lbf.s <sup>n</sup> /pie <sup>2</sup> )	0,1476	0,2832
		$R^2$	0,9440	<b>0,9756</b>
138 °F	Plástico de Bingham	$\mu_p$ (cp)	58,39	--
		$\tau_o$ (lbf/100pie <sup>2</sup> )	14,43	--
		$R^2$	0,9103	--
	Ley de Potencia	n (adim.)	0,410	--
		k (lbf.s <sup>n</sup> /pie <sup>2</sup> )	0,0526	--
		$R^2$	<b>0,9833</b>	--



**Figura 54:** Comparación de las fuerzas de gel desarrolladas por las formulaciones de lodo cementante C para distintas densidades y temperatura

La reología a 138°F de la lechada formulada a partir del fluido C a 13,5 lpg de densidad no pudo ser medida, ya que al ser acondicionada durante los 20 minutos en el consistómetro atmosférico a dicha temperatura, como lo expresa las especificaciones API RP 10B, presentaba una viscosidad tan alta que no fluía dentro del envase, por lo que se dificultaba su medición en el viscosímetro. Esto quiere decir que la lechada cuando alcance esa temperatura en un pozo, no podría ser bombeada con facilidad, lo que habría que rediseñar la formulación para hacerla mucho más fluida.

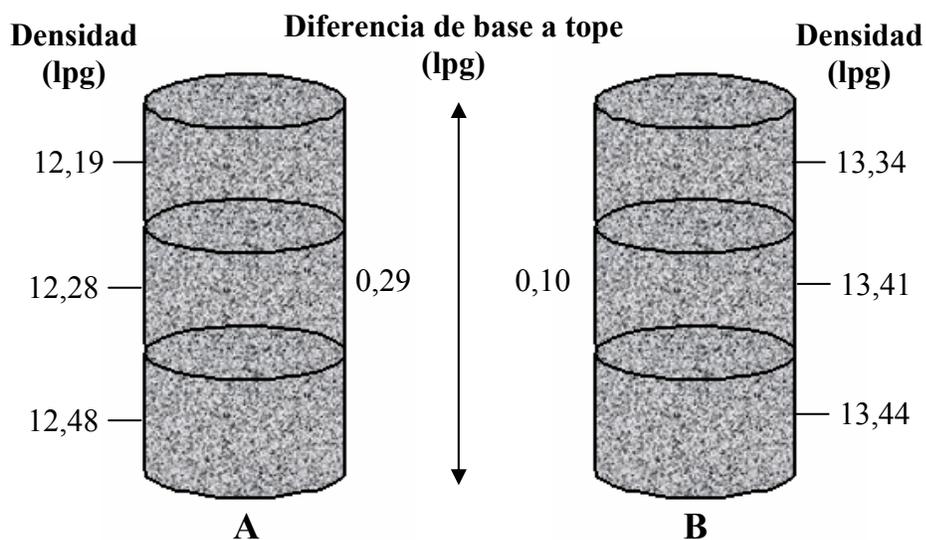
El estudio de factibilidad técnico-económica, es el principal objetivo de este trabajo, por lo que la propiedad de reología está basada principalmente en evaluar si la lechada posee las propiedades óptimas para ser bombeadas en un pozo. Una comparación con las propiedades reológicas obtenidas de antiguos sistemas de lodo cementante utilizados en campo, podría dar una idea de la factibilidad de bombeo de las lechadas formuladas en este estudio. Lodos cementantes utilizados en el año 2002 con densidades de 13,5 lpg formulados a partir de lodos dispersos y del tipo lignosulfonato, poseen valores de viscosidad plástica en un rango entre 40 y 120 cps, y de punto cedente entre 10 y 60 lbf/100pie<sup>2</sup>. Para los lodos cementantes formulados en este estudio, se obtuvieron valores entre 23 y 184 cps de viscosidad plástica y para punto cedente entre 6 y 55 lbf/100pie<sup>2</sup>, lo que quiere decir que se encuentran en un rango aceptable para ser utilizados en campo.

### **2.5 Sedimentación:**

Los resultados obtenidos en detalle de todas las pruebas de sedimentación realizadas se exponen en el Apéndice C, y a continuación se presentan las densidades promedio de base a tope obtenidas de los núcleos creados con las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas de fluidos estudiados.

**Tabla 37:** Resultados obtenidos de la prueba de sedimentación realizada a la lechada formulada a partir del sistema A para dos densidades distintas

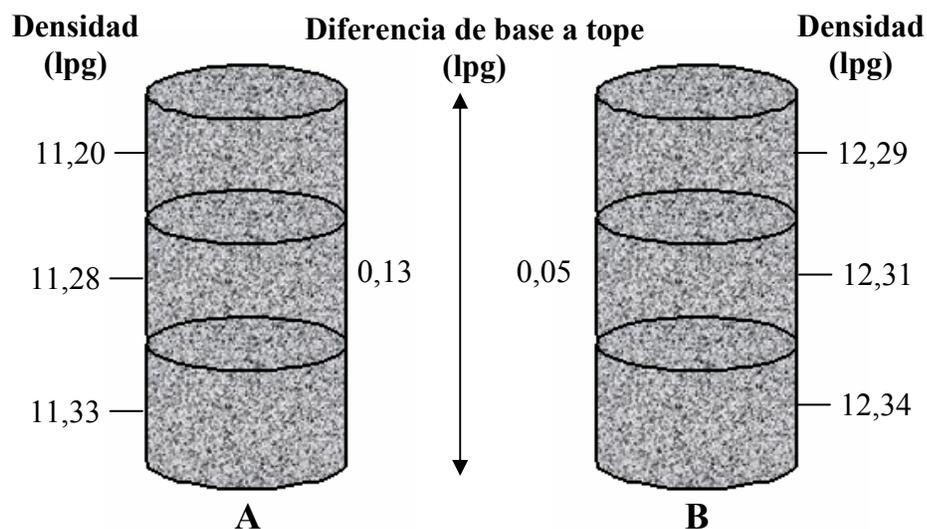
	<b>Densidad promedio medida (lpg)</b>	
<b>Altura del núcleo</b>	Formulación lodo cementante A @ 12,5 lpg	Formulación lodo cementante A @ 13,5 lpg
Tope	12,19	13,34
Medio	12,28	13,41
Base	12,48	13,44



**Figura 55:** Figura comparativa de los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación para (A) Lodo cementante A @ 12,5 lpg y (B) Lodo cementante A @ 13,5 lpg

**Tabla 38:** Resultados obtenidos de la prueba de sedimentación realizada a la lechada formulada a partir del sistema B para dos densidades distintas

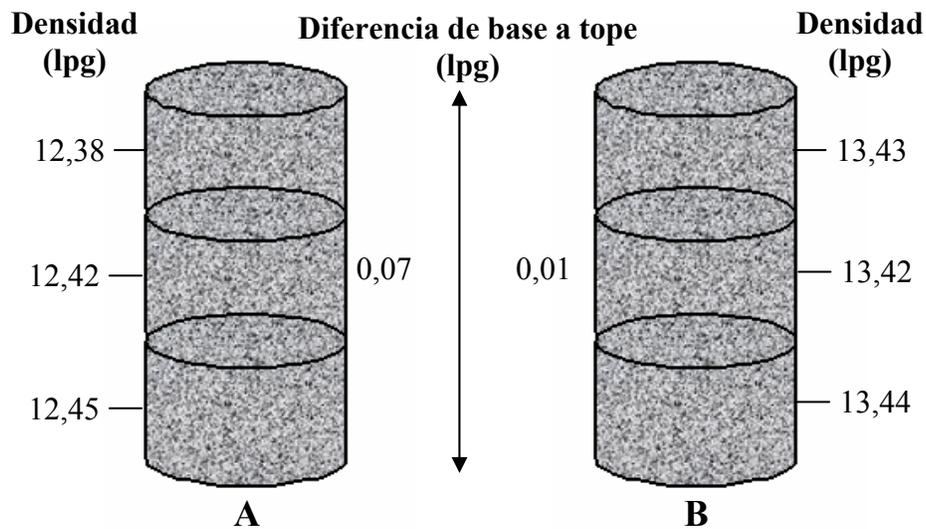
Altura del núcleo	Densidad promedio medida (lpg)	
	Formulación lodo cementante B @ 11,5 lpg	Formulación lodo cementante B @ 12,5 lpg
Tope	11,20	12,29
Medio	11,28	12,31
Base	11,33	12,34



**Figura 56:** Figura comparativa de los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación para (A) Lodo cementante B @ 11,5 lpg y (B) Lodo cementante B @ 12,5 lpg

**Tabla 39:** Resultados obtenidos de la prueba de sedimentación realizada a la lechada formulada a partir del sistema C para dos densidades distintas

Altura del núcleo	Densidad promedio medida (lpg)	
	Formulación lodo cementante C @ 12,5 lpg	Formulación lodo cementante C @ 13,5 lpg
Tope	12,38	13,43
Medio	12,42	13,42
Base	12,45	13,44



**Figura 57:** Figura comparativa de los resultados obtenidos de las pruebas de sedimentación para (A) Lodo cementante C @ 12,5 lpg y (B) Lodo cementante C @ 13,5 lpg

Cuando una lechada de cemento es colocada en el espacio anular, los sólidos suspendidos en ella pueden tener la tendencia a separarse de la lechada y asentarse en el fondo de la columna de cemento. Esta separación denominada sedimentación es común en lechadas que contienen agentes de peso y debe ser controlada, ya que puede producir cambios en la densidad de la lechada, conduciendo a posibles invasiones de fluidos de formación en el anular hasta la pérdida de control del pozo. El punto cedente es la principal propiedad reológica encargada de mantener la suspensión de los sólidos.

Según los resultados obtenidos de las lechadas evaluadas, se puede notar que tienen buena homogeneidad y suspensión de sólidos, ya que las densidades de base a tope varían como máximo en 0,29 lpg para la lechada diseñada a 12,5 lpg con el fluido A. Los demás valores obtenidos estuvieron por debajo de 0,13 lpg.

El diseño de la lechada formulada a partir del fluido A, como se pudo observar en la mezclabilidad de los sistemas, fue ajustada a una densidad de 13,5 lpg. Por lo tanto, al ser añadida menos cantidad de escoria para formular una lechada de menor densidad, para este caso de 12,5 lpg, sin cambiar el porcentaje de dilución, podría obtenerse una lechada mucho más dispersa, con una mayor cantidad de agua a la requerida. Esto hace que la lechada de lodo cementante A con 12,5 lpg tuviera mayor sedimentación que las demás. Sin embargo, esta diferencia en densidad entre base y tope de 0,29 lpg se encuentra en un rango aceptable para asegurar que la lechada posee buena estabilidad, si se toma como referencia que para pozos verticales, la diferencia no debe ser mayor a 0,5 lpg, y para pozos horizontales no mayor a 0,2 lpg. (Bolívar et al., 2003)

## 2.6 Pérdida de filtrado:

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de filtrado API y contrarevoque realizadas a las lechadas diseñadas a partir de los tres sistemas de fluidos utilizados, siguiendo las formulaciones presentes en la Tabla 26.

**Tabla 40:** Pérdida de filtrado obtenida para las lechadas formuladas a partir de los tres sistemas de fluidos para distintas densidades

Formulación	Pérdida de filtrado ** (cc/30mín)	
	API	Contrarevoque
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	1120	10*
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	1272	12*
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	593	275
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	653	315
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	765	812
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	793	725

\* valores duplicados del filtrado obtenido a los 30 minutos.

\*\* pérdida de filtrado API calculado mediante ecuación 8.

La pérdida de filtrado es una de las propiedades más importantes a controlar en la cementación de pozos. Una lechada de cemento puede perder parte o toda la cantidad de agua a través de una formación permeable si no es controlada, y esto conlleva a la alteración de propiedades físicas como el tiempo de espesamiento, acortándolo prematuramente, o hasta crear lechadas en el fondo del pozo que no posean la suficiente fluidez para que pueda ser bombeada. Estos problemas conllevan a trabajos de cementaciones remediales y mayores costos en la elaboración del pozo (Nelson, 1990).

Todos los fluidos de perforación utilizados para la elaboración de las lechadas de lodo cementante, han sido diseñados para su uso en formaciones productoras, bien sea de alta presión para el fluido C o de baja presión para el fluido B. Por esto sería ideal utilizar estos lodos para diseñar lechadas que puedan ser utilizadas en zonas productoras, y para esto es

indispensable que posean una baja pérdida de filtrado. Es recomendado tener pérdidas menor de 400cc para zonas superficiales, menor a 200cc para zonas intermedias y menor a 50cc/30mín para zonas productoras de alta presión y/o gas (Nelson, 1990).

Según los resultados obtenidos en la Tabla 40, los valores de filtrado API calculado a los 30 minutos de acuerdo a la ecuación 8, son muy altos para ser utilizados en un pozo, ya que las lechadas tienen una alta deshidratación y por consiguiente no podrían ser bombeadas con facilidad. Pero, con el fin de simular las condiciones más reales existentes en un pozo a condiciones de laboratorio, fue realizada la prueba de pérdida de filtrado por el método modificado denominado “contrarevoque”. Este método simula mejor las condiciones de pozo, ya que siempre existirá en el hoyo cierta porción del revoque creado por el fluido de perforación, y esto ayudará en el control de filtrado, solo para este tipo de lechadas de lodo cementante, ya que son diseñadas a partir del mismo lodo de perforación y tienen mejor compatibilidad.

Los resultados obtenidos de pérdida de filtrado por el método modificado como eran de esperarse fueron menores, ya que el medio filtrante era un revoque que presenta una menor permeabilidad que el papel filtro utilizado por el método común API. Este el principal mecanismo de acción de los aditivos controladores de filtrado, que consisten en reducir la permeabilidad del revoque del cemento y aumentar la viscosidad de la fase continua de la lechada (Nelson, 1990). Sin embargo, para la lechada diseñada con el fluido C que tiene un revoque de buena calidad no disminuyó la pérdida de filtrado sino se mantuvo, y esto se debe a que la mezcla de surfactantes utilizada en la formulación de la lechada tiene propiedades de limpieza de hoyo en pozos perforados con fluidos base aceite, y especialmente para el fluido C, causando un levantamiento por completo del revoque y dejando como medio filtrante el papel común API.

Tomando en consideración las pérdidas de filtrado obtenidas, la lechada que podría ser usada en formaciones productoras sería la diseñada a partir del fluido A, que tuvo entre 10 y 12cc a los 30 minutos. El lodo cementante B podría ser usado en zonas superficiales, y el

cemento formulado a partir del fluido C no sería recomendable usarlo, sin embargo, con algún aditivo controlador de filtrado podría mejorar esta propiedad.

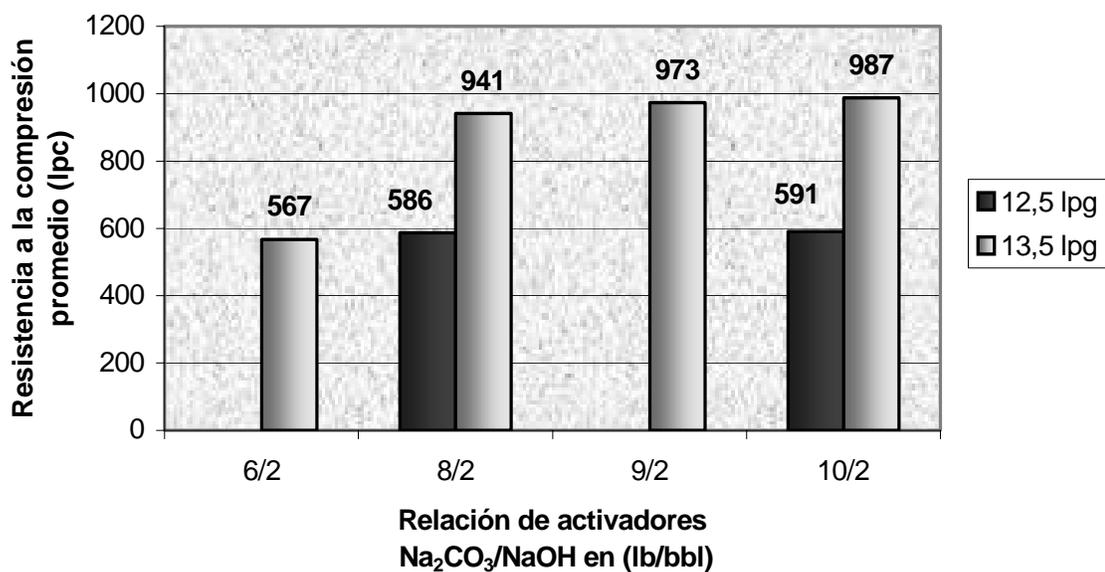
## **2.7 Ensayos mecánicos:**

En la sección de ensayos mecánicos, se encuentran las pruebas de resistencia a la compresión convencional por el método destructivo API, la resistencia a la compresión por el método triaxial, los módulos de elasticidad Young y relación de Poisson, la resistencia a la tensión por el método brasileño, la resistencia a la flexión y las pruebas de expansión. Todos los resultados obtenidos se encuentran a continuación:

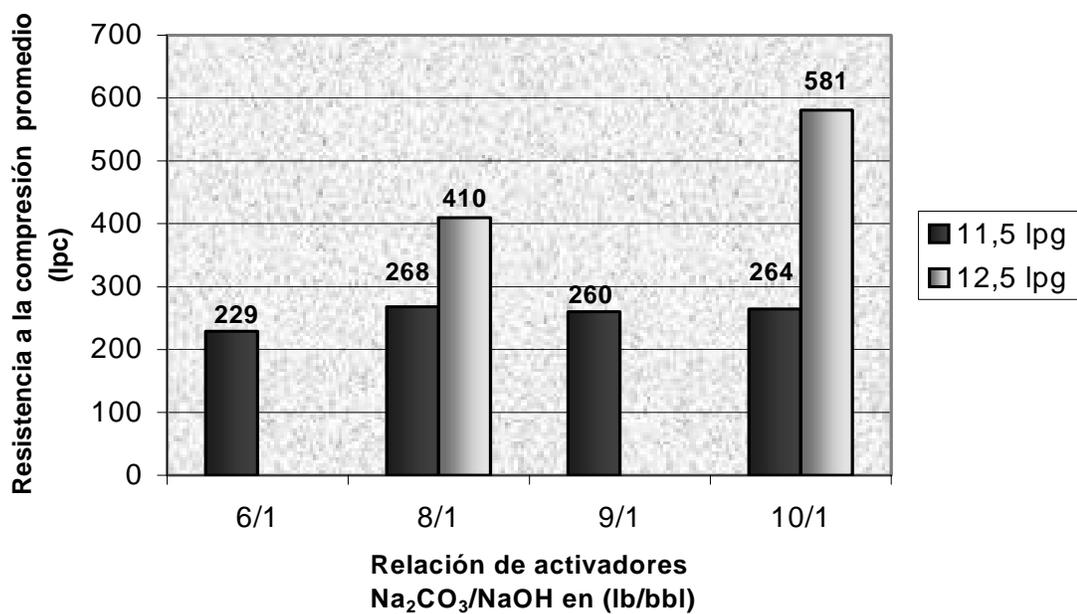
### **2.7.1 Resistencia a la compresión convencional:**

La resistencia a la compresión convencional fue determinado siguiendo los procedimientos descritos en las especificaciones API RP 10B, a través del curado de las diferentes lechadas en moldes cúbicos durante 24 horas. En las figuras 58, 59 y 60 se presenta la variación en los valores de resistencia a la compresión obtenidos para cada una de las lechadas estudiadas, donde se puede comprobar que la concentración del activador  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y la cantidad de material cementante (escoria) tienen influencia en el desarrollo de esta propiedad.

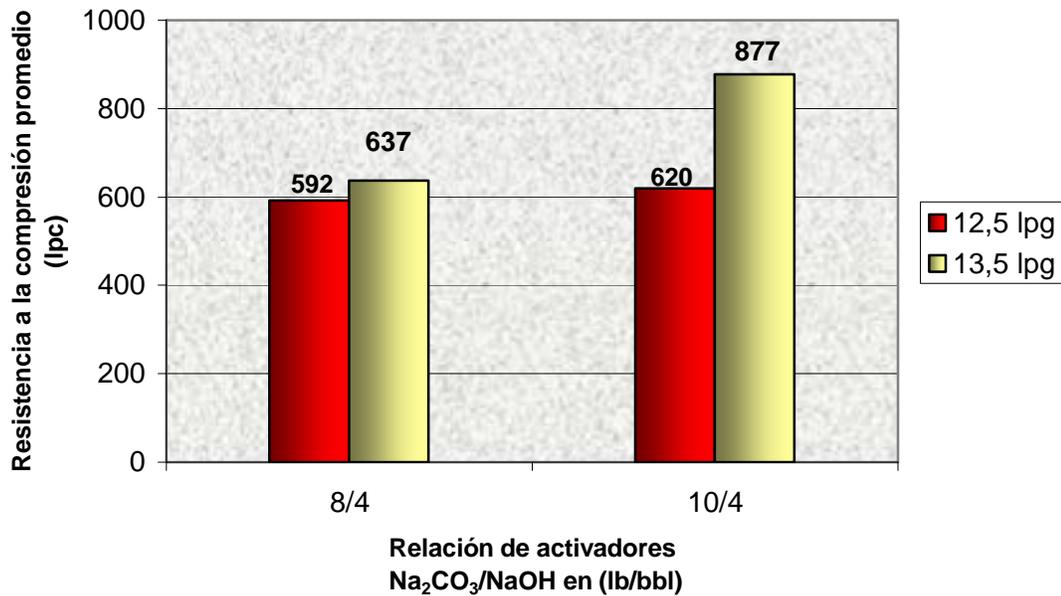
Sin embargo, se puede notar que los cambios en la resistencia a la compresión reflejados para las lechadas formuladas entre 8 y 10 lb/bbl de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  no fueron muy grandes. Esto puede atribuirse a que existe, según estudios, un nivel de activación óptima para producir las mejores propiedades. Una sobreactivación del sistema puede conducir a anormales tiempo de espesamiento, excesivas viscosidades en el mezclado, y desarrollos de compresión disminuidos debido a microfracturamientos (Mueller & Dickerson, 1994).



**Figura 58:** Variación de la resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema A



**Figura 59:** Variación de la resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema B



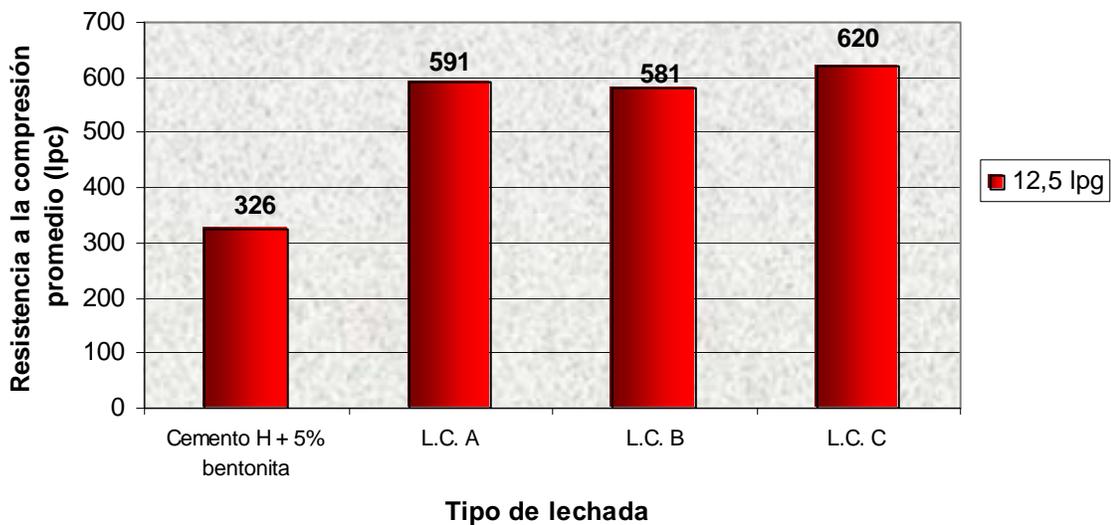
**Figura 60:** Variación de la resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema C

La formación masiva del gel CSH en el proceso de hidratación de las fases silicatos presentes en la composición química del cemento o de la escoria, es el principal elemento que contribuye al desarrollo de compresión del sistema. Si no existe la concentración suficiente de escoria (lechada de baja densidad), activadores ni la cantidad de agua para hidratarse, la reacción será incompleta y por ende el desarrollo de compresión será mucho menor. Esta es una de las posibles causas que puedan estar provocando una resistencia a la compresión baja para el lodo cementante B, ya que la formulación de la lechada para este sistema posee aproximadamente 55% de aceite y 45% de agua, por tanto, la cantidad de agua es mucho menor si se comparan con las otras lechadas de lodo cementante, que contienen un 100% de agua para el sistema formulado a partir del fluido A, y un 74% de agua para el formulado a partir del fluido C.

La lechada de 11,5 lpg de densidad formulada a partir del sistema B produjo una resistencia a la compresión de aproximadamente 268 lpc, muy baja para ser usada en una zona productora y en una aplicación de campo, afirmando esto debido a que se recomienda que

un cemento presente como mínimo 500 lpc de resistencia durante el tiempo de espera del fraguado para continuar con el proceso de perforación en un pozo (Nelson, 1990).

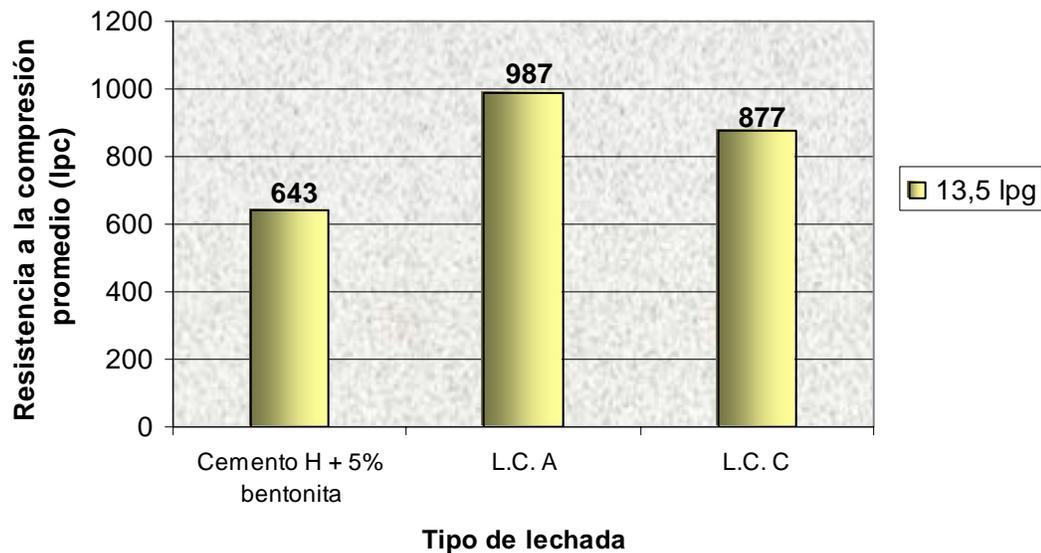
No obstante, si se diseña con una concentración de escoria mayor (densidad de lechada superior) y un mayor porcentaje de agua, los resultados podrían ser mejores. En la Figura 61, donde se comparan los valores de resistencia a la compresión convencional obtenidos para una densidad de lechada ajustada a 12,5 lpg, se puede notar que no existe mucha variación entre los tres sistemas de lodo cementante evaluados, y que la cantidad de aceite presente en la formulación de la lechada B no está influyendo en gran medida en el desarrollo de esta propiedad. Igualmente, se incluyen los resultados obtenidos para una lechada de cemento Portland clase H con 5% de bentonita.



**Figura 61:** Comparación de la resistencia a la compresión convencional entre una lechada de cemento Portland y los tres sistemas de lodo cementante ajustados a una densidad de 12,5 lpg y una concentración de 10 lpb de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Igualmente, observando la Figura 62 se puede notar que los valores de compresión obtenidos para los dos sistemas de lechadas formuladas a 13,5 lpg son similares, lo que

quiere decir que el aceite también presente como emulsión en la lechada formulada a partir del sistema C, no está influyendo en el desarrollo de compresión del sistema.



**Figura 62:** Comparación de la resistencia la compresión convencional entre una lechada de cemento Pórtland y lodos cementantes formulados a partir del fluido A y C para una densidad de 13,5 lpg y una concentración de 10 lpb de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Por otra parte, la resistencia a la compresión obtenida con la lechada de cemento Pórtland a esas densidades fue menor a las desarrolladas por los lodos cementantes, lo que podría decirse que sería factible técnicamente la sustitución de una lechada de cemento Pórtland convencional de estas características, tomando en cuenta la propiedad de desarrollo de compresión.

### 2.7.2 Resistencia a la compresión, Modulo de Young y relación de Poisson:

Las pruebas de resistencia a la compresión mediante el ensayo triaxial permiten determinar de forma más precisa el comportamiento mecánico del material, si se compara con un ensayo destructivo convencional. A partir de las curvas esfuerzo deformación fueron determinados los módulos de Young y relación de Poisson. Estos ensayos fueron realizados

sin confinamiento. Los resultados obtenidos para los sistemas de lodos cementantes estudiados se presentan a continuación:

**Tabla 41:** Valores de resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson obtenidos mediante el ensayo triaxial de compresión realizados a los diferentes sistemas de lechadas estudiadas

<b>Lodo cementante</b>	<b>Densidad de lechada (lpg)</b>	<b>Resistencia a compresión promedio triaxial (lpc)</b>	<b>Módulo de Young promedio (<math>\times 10^6</math> lpc)</b>	<b>Relación de Poisson promedio</b>
A	12,5	574	0,15	0,25
	13,5	1153	0,27	0,20
B	11,5	345	0,04	0,16
	12,5	615	0,05	0,16
C	12,5	793	0,17	0,17
	13,5	1227	0,33	0,21

En la Figura 64 se presenta una comparación de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las pruebas de resistencia a la compresión mediante el ensayo triaxial, donde para cada sistema y cada densidad fueron representadas dos curvas, esto con el fin de tener una mejor reproducibilidad de los datos. De esta gráfica, se puede notar que los sistemas de lodo cementante no presentan diferencias notables entre ellos, y que solo dependen de la concentración de escoria con la que son formulados.

La pendiente de la curva esfuerzo deformación en la región elástica (parte lineal) representa el módulo Young, y el punto de máximo esfuerzo en la curva representa la carga que puede ser soportado por el material antes de fallar, comúnmente denominado resistencia a la compresión. Se puede observar que a medida que aumenta la densidad del lodo cementante, la pendiente se hace cada vez mayor y el punto máximo en la ordenada de la curva crece.

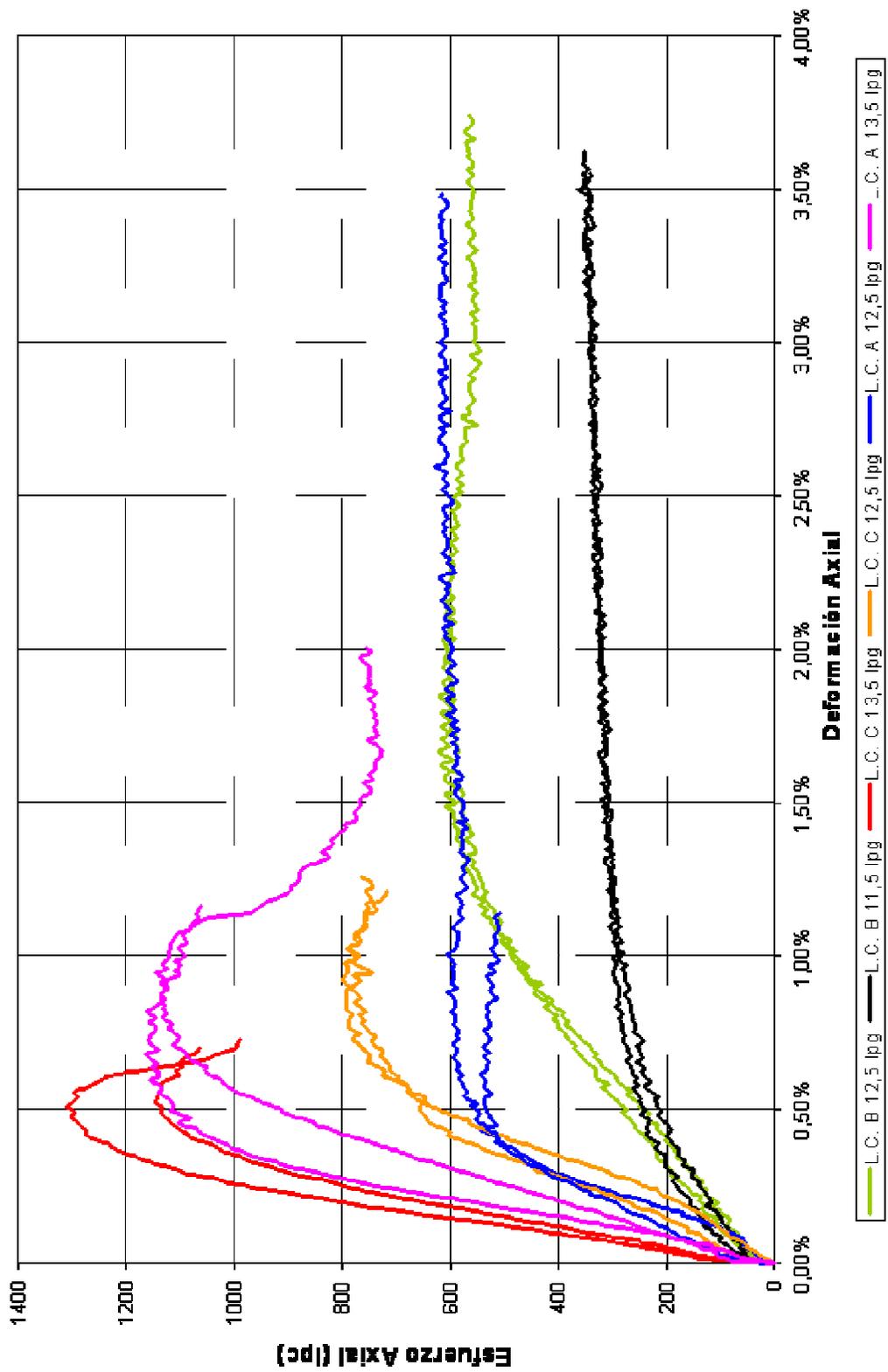


Figura 63: Comparación de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de los ensayos de compresión triaxial realizadas a los sistemas de lodo cementante estudiados

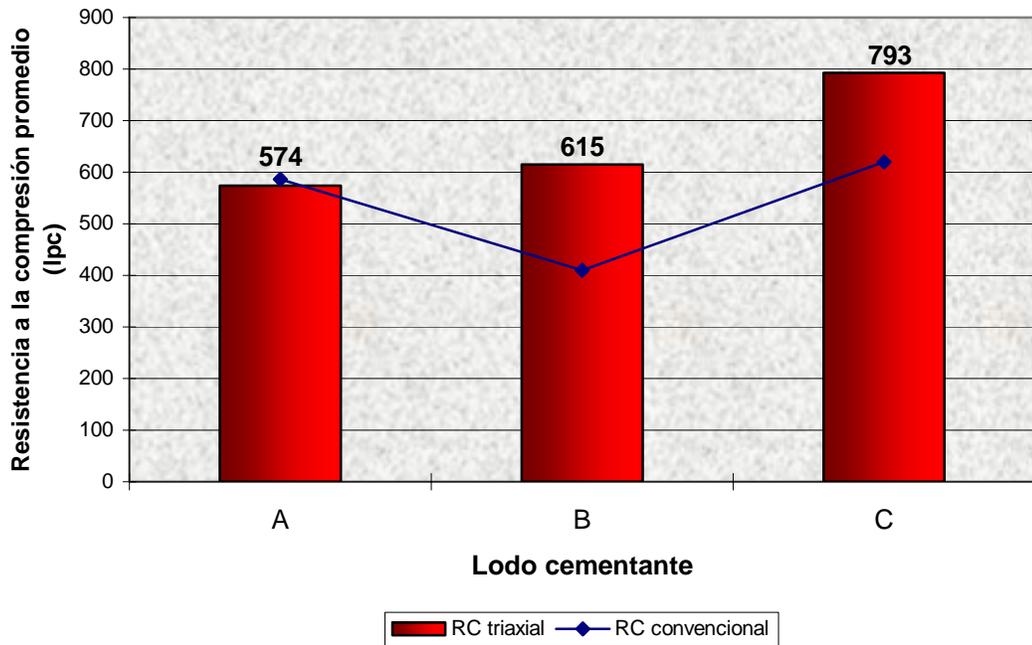
Esto se debe a que mientras mayor sea la cantidad de material cementante (escoria) en la formulación del sistema, mayor será la formación de silicatos de calcio hidratados (gel CSH) en el proceso de hidratación, que son los responsables del desarrollo de compresión y mayor rigidez en el cemento.

Los sistemas que fueron diseñados a una densidad de 13,5 lpg presentan un comportamiento diferente en la curva esfuerzo deformación si se comparan con los diseñados a 11,5 y 12,5 lpg. El primer tipo de comportamiento representa un material que provoca una falla súbita cuando es alcanzado el máximo esfuerzo que puede soportar, con una pérdida completa de cohesión, lo que se conoce como falla frágil. Este tipo de fallas solo incluye la ruptura de enlaces, sin ninguna deformación plástica apreciable y la energía total se concentra en un proceso que conlleva a fracturas de nivel macroscópico, las cuales se propagan rápidamente en el material (Sánchez & Vásquez, 1999). Un comportamiento de este tipo no sería recomendable desde el punto de vista mecánico en un cemento, ya que la formación de fracturas a gran nivel y conectadas, podrían crear canales por donde puedan migrar fluidos de formación en el espacio anular, esto no sería recomendable para cumplir con la principal función de la cementación que es el aislamiento zonal.

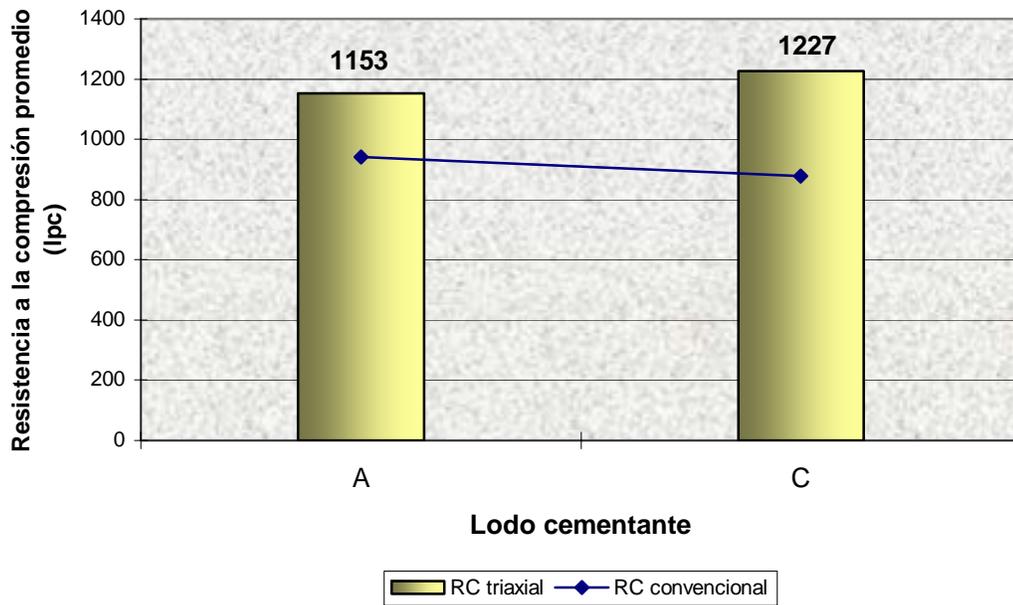
En cambio, los sistemas de lodo cementante diseñados a 11,5 y 12,5 lpg presentan un comportamiento distinto, tendiendo de la fragilidad a la plasticidad. La plasticidad de los materiales está asociada a un comportamiento dúctil, entendiéndose por ductilidad la propiedad que tiene un material de mantener deformaciones permanentes sin perder su habilidad para resistir cargas iguales o mayores. En la ruptura dúctil, la energía se disipa primariamente en forma plástica y la propagación de microgrietas progresa mucho menos rápido que para la falla frágil (Sánchez & Vásquez, 1999). Estos sistemas serían mucho más recomendables que los anteriores, ya que pudieran sufrir mayor cantidad de deformación aunque su capacidad de resistir esfuerzos sea menor, a la vez que la posible canalización de fluidos en el espacio pudiera disminuir, ya que las grietas serían de menor magnitud.

Lo ideal en un diseño de sistemas cementantes es que el material no pierda su capacidad de aislamiento zonal. En pozos altamente desviados u horizontales, donde el cemento está sometido a grandes esfuerzos es necesario tener un material que desarrolle la suficiente resistencia a la compresión y a la vez posea elasticidad como para resistir esfuerzos y deformaciones.

En las figuras 64 y 65 presentes a continuación se realizan comparaciones de los valores de resistencia a la compresión obtenidos mediante la aplicación de los dos métodos. Se puede notar que los obtenidos por el ensayo destructivo son menores que los medidos por el ensayo triaxial. Esto puede atribuirse al tiempo transcurrido entre las 24 horas de ser curadas las muestras y el momento de ser realizado el ensayo respectivo, mientras mayor sea el tiempo, mayor será la reacción de la escoria y por consiguiente el desarrollo de compresión. El ensayo API fue realizado al mismo instante de ser curadas las muestras a las 24 horas, por el contrario, con el ensayo triaxial no fue así. Las muestras fueron sacadas de la cámara de curado a las 24 horas, los núcleos fueron cortados, a cada uno de ellos se le fue medido la densidad y luego fueron mantenidos en alcohol etílico hasta el momento de realizar el ensayo triaxial. Este tiempo transcurrido pudo haber aumentado un poco la resistencia a la compresión del sistema, sin embargo, la diferencia no fue muy significativa si se toma en cuenta la precisión de ambos métodos, obteniéndose una diferencia máxima de 350 lpc para el sistema cementante formulado a partir del fluido C a 13,5 lpg.



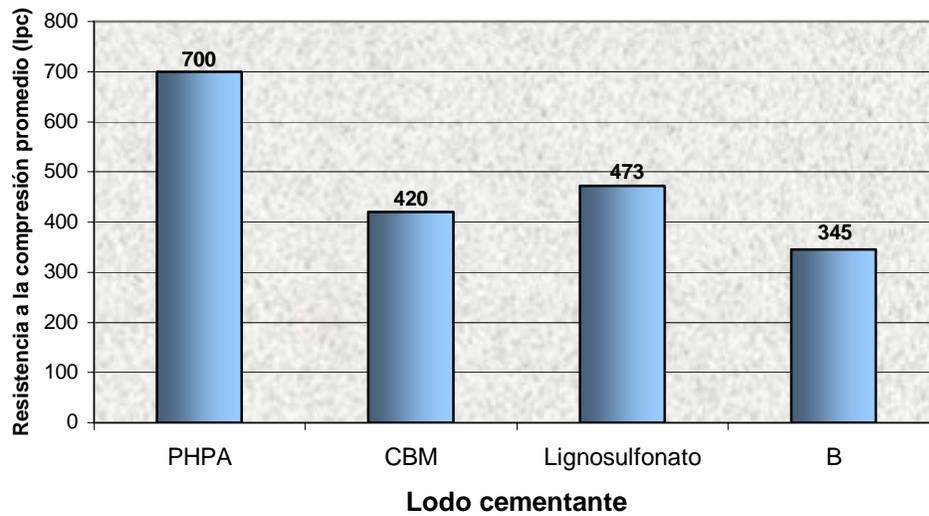
**Figura 64:** Comparación de los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los tres sistemas de lechadas diseñados a 12,5 lpg, en función del método de ensayo



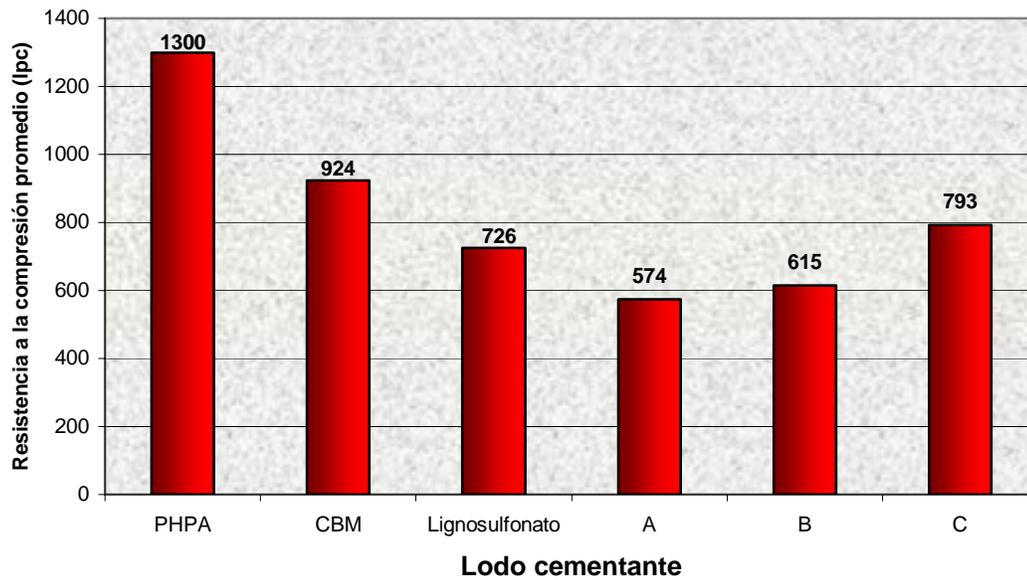
**Figura 65:** Comparación de los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los tres sistemas de lechadas diseñados a 13,5 lpg, en función del método de ensayo

Propiedades importantes de una columna de cemento fraguado son el desarrollo de compresión y baja permeabilidad, particularmente a lo largo de la zona de interés. Una regla general que debe cumplir un sistema cementante para producir un adecuado aislamiento zonal es de 1000 lpc de resistencia a la compresión y una permeabilidad al agua menor a 0,1 milidarcys (Nelson, 1990). Si se toman en cuenta los valores obtenidos en el desarrollo de resistencia a la compresión para los sistemas de lodo cementantes estudiados, podría decirse que los que cumplen parte de esta regla son las lechadas formuladas a 13,5 lpg diseñadas a partir de los fluidos A y C, que presentan 1153 y 1227 lpc respectivamente. Se dice que cumple parte de esta regla ya que la permeabilidad de estos sistemas no fue determinada, sin embargo, esta regla general puede cambiar dependiendo de las condiciones y tipo de pozo.

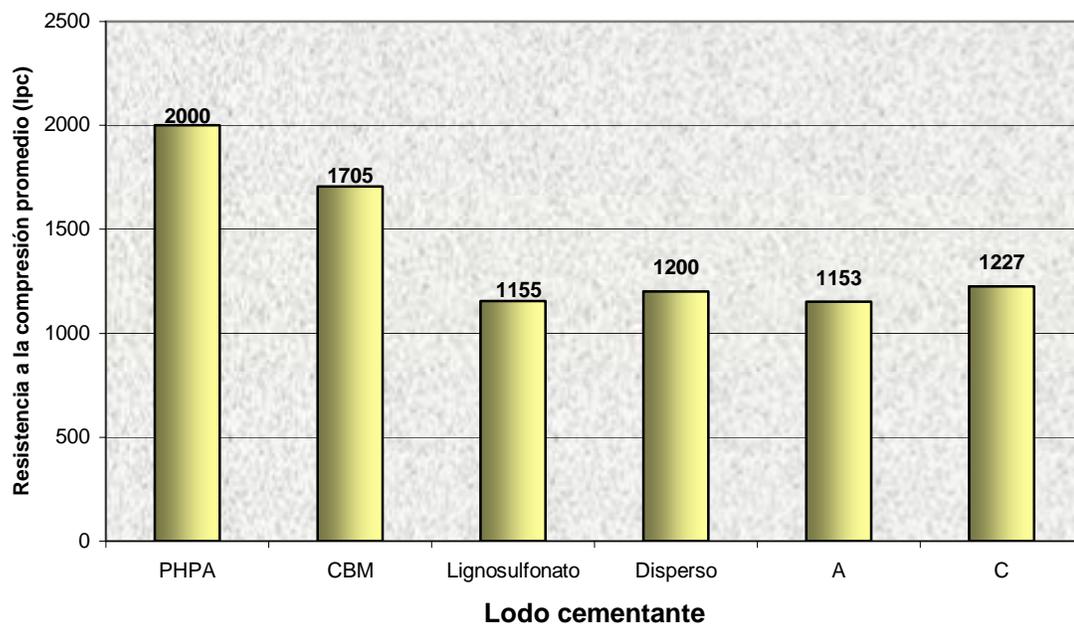
Ahora si se comparan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión mediante el ensayo triaxial con valores de antiguos sistemas de lodo cementante estudiados y probados en Venezuela (ver figuras 66, 67 y 68), se puede notar que presentan desarrollos de compresión muy parecidos a los sistemas desarrollados con los fluidos CBM, Lignosulfonatos y Dispersos formulados para densidades entre 11,5 y 13,5 lpg. No obstante, como se sabe los diseños de lechadas presentados en este trabajo de investigación son solo estudios primarios desarrollados con los fluidos de perforación A, B y C, que pueden seguirse profundizando y mejorando en algunas propiedades.



**Figura 66:** Comparación de valores de resistencia a la compresión desarrollados por varios sistemas de lodo cementante diseñados a una densidad de 11,5 lpg



**Figura 67:** Comparación de valores de resistencia a la compresión desarrollados por varios sistemas de lodo cementante diseñados a una densidad de 12,5 lpg



**Figura 68:** Comparación de valores de resistencia a la compresión desarrollados por varios sistemas de lodo cementante diseñados a una densidad de 13,5 lpg

Lo importante de hacer notar de las figuras anteriores, es el desarrollo de compresión presentado por las lechadas formuladas a partir de los fluidos estudiados en este trabajo de investigación. A pesar de tener 55% y 26% de aceite en el diseño de las lechadas formuladas con los fluidos B y C, respectivamente, los desarrollos de compresión fueron muy similares a los mostrados por los lodos cementantes CBM, lignosulfonatos y dispersos, siendo formulados a partir de fluidos de perforación 100% base agua, lo que quiere decir que el porcentaje de aceite presente como emulsión en las lechadas no influye en la resistencia a la compresión del sistema. Todo lo contrario que ocurre con una lechada de cemento Pórtland. La mezcla de una lechada de este tipo con fluidos base aceite ocasiona un deterioro de las propiedades mecánicas finales de la matriz del cemento, pierde las propiedades de fraguarse homogéneamente y no se desarrolla resistencia a la compresión, por lo que se usan fluidos espaciadores de altos costos que establecen una barrera o distanciamiento entre ellos con el fin de minimizar este contacto. Estos valores de compresión desarrollados por antiguos sistemas de lodo cementante fueron tomados de informes técnicos de la compañía PDVSA.

### 2.7.3 Resistencia a la tensión (Ensayo Indirecto):

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la tensión mediante el método brasilero realizadas a los sistemas de lodo cementante y a la lechada de cemento Pórtland formulada.

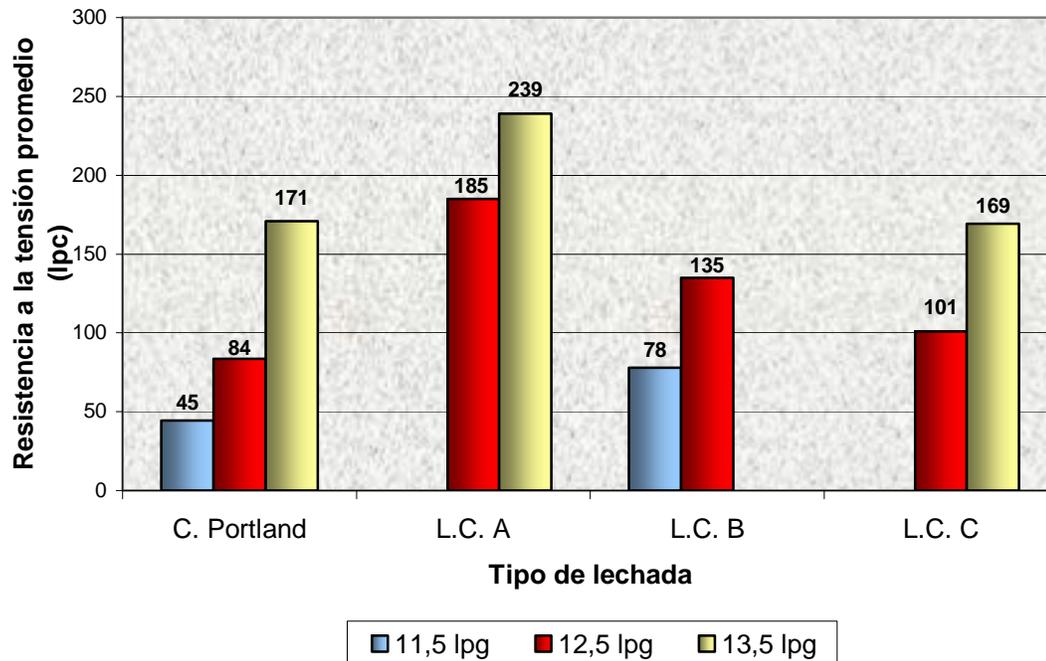
**Tabla 42:** Valores de resistencia a la tensión promedio obtenidos de los ensayos realizados a los diferentes sistemas de lechadas

<b>Formulación</b>	<b>Resistencia a la tensión promedio (lpc)</b>
Cemento H + 5% bentonita @ 11,5 lpg	45
Cemento H + 5% bentonita @ 12,5 lpg	84
Cemento H + 5% bentonita @ 13,5 lpg	171
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	185
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	239
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	78
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	135
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	101
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	169

En pozos con alta inclinación o desviados, la tensión y flexión pasan a ser propiedades mecánicas mucho más importantes que la misma resistencia a la compresión, ya que la dirección de los esfuerzos sobre el cemento cambian.

No existen muchos estudios acerca de la resistencia a la tensión desarrollada por sistemas cementantes para poder ser comparados con los resultados obtenidos. Un cemento clase H de 16,5 lpg de densidad tiene una resistencia a la tensión aproximada entre 400 y 500 lpc para 30 horas de curado a 150F y presión ambiental, medido con un método diferente al brasilero (Norma ASTM C 190-85). En este mismo estudio, fue evaluado un sistema de lodo cementante de 15,5 lpg de densidad diseñado a partir de un fluido PHPA, y los valores

estuvieron alrededor de 300 lpc de resistencia a la tensión (Sabins, Edwards, Maharidge & Weiss, 1996).



**Figura 69:** Comparación de los valores de resistencia a la tensión promedio obtenidos de los ensayos realizados a los sistemas de lodo cementante estudiados

De la Figura 69, podría decirse que un aumento en la concentración de la escoria o cemento conlleva a una mejora en la resistencia a la tensión, siendo el mejor de ellos la lechada formulada a partir del sistema A para 13,5 lpg con 239 lpc. Sin embargo, la diferencia en los resultados obtenidos no es tan grande como para afirmar que un sistema de lodo cementante de los formulados aquí presentes puede sustituir una lechada de cemento Pórtland de acuerdo a la propiedad de resistencia a la tensión, ya que habría que tomar en cuenta otras propiedades físicas y mecánicas, así como los costos asociados a ellos.

#### 2.7.4 Ensayo de flexión:

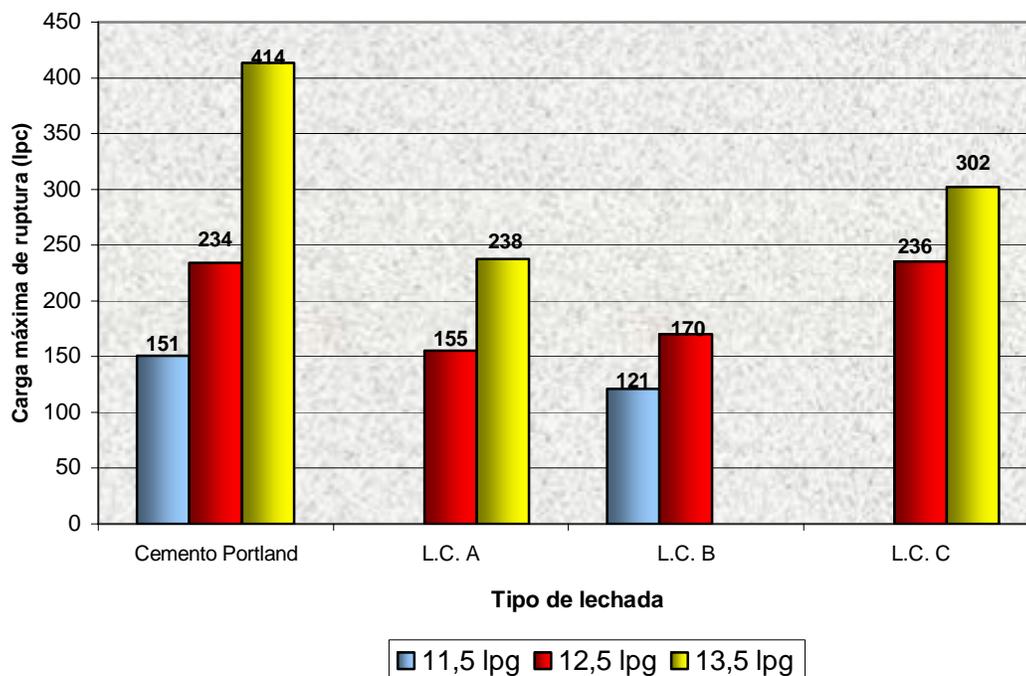
Operaciones de cementación aunque hayan proporcionado un buen aislamiento zonal inicial, cambios en las condiciones de fondo de hoyo pueden inducir esfuerzos que

destruyan la integridad del cemento, resultando en una pérdida del aislamiento alcanzado inicialmente. La flexión en un cemento es importante en pozos altamente desviados, donde gran cantidad de esfuerzos se concentran en el punto de máxima desviación del hoyo, tendiendo a fracturarlo. El diseño de un cemento con flexibilidad mejorada, se basa en módulos de Young y Poisson relativamente bajos, siempre y cuando se mantengan altos valores de resistencia a la compresión y tensión.

Los valores presentados a continuación representan la máxima carga de ruptura que pudieron ser soportados por los sistemas cementantes bajo el ensayo de flexión. No pudo ser determinado cual de los sistemas es más flexible, ya que el equipo no tenía la capacidad de proporcionar la curva esfuerzo deformación y por ende determinar con la pendiente el módulo de flexión.

**Tabla 43:** Valores de carga de ruptura promedio obtenidos de los ensayos de flexión realizados a los diferentes sistemas de lechadas

<b>Formulación</b>	<b>Carga máxima de ruptura (lpc)</b>
Cemento H + 5% bentonita @ 11,5 lpg	151
Cemento H + 5% bentonita @ 12,5 lpg	234
Cemento H + 5% bentonita @ 13,5 lpg	414
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	155
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	221
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	121
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	170
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	260
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	302



**Figura 70:** Comparación de la carga máxima de ruptura bajo un ensayo de flexión obtenida para los sistemas de lechada diseñados

De acuerdo a los resultados obtenidos presentes en la Figura 70, se notar que un aumento en la concentración de escoria y cemento en los distintos sistemas de lechadas formuladas, conlleva a una mejora en la capacidad de resistir carga hasta ruptura por flexión, sin embargo, no se puede afirmar cual de ellos es el más flexible.

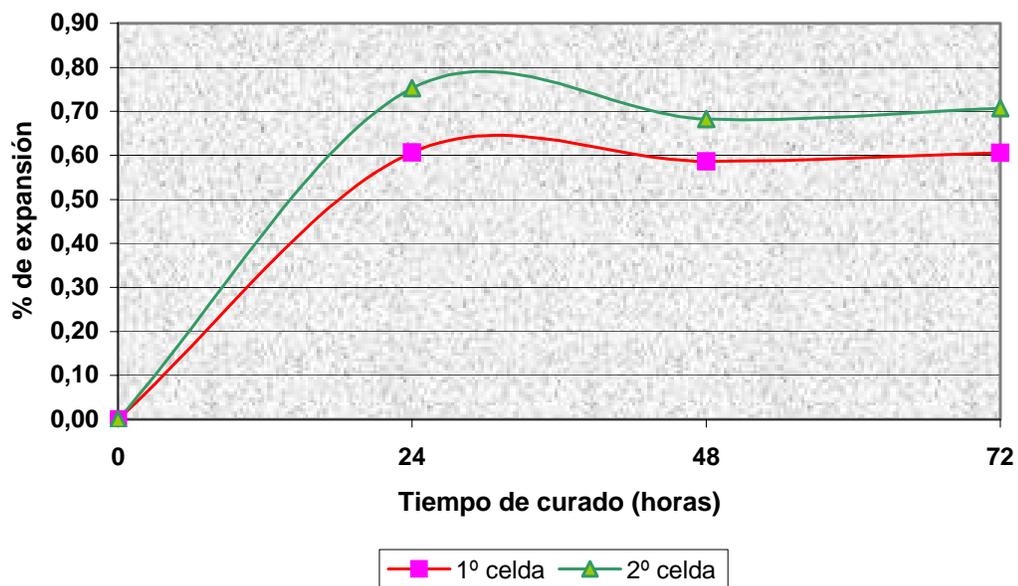
Un aumento en cantidad de material cementante tiene relación con la capacidad de producir enlaces mucho más fuertes y rígidos, con propiedades de resistir mayor cantidad de carga y reflejarse en un mayor módulo de rigidez o Young. La lechada de cemento Portland presentó la mejor capacidad de resistir carga en comparación con los lodos cementantes, y el mejor de estos fue la lechada formulada a partir del fluido C que a la vez concuerda con el mayor módulo de Young, de acuerdo a los resultados presentes en la Tabla 41.

### 2.7.5 Pruebas de expansión:

Los resultados obtenidos de las pruebas de expansión realizadas a las lechadas estudiadas se presentan a continuación:

**Tabla 44:** Resultados de la prueba de expansión obtenidos para la formulación de lodo cementante A @ 13,5lpg

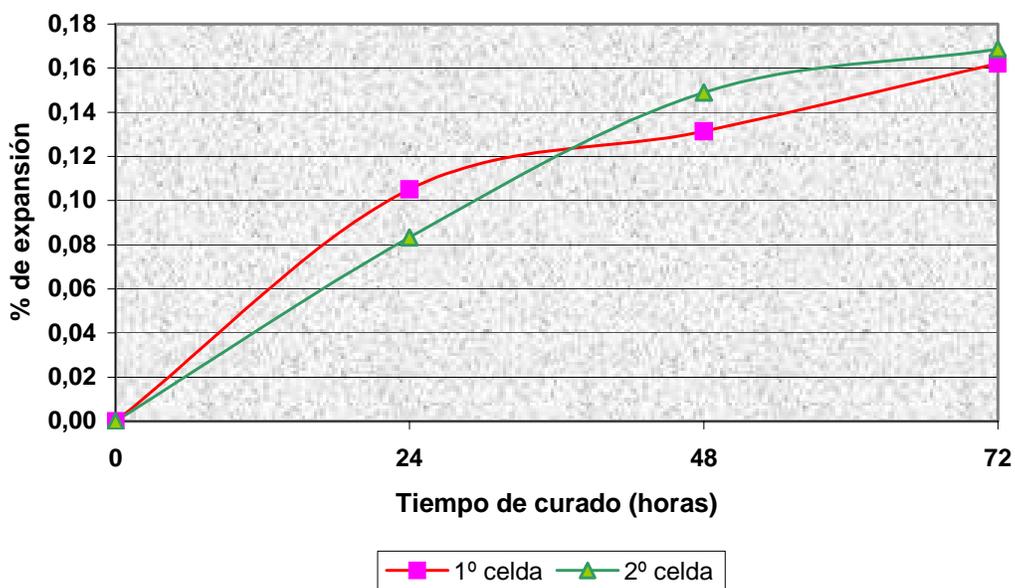
	Tiempo de curado (horas)	Distancia entre los balines de acero (pulgadas)	% de expansión
1° celda	0	0,3512	0
	24	0,4066	0,607
	48	0,4048	0,587
	72	0,4065	0,606
2° celda	0	0,3491	0
	24	0,4178	0,752
	48	0,4114	0,682
	72	0,4137	0,707



**Figura 71:** Gráfica comparativa del % de expansión vs tiempo de curado para la formulación de lodo cementante A @ 13,5 lpg

**Tabla 45:** Resultados de la prueba de expansión obtenidos para la formulación de lodo cementante B @ 11,5lpg

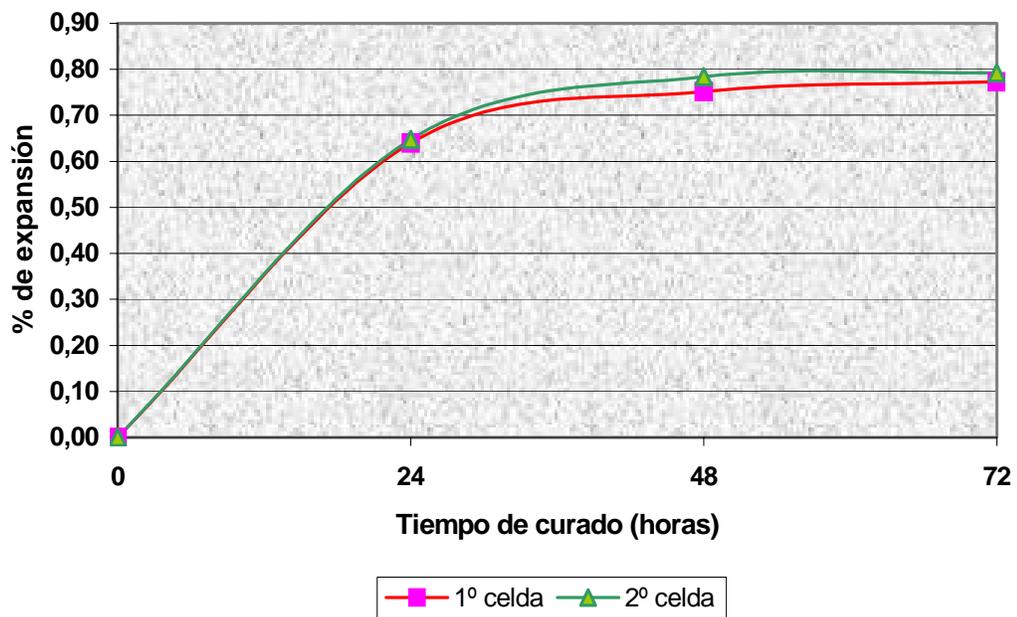
	Tiempo de curado (horas)	Distancia entre los balines de acero (pulgadas)	% de expansión
1° celda	0	0,4084	0
	24	0,4180	0,105
	48	0,4204	0,131
	72	0,4232	0,162
2° celda	0	0,4000	0
	24	0,4076	0,083
	48	0,4136	0,149
	72	0,4154	0,169



**Figura 72:** Gráfica comparativa del % de expansión vs tiempo de curado para la formulación de lodo cementante B @ 11,5 lpg

**Tabla 46:** Resultados de la prueba de expansión obtenidos para la formulación de lodo cementante C @ 12,5lpg

	Tiempo de curado (horas)	Distancia entre los balines de acero (pulgadas)	% de expansión
1° celda	0	0,3500	0
	24	0,4084	0,639
	48	0,4186	0,751
	72	0,4206	0,773
2° celda	0	0,3522	0
	24	0,4113	0,647
	48	0,4238	0,784
	72	0,4246	0,793



**Figura 73:** Gráfica comparativa del % de expansión vs tiempo de curado para la formulación de lodo cementante C @ 12,5 lpg

La propiedad de expansión en un cemento es muy importante, ya que ayuda a disminuir la existencia de microanillos, mejora la adherencia revestimiento-cemento y cemento-formación, y contribuye a mejorar el aislamiento zonal, que es la principal función de una cementación primaria.

Los sistemas de cemento Portland tienen la característica de presentar encogimiento volumétrico en el proceso de fraguado, esto es debido a que el volumen absoluto de los productos es menor que el volumen absoluto de los reactantes en el proceso de hidratación, para este caso de los compuestos de silicatos presentes en el cemento y el agua. El encogimiento promedio para una lechada con cemento clase G está en el orden de 5 a 7%. (Song et al., 2000).

En cambio, los sistemas de lodo cementante con escoria tienen la capacidad de expandirse en el fraguado. Esta capacidad viene dada principalmente por la cantidad de óxido de magnesio presente en la composición química de la escoria, que es de aproximadamente 12%, en comparación con la presente en un cemento Portland que es menor al 1%. El óxido de magnesio proporciona una fuerza expansiva en la matriz del cemento, donde el material hidratado ocupa mayor espacio o volumen que el original (Nelson, 1990).

De los resultados obtenidos, se puede notar que las lechadas diseñadas a partir del sistema C y A presentaron los mejores valores de expansión, teniendo en promedio 0,8 y 0,7% respectivamente, y la formulada con el fluido B tuvo un porcentaje menor al 0,2. Estos valores se consideran muy buenos, si se comparan con el estudio publicado por Song et al. (2000), donde desarrollaron sistemas de lodo cementante a partir de fluidos poliméricos y salinos, y obtuvieron resultados hasta de 0,53% de expansión, mejorando notablemente la adherencia del cemento al revestidor y formación.

### **3. Factibilidad económica:**

Tomando en consideración un pozo del área de Lagunillas, con una profundidad aproximada de 2000 pies, un hoyo de 8 1/2" y revestidor de 7", y con un volumen de cemento en hoyo con 40% de exceso sobre el volumen real, representa aproximadamente 65 barriles de lechada.

Una compañía de servicios proporcionó un estimado de costos para preparar este volumen de lechada, con una formulación de cemento Pórtland y una de lodo cementante a partir de un fluido disperso para densidades de 13,5 lpg. Por otra parte, las lechadas de lodo cementante estudiadas en este trabajo de investigación, fueron diseñadas a través de la hoja de cálculo para preparar ese mismo volumen.

En las tablas presentadas a continuación, se dividen los costos en cargos por equipos, cargos por servicios y los cargos por productos.

En los cargos por equipos se incluyen los costos como el kilometraje del camión bomba, densitómetro nuclear, recirculador, tiempos de espera por operador y ayudante, cargos básicos de 0 a 7000', cargos por pie cúbico, entre otros. La principal diferencia en costos que se nota en los cargos por equipos, es la inclusión del recirculador para preparar la lechada de lodo cementante y no en la de cemento Pórtland.

En los cargos por servicios, se incluyen el vacum para recolectar retornos, cisternas de agua y cisterna de preflujos. Para el caso de la preparación de lodos cementantes, la cisterna de preflujos no se incluye.

En los cargos por productos para la preparación de la lechada de cemento Pórtland se incluyen los costos del cemento por sacos, los aditivos utilizados para un pozo de esas características, así como los preflujos y lavadores. En la preparación de las lechadas de lodo cementante, se incluye el costo del fluido de perforación, escoria, activadores, y otros aditivos que hagan falta, como controladores de filtrado, antiespumantes, sílica, etc.

**Tabla 47:** Estimado de costos para una lechada de cemento Pórtland y una de lodo cementante formulada a partir de un fluido de perforación disperso

<b>Estimado con cemento Portland (13,5 lpg)</b>					
			<b>TOTAL BS.</b>		<b>TOTAL \$</b>
<b>Cargo por equipos</b>			1.080.712,00		3.301,47
<b>Cargo por servicios</b>			567.631,00		0,00
<hr/>					
<b>Productos</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>
Cemento Portland (sacos)	162	8.185,00	1.325.970,00	--	--
Aditivos varios	--	--	1.891.091,00	--	3.261,56
Preflujos y lavadores	--	--	978.180,00	--	2.620,80
<hr/>					
<b>TOTAL PRODUCTOS, EQUIPOS Y SERVICIOS</b>			<b>5.843.584,00</b>		<b>9.183,83</b>
<hr/>					
<b>Estimado lodo cementante Disperso (13,5 lpg)</b>					
			<b>TOTAL BS.</b>		<b>TOTAL \$</b>
<b>Cargo por equipos</b>			1.766.315,00		5.430,63
<b>Cargo por servicios</b>			367.631,00		0,00
<hr/>					
<b>Productos</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>
Fluidos de perforación (bbls)	19	--	--	13,00	247,00
Escoria (sacos)	234	--	--	19,20	4.492,80
Soda Caustica (lbs)	192	277,00	53.184,00	--	--
Soda Ash (lbs)	768	168,00	129.024,00	--	--
Aditivos varios	--	--	756.939,00	--	282,64
<hr/>					
<b>TOTAL PRODUCTOS, EQUIPOS Y SERVICIOS</b>			<b>3.073.093,00</b>		<b>10.453,07</b>

**Tabla 48:** Estimado de costos para lechadas de lodo cementante formuladas a partir de los fluidos de perforación A y B

<b>Estimado lodo cementante A (12,5 lpg)</b>						<b>Estimado lodo cementante A (13,5 lpg)</b>					
			TOTAL BS.		TOTAL \$			TOTAL BS.		TOTAL \$	
<b>Cargo por equipos</b>			1.766.315,00		5.430,63			1.766.315,00		5.430,63	
<b>Cargo por servicios</b>			367.631,00		0,00			367.631,00		0,00	

<b>Productos</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>
Fluidos de perforación (bbls)	15	--	--	65,00	975,00	14	--	--	65,00	910,00
Escoria (sacos)	202	--	--	19,20	3.884,40	254	--	--	19,20	4.882,80
Soda Caustica (lbs)	130	277,00	36.010,00	--	--	130	277,00	36.010,00	--	--
Soda Ash (lbs)	520	168,00	87.360,00	--	--	520	168,00	87.360,00	--	--
Lignito (sacos)	3	--	--	20,00	60,00	3	--	--	20,00	60,00
<b>TOTAL PRODUCTOS, EQUIPOS Y SERVICIOS</b>			<b>2.257.316,00</b>		<b>10.350,03</b>	<b>2.257.316,00</b>				<b>11.283,43</b>

<b>Estimado lodo cementante B (11,5 lpg)</b>						<b>Estimado lodo cementante B (12,5 lpg)</b>					
			TOTAL BS.		TOTAL \$			TOTAL BS.		TOTAL \$	
<b>Cargo por equipos</b>			1.766.315,00		5.430,63			1.766.315,00		5.430,63	
<b>Cargo por servicios</b>			367.631,00		0,00			367.631,00		0,00	

<b>Productos</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>
Fluidos de perforación (bbls)	40	--	--	70,00	2.800,00	37	--	--	70,00	2.590,00
Escoria (sacos)	190	--	--	19,20	3.650,40	239	--	--	19,20	4.586,40
Soda Caustica (lbs)	65	277,00	18.005,00	--	--	65	277,00	18.005,00	--	--
Soda Ash (lbs)	520	168,00	87.360,00	--	--	520	168,00	87.360,00	--	--
<b>TOTAL PRODUCTOS, EQUIPOS Y SERVICIOS</b>			<b>2.239.311,00</b>		<b>11.881,03</b>	<b>2.239.311,00</b>				<b>12.607,03</b>

**Tabla 49:** Estimado de costos para lechadas de lodo cementante formuladas a partir del fluido de perforación C

<b>Estimado lodo cementante C (12,5 lpg)</b>					
			<b>TOTAL BS.</b>		<b>TOTAL \$</b>
<b>Cargo por equipos</b>			1.766.315,00		5.430,63
<b>Cargo por servicios</b>			367.631,00		0,00

<b>Productos</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>BOLIVARES</b>	<b>TOTAL BS.</b>	<b>DOLARES</b>	<b>TOTAL \$</b>
Fluidos de perforación (bbls)	13	--	--	130,00	1.690,00
Escoria (sacos)	202	--	--	19,20	3.884,40
Soda Caustica (lbs)	260	277,00	72.020,00	--	--
Soda Ash (lbs)	650	168,00	109.200,00	--	--
Mezcla de surfactantes (lts)	1.908	1.029,00	1.963.332,00	--	--

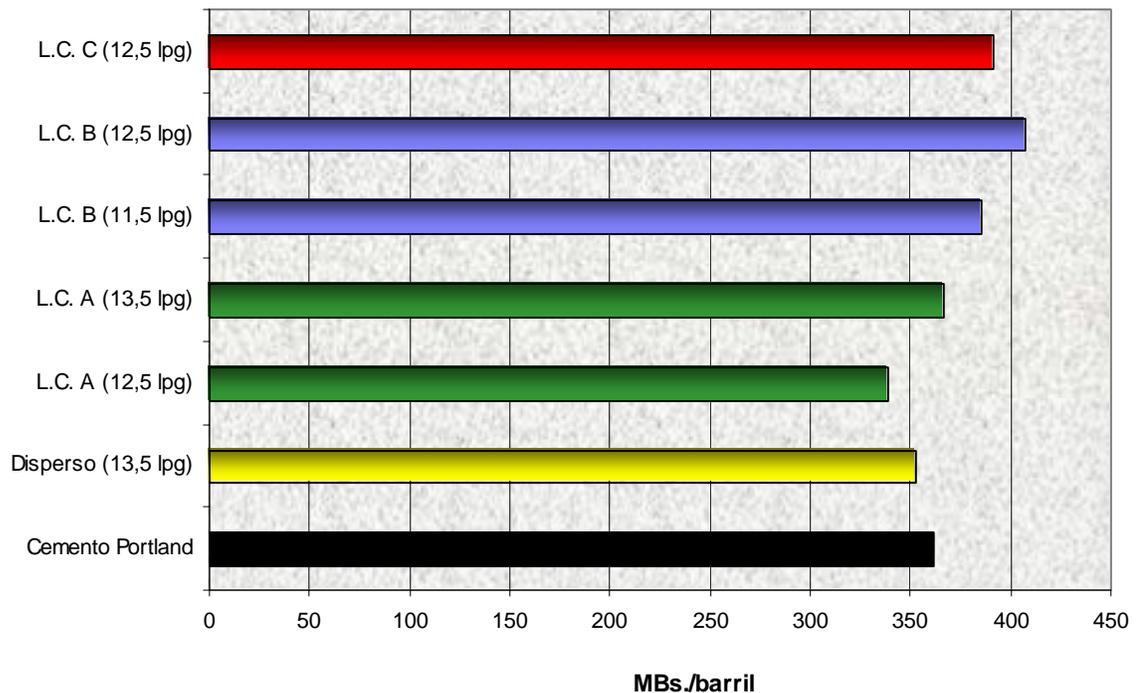
  

<b>TOTAL PRODUCTOS, EQUIPOS Y SERVICIOS</b>			<b>4.278.498,00</b>		<b>11.005,03</b>
---	--	--	---------------------	--	------------------

**Tabla 50:** Resumen de costos totales para lechadas de cemento Pórtland y diferentes tipos de lodos cementantes

Tipo de lechada	Costo		Costo total cementación (Bs.)	Costo por barril en MBs.
	Bs.	\$		
Cemento Pórtland	5.843.584	9.183,83	23.476.538	361,2
L.C. Disperso (13,5 lpg)	3.073.093	10.453,07	23.142.987	356,5
Lodo cementante A (12,5 lpg)	2.257.316	10.350,03	22.129.374	340,5
Lodo cementante A (13,5 lpg)	2.257.316	11.283,43	23.921.502	368,0
Lodo cementante B (11,5 lpg)	2.239.311	11.881,03	25.050.889	385,4
Lodo cementante B (12,5 lpg)	2.239.311	12.607,03	26.444.809	406,8
Lodo cementante C (12,5 lpg)	4.278.498	11.005,03	25.408.156	390,9

**Cambio oficial 25/04/2004: 1\$ = 1920 Bs.**



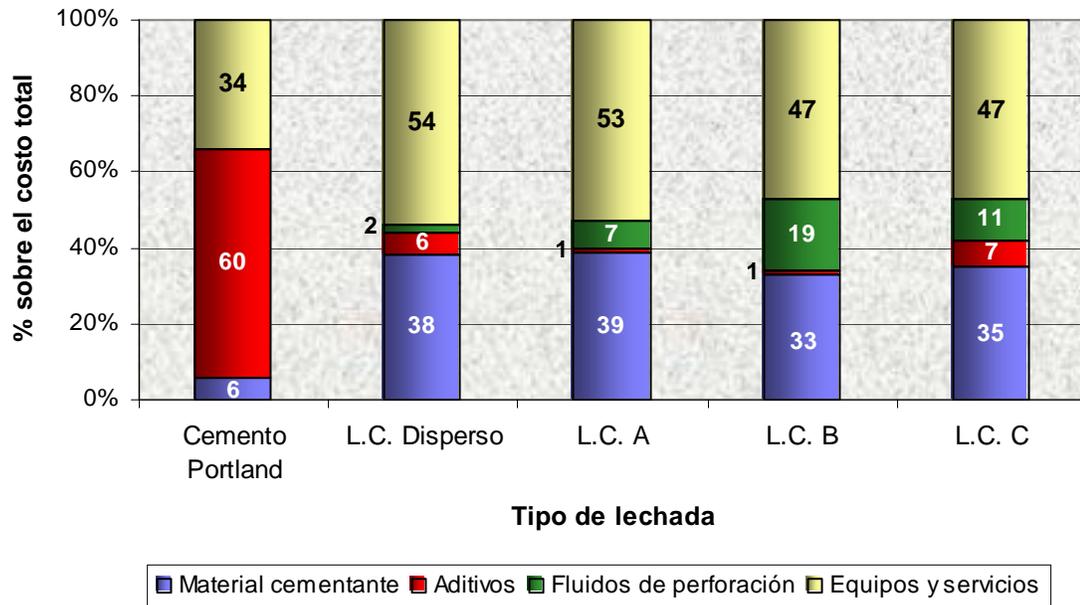
**Figura 74:** Comparación de los costos por barril para diferentes tipos de lechadas

Si se evalúa el costo por barril obtenido para los distintos sistemas cementantes presentados en la figura 74, la lechada formulada a partir del sistema A, es factible económicamente, ya que se encuentra en un rango bastante cercano al estimado de costos con la cementación Pórtland, en cambio, la formulación de lechadas a partir de los fluidos de perforación poliméricos comerciales B y C presentan un exceso de costos desde 6 hasta 13% sobre una cementación convencional. Sin embargo, no se puede enfatizar a priori que los costos son mayores, ya que la cementación con este tipo de tecnología podría presentar menos problemas durante la vida de un pozo y disminuir los costos a largo plazo, como se ha tenido experiencia en las aplicaciones de campo llevadas a cabo con antiguos sistemas de lodo cementante en pozos de inyección de vapor. Por otra parte, como se pudo observar no fueron incluidos los costos de la cementación con un lodo cementante C diseñado a 13,5 lpg, ya que no cumplen con los valores reológicos recomendados para ser utilizado en una posible aplicación de campo.

En la Figura 75 se presenta una grafica comparativa del porcentaje que representa del costo total los equipos y servicios, material cementante, fluidos de perforación y aditivos, para lechadas diseñadas a partir de cemento Pórtland y lodos cementantes formulados a partir de distintos fluidos.

En esta se puede notar que el mayor porcentaje de costo en la lechada de cemento Pórtland esta destinado a los aditivos y preflujos, aproximadamente 60% en comparación con los lodos cementantes que varían entre 1 y 7%. Es necesario aclarar, que en los lodos cementantes formulados en este trabajo de investigación debido a que son pruebas iniciales de factibilidad que pueden seguirse mejorando, no se incluyeron aditivos como la sílica ni controladores de filtrado, que aumentarían un poco el porcentaje obtenido de aditivos para los distintos sistemas de lechadas. Con el cemento formulado a partir del fluido C, se obtuvo un 7%, donde la mayor parte de este porcentaje esta destinado a la mezcla de surfactantes utilizado en su formulación. Los aditivos son los principales ahorradores de costo en los sistemas de lodo cementante, haciendo de este tipo de tecnología mucho más rentable, sobre todo en pozos de alta presión y gas, ya que la necesidad de aditivos costosos

en los sistemas de cemento Pórtland se hace mucho más marcada para cumplir con los requerimientos de la cementación.



**Figura 75:** Gráfica comparativa del porcentaje que representa del costo total de la cementación los equipos y servicios, material cementante, fluidos de perforación y aditivos para diferentes tipos de lechadas

Un precio bastante alto en los sistemas de lodo cementante se ve reflejado en la escoria, que se encuentra entre 30 y 40% del costo total de la cementación, si se compara con el cemento Pórtland, que está alrededor del 6%. Esa diferencia tan grande se debe principalmente a la importación del material cementante, que tiene un costo aproximado de 37.000 Bs. por saco, mucho mayor que los 9.000 Bs. que puede llegar a costar uno de cemento Pórtland. Por esto, si se lograra la fabricación de una escoria a nivel nacional que cumpla con los requerimientos químicos para que pueda ser usada como material cementante y llegar a los niveles de precio del cemento Pórtland común, el ahorro de costos sería inmenso, disminuyendo en gran medida el costo final de la cementación.

El costo de los fluidos de perforación fueron incluidos dentro del total de las lechadas de lodo cementante. Esto se debe a que los fluidos utilizados para la formulación de las

lechadas en esta investigación son 100% reciclables, ya que son poliméricos de alto costo, y con alto porcentaje de aceite mineral. Por lo tanto, no se obtendrían ahorros considerables por disposición de ellos al ambiente. El costo por barril de estos fluidos está por el orden de 65, 70 y 130 dólares para los fluidos A, B y C, respectivamente.

En cuanto al costo total de los equipos y servicios, se puede comentar que representan alrededor del 50% para formular las lechadas de lodo cementante, en comparación con el 34% obtenido para la lechada de cemento Pórtland. Este costo es un factor variable que depende de la compañía de servicio y las características del pozo.

## CONCLUSIONES

- Se pudo demostrar la factibilidad técnica de formular sistemas de lodo cementante a partir de fluidos de perforación poliméricos comerciales A, B y C.
- Las lechadas formuladas presentaron buena estabilidad, teniendo 0% de fluido libre y una sedimentación muy baja, con una diferencia máxima en densidad de base a tope de 0,29lpg.
- La lechada formulada a partir del fluido A presentó una baja pérdida de filtrado en comparación con las diseñadas a partir de los sistemas B y C, que fueron bastante altas.
- La lechada diseñada a 11,5 lpg a partir del fluido B presenta una resistencia a la compresión muy baja para ser usada en una zona productora.
- Los desarrollos de compresión obtenidos con los sistemas de lodo cementante formulados en este trabajo de investigación fueron muy parecidos a los obtenidos con antiguos sistemas utilizados en Venezuela, diseñados a partir de fluidos tipo lignosulfonatos, dispersos y CBM. Lo que quiere decir que la cantidad de aceite presente en la formulación de las lechadas diseñadas a partir de los fluidos B y C no influencia el desarrollo de esta propiedad.
- Un aumento en la concentración del material cementante conlleva a una mejora en la resistencia a la compresión, tensión y carga máxima hasta ruptura por flexión en los diferentes sistemas de lechadas formuladas.
- Con respecto al porcentaje de expansión obtenido con los sistemas de lodo cementante formulados se obtuvieron buenos resultados, en comparación con el encogimiento que experimenta una lechada de cemento Pórtland en su proceso de hidratación.

- La lechada formulada a partir del fluido A es factible económicamente, mientras que los sistemas de lodo cementante formulados a partir del B y C presentaron un exceso de costos sobre una cementación convencional desde 6 hasta 13%, esto debido principalmente al alto costo de importación de la escoria.

## RECOMENDACIONES

- Rediseñar las formulaciones presentadas en este trabajo con el fin de mejorarlas, en caso de necesitar sistemas cementantes con desarrollos de propiedades físicas y mecánicas mucho más rigurosas.
- Realizar estudios del desarrollo de gel estático y migración de gas en este tipo de lechadas con el propósito de evaluar su capacidad antimigratoria.
- Utilizar este tipo de lechadas en pozos verticales y desviados, tomando en consideración su buena estabilidad.
- Añadir un aditivo controlador de filtrado en las lechadas formuladas a partir de los fluidos B y C, con el fin de mejorar esta propiedad y hacerlas aptas para ser usadas en zonas productoras.
- Rediseñar la lechada formulada a 11,5 lpg a partir del fluido B, esto con el fin de mejorar su resistencia a la compresión y poder ser usada en una zona productora.
- Seguir con el estudio de conversión de fluidos de perforación base aceite en sistemas de lodo cementante, esto con el fin de buscar nuevas alternativas para mejorar el aislamiento zonal en los procesos de cementación.
- Utilizar este tipo de sistemas de lodo cementante para asegurar la adherencia tubería formación, tomando en consideración su carácter expansivo.
- Buscar alternativas de suministro de materia prima (escoria) a nivel nacional que posea las características físico químicas necesarias para ser usada como material cementante, esto con el fin de hacer factible económicamente la tecnología de conversión de lodo a cemento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, J. C. (2001). *Estudio de las Propiedades Mecánicas para el Diseño de Lechadas de Cemento en Revestidores Colgantes en el Distrito Punta de Mata*. Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial para optar al título de Ingeniero de Petróleo, Maturín.
- American Petroleum Institute (1990). *Specification for materials and testing for well cements*. Washington DC: API Specification 10
- American Petroleum Institute (1997) *API Recommended Practice 10B for testing well cements*. (API RP10B). 2º edición
- Baumgarte, C., Thiercelin, M.. & Klaus, D. (1999). *Case studies of expanding cement to prevent microannular formation*. Paper SPE 56535, Texas.
- Barberii, E. (2001) *El pozo ilustrado*. Ediciones FONCIED 5º edición. Caracas.
- Benge, O. & Webster, W. (1994). *Evaluation of Blast Furnace Slag slurries for oilfield application*. Paper SPE 27449, Texas.
- Blanco, A., Colina, A., Rodríguez, W. & Bolívar, R. (1999). *Effective Pay Zone Isolation of Steam Injection Wells*. Paper SPE 53689. Caracas.
- Blanco, A., Colina A., García M., Cadenas C., Cásares J. & Martín R. (2002). Tecnología de cementación con lodo. Proceso de adaptación y transferencia en Pdvsa. *Visión Tecnológica*, 9, 22-28
- Blanco, J., Torres, L., Ramirez, F., Mayor, F. & Romero, J. (2003) *Performance and application of aerated o/w emulsion in the field using conventional static mixing technologies workover operation in low pressure reservoir and its implication field economics*. Paper SPE 81085. Trinidad.
- Bolívar, R., Centeno, A. & Ramírez, C. (2003) Planificación de la operación de cementación. *Taller especial de cementación de pozos de petróleo y gas*. [Presentación] Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Bourgoyn, A., Millheim, K. & Echevenert, M. (1991) *Applied Drilling Engineering*. Edit. Richardson Text. Texas.
- Casares, J., García, M., Blanco, A., Muñoz, R., Rodríguez, E. & Jimenez, W. (2002). *Versatilidad y eficiencia de la tecnología de cementación con lodo en pozos de inyección de vapor*, XIII Congreso Latinoamericano de Perforación. Venezuela.
- Centro internacional de investigaciones para el desarrollo (1997). *Escorias de altos hornos* [Documento en línea]. Disponible: <http://www.idrc.ca/library/document/027658/0276>

58b.htm#III%20ESCORIA%20DE%20ALTO%20HORNO} [Consulta: 2003, Noviembre 12]

- Cowan, K., Hale, A. & Nahm, J. (1992) *Conversion of Drilling Fluids to Cements with Blast Furnace: Performance Properties and Applications for Well Cementing* Paper SPE 24575, Washington.
- Crispina, L. (2000). *Metales y no metales* [Documento en línea]. Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos13/quimidos/quimidos.shtml> [Consulta: 2003, Noviembre 12]
- D'Almeida, A, Miranda, C. & Campos, G. (2003). *Storable slurries and their use in oil and gas well cementing*. Paper SPE 80998, Puerto España, Trinidad.
- Economides, M., Watters, L. & Dunn-Norman, S. (1998). *Petroleum Well Construction* Inglaterra: Edit. J Wiley & Sons Ltd.
- Escalante, J. & Gómez, Y. (2001). Reactivity of blast furnace slag in Portland Cement blends hydrated under different conditions, *Cement and Concrete Research*, 3, 112-114
- Fjaer, E. (1992). *Petroleum Related Rocks Mechanics*. Ámsterdam: Edit. Elsevier.
- Hale, A. & Cowan, K. (1991). *Solidification of water base mud*. United States Patent N° 5058679
- Kadkajian, S., Blanco, J., Graterol, L., Atencio, B. (2004) *Metodologías para evaluar fluidos de perforación viscoelásticos*. V Seflu Cempo. Margarita-Venezuela
- Mas, M., Gabay, R., Hernandez, M & Quintero, L. (1996) *Nuevas tecnologías en fluidos base aceite para alta presión y temperatura*. X Colaper. Ecuador.
- Mueller, D. & Dickerson, J. (1994). *Blast Furnace Slag Technology: features, limitations and practical applications*, Paper 28475, New Orleans.
- Nahm, J., Javanmardi, K., Cowan, H. & Hale, A. (1993). *Slag Mix Mud Conversion Cementing Technology: reduction of mud disposal volumes and management of rig site drilling wastes*. Paper SPE 25988, Texas.
- Nahm, J., Romero, R., Wyant, R., Hale, A., Briggs, B., Smith, T. et al (1994). *Universal Fluid: a drilling fluid to reduce lost circulation and improve cementing*. Paper SPE 27448, Texas.
- Nahm, J., Romero, R., Javanmardi, K. & Wyant, R. (1995). *Interfacial sealing properties of slag mix (mud to cement conversion technology): laboratory and field evaluation*. Paper SPE 29407, Amsterdam.

- Nelson, E. (1990). *Well Cementing*. Texas: Schlumberger Educational Services
- Norma ASTM C 496 – 9 (1993). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- Norma ASTM D 790 – 99 (1999). *Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*.
- Pérez, D. (1996). *Perforación de pozos petroleros* [Documento en línea] Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos14/petrol/petrol.shtml#perfor> [Consulta: 2003, Octubre 21]
- Rendon, M. & Tintori, G. (1994). *Evaluación de escorias de acería eléctrica de planchones y palanquillas de C.V.G. Sidor como agregado en mezclas cementicias*. Informe Pasantía Industrial presentado ante la Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Sabins, F., Edwards, T., Maharidge, T. & Weiss, M. (1996) *Critical evaluation of Blast Furnace Slag Mud Converted to Cement*. Paper SPE 35085, Louisiana.
- Sánchez, M. & Vásquez, A. (1999). *Introducción a la geomecánica petrolera*. Caracas: VVA Consultores C.A.
- Schlemmer, R., Branam, N., Edwards, T. & Valenziano, R. (1994). *Drilling fluid conversion: selection and use of Portland or Blast Furnace Slag Cement*. Paper SPE 26324, Houston.
- Silva, M., Miranda, C., D'Almeida, A., Campos, G. & Bezerra, M. (1997). *Slag Cementing versus Conventional Cementing: Comparative bond results*, Paper SPE 39005, Rio de Janeiro.
- Song, M., Wang, W. & Ma, K. (2000). *Slag MTC Techniques solve cementing problems in complex wells*. Paper SPE 64758, Beijing.
- Weld, D. (2002). *Tecnología básica de la soldadura* [Documento en línea] Disponible: [http://www.drweld.com/Tec\\_Basica.html](http://www.drweld.com/Tec_Basica.html) [Consulta: 2003, Noviembre 12]
- Wikipedia (2004). *Polímeros*. [Documento en línea]. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Pol%EDmero>. [Consulta: 2004, Abril 14]
- Wilson, N., Carpenter, R. & Bradshaw, R. (1990). *Conversion of Mud to Cement*. Paper SPE 20452, New Orleans.

## LISTA DE ABREVIATURAS

,	Signo gramatical usado como pausa y separador decimal
.	Signo gramatical usado como fin de párrafo y separador de miles
° F	Grados Fahrenheit
bbbl	Barriles
cc	Centímetros cúbicos
mín	Minutos
lpg	Libras por galón
API	Instituto Americano del Petróleo “American Petroleum Institute”
SPE	Sociedad de Ingenieros de Petróleo “Society of Petroleum Engineers”
$\mu_p$	Viscosidad plástica (cps)
cps	Centipoises
$\tau_o$	Punto cedente (libras fuerza/100pie <sup>2</sup> )
lbf	Libras fuerza
HPHT	Alta presión alta temperatura
L.C.	Lodo cementante
Kg	Kilogramos
F	Índice de hidráulicidad
\$	Dólares
Ton	Toneladas
lpc	Libras por pulgada cuadrada
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados
rpm	Revoluciones por minuto
Tonf	Toneladas fuerza
grs	Gramos
L <sub>600</sub>	Lectura del viscosímetro a 600 revoluciones por minuto
L <sub>300</sub>	Lectura del viscosímetro a 300 revoluciones por minuto
Plodo	Peso del lodo colocado dentro de la celda de retorta (gramos)
Pfilt	Peso del filtrado obtenido de la prueba de retorta (gramos)

Psólidos	Cantidad de material densificante por barril de los fluidos de perforación (gramos)
seg	Segundos
o/w	Aceite en agua
Temp.	Temperatura
k	Índice de consistencia del fluido
R <sup>2</sup>	Índice de correlación
CBM	“Clay Based Mud”
KNw	Kilonewton
mm	Milímetros
Qt	Filtrado (centímetros cúbicos)
t	Tiempo (minutos)
To	Resistencia a la tensión (libras por pulgada cuadrada)
Fmáx	Fuerza máxima (kilonewton)
D	Diámetro (milímetros)
L	Longitud (milímetros)
$\sigma_f$	Resistencia a la flexión (libras por pulgada cuadrada)
P	Carga de fuerza (libras fuerza)
l	Longitud (pulgadas)
b	Ancho (pulgadas)
d	Altura (pulgadas)
Mi	Medición inicial (pulgadas)
Mt	Medición después del tiempo (pulgadas)
Ec.	Ecuación
m/v	Masa volumen
Lb/bbl	Libras por barril
Bc	Unidades Bearden de consistencia
BHCT	Temperatura circulante de fondo de hoyo
BHST	Temperatura estática de fondo de hoyo
RC	Resistencia a la compresión
Bs.	Bolívares
MBs.	Miles de bolívares

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Álcalis:** cualquier compuesto que tiene marcadas propiedades básicas. Gran cantidad de iones  $\text{OH}^-$  que elevan el pH de una solución.

**Anular:** espacio comprendido entre el revestidor y la formación

**Arcilla:** tierra plástica, blanda, de diversos colores; se trata comúnmente de un silicato de aluminio hidratado, formado por la descomposición del feldespatos y otros silicatos de aluminio.

**Barril equivalente:** unidad de laboratorio empleada para la evaluación o pruebas de lodos. Un gramo de material, cuando se añade a 350 ml de lodo, es equivalente a la adición de 1 libra de material a un barril (42 galones) de lodo.

**Barril:** unidad volumétrica de medida empleada en la industria petrolera que equivale a 42 galones.

**Centipoise:** es una unidad de viscosidad igual a 0,01 poise. Un poise es igual a un gramo por metro-segundo, y un centipoise es 1 gramo por centímetro-segundo.

**Coloide:** se refiere a una sustancia que consta de partículas ultra-finas que no se disuelven sino que permanecen suspendidas. Estas partículas ultra-finas son más grandes que la mayoría de las moléculas, pero tan pequeñas que no pueden ser vistas a simple vista. El tamaño de las partículas coloidales varía entre  $10^{-7}$  cm y  $5 \times 10^{-5}$  cm.

**Copolímero:** una sustancia formada cuando dos o más sustancias se polimerizan al mismo tiempo para generar un producto que no constituye una mezcla de polímeros separados, sino un complejo cuyas propiedades son diferentes de las propiedades individuales de cualquiera de estos polímeros.

**Dispersante:** cualquier producto químico que estimula la dispersión de la fase dispersa de los fluidos de perforación.

**Elasticidad:** habilidad de un material de resistir y recuperarse de deformaciones producidas por alguna fuerza.

**Emulsión:** una mezcla líquida heterogénea, sustancialmente permanente, de dos o más líquidos que normalmente no se disuelven uno en otro, pero que son mantenidos en suspensión o dispersión, uno en otro, por agitación mecánica, o más frecuentemente, mediante la adición de pequeñas cantidades de sustancias llamadas emulsificantes. Las emulsiones pueden ser mecánicas, químicas o una combinación de ambas. Los tipos de emulsión son aceite en agua o agua en aceite.

**Esfuerzo de corte:** fuerza requerida para deslizar una capa de área unitaria de una sustancia sobre otra capa de la misma sustancia.

**Fase continua:** fase fluida que rodea completamente a la fase dispersa, que puede consistir en coloides, petróleo, etc.

**Fase dispersa:** fase constituida por las partículas separadas entre sí (sólidas, líquidas o gaseosas en una suspensión). Estas partículas están finamente divididas y están completamente rodeadas por la fase continua.

**Gel:** estado de una suspensión coloidal en el cual las tensiones de corte por debajo de un cierto valor finito son incapaces de producir deformación permanente. La tensión de corte mínima capaz de producir deformación permanente se conoce como la resistencia del gel en cuestión; también como la resistencia al corte.

**Histéresis:** Falta de sincronía entre dos hechos o fenómenos correlativos.

**Lechada:** Mezcla de cemento, agua y aditivos en estado líquido.

**Lodo:** es el término que más comúnmente se aplica a los fluidos de perforación.

**Mezcla al vuelo:** tipo de preparación de lechada realizada en campo, que consiste en mezclar el cemento y el agua de manera rápida enviándola al pozo, sin ningún tipo de tanque de mezclado.

**Micelas:** agregados de moléculas de surfactante.

**Polímero:** sustancia formada por la unión de dos o más moléculas de la misma clase, ligadas por sus extremos para formar otro compuesto que tiene los mismos elementos en la misma proporción que la sustancia original, pero con un peso molecular más elevado y con diferentes propiedades físicas

**Preflujo:** Fluidos compatibles con el fluido de perforación y con la lechada de cemento. Son bombeados delante de la lechada de cemento y se diseñan para: remover el lodo del espacio anular, dejar limpia la superficie del hoyo y hacer que la zona en donde se va a colocar el cemento, sea compatible con éste.

**Punto Cedente:** El punto cedente es la resistencia que presenta el fluido a circular, la cual es causada por las fuerzas de atracción entre las partículas. Estas fuerzas, se originan del efecto que producen las cargas sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase líquida. Este parámetro depende de la cantidad y tipo de sólido contenido en el fluido.

**Reología:** ciencia que trata de la deformación y el flujo de fluidos.

**Revoque:** material sólido depositado sobre la pared del pozo; es el resultado de la filtración de la parte fluida del lodo hacia la formación.

**Ripios:** sólidos perforados provenientes de la formación.

**Rolar:** consiste en someter a los fluidos de perforación a un proceso de envejecimiento rotativo, utilizando para ello un horno con rodillos giratorios.

**Surfactante:** moléculas con afinidad a dos fases o líquidos no miscibles

**Tixotropía:** capacidad de un fluido para desarrollar resistencia de gel con el tiempo. Propiedad de un fluido que hace que adquiera una estructura de gel rígido o semi-rígido si se deja en reposo, pero que se convierte nuevamente en fluido por agitación mecánica. Este cambio es reversible.

**Viscosidad Plástica:** La viscosidad plástica es la resistencia al flujo, causada por la fricción mecánica de las partículas. La viscosidad es afectada directamente por el porcentaje volumétrico de sólidos en el lodo, es decir, a mayor porcentaje volumétrico de sólidos, mayor será el valor de la viscosidad plástica.

## APÉNDICE

### Apéndice A: Procedimiento detallado de preparación de fluidos y lechadas

#### A.1 Preparación del fluido de perforación A

1. En un vaso metálico limpio pesar la cantidad de agua según la indicada en la tabla 12.
2. Colocar el vaso metálico en el agitador a bajas revoluciones.
3. Añadir gradualmente en el vaso la cantidad de Cloruro de Potasio indicada en la tabla 12, y agitar a bajas revoluciones durante 10 minutos.
4. Añadir a la mezcla anterior el Almidón en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 10 minutos en el segundo nivel de velocidad del agitador.
5. Añadir a la mezcla anterior el Polímero 1 en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 10 minutos en el segundo nivel de velocidad del agitador.
6. Añadir a la mezcla anterior el Bactericida en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 2 minutos en el segundo nivel de velocidad del agitador.
7. Añadir a la mezcla anterior el Polímero 2 en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 10 minutos a altas revoluciones.
8. Añadir a la mezcla anterior el Óxido de magnesio en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 5 a altas revoluciones.
9. Añadir a la mezcla anterior el Aceite mineral en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 10 minutos a altas revoluciones.
10. Añadir a la mezcla anterior el Glycoll en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 10 minutos a altas revoluciones.
11. Añadir a la mezcla anterior el Carbonato de calcio en la cantidad indicada en la tabla 12 y agitar durante 30 minutos a altas revoluciones.

#### A.2 Preparación del fluido de perforación B

1. En un vaso metálico limpio pesar la cantidad de agua según la indicada en la tabla 13.
2. Pesar la cantidad del surfactante indicada en la tabla 13 y agregarlo en el vaso anterior.

3. Colocar el vaso en el agitador a bajas revoluciones durante 5 minutos.
4. Añadir a la mezcla anterior el Almidón en la cantidad indicada en la tabla 13 y agitar durante 10 minutos a bajas revoluciones.
5. Añadir a la mezcla anterior el cloruro de potasio en la cantidad indicada en la tabla 13 y agitar durante 10 minutos a bajas revoluciones.
6. Colocar el agitador a altas revoluciones y agregar a la mezcla anterior de forma gradual el Aceite mineral y el antiespumante en la cantidad indicada en la tabla 13, y agitar durante 10 minutos.
7. Añadir la solución buffer en la cantidad indicada en la tabla 13, y agitar durante 30 minutos a altas revoluciones.

### **A.3 Preparación del fluido de perforación C**

1. El polímero C debe ser predisoluto en el aceite mineral antes de la preparación del fluido. Se disolvieron 35 grs de polímero en 350 cc de aceite mineral, lo que da una relación de 0,1 grs por cada 1 cc de aceite. Además, se agregaron 2 grs de emulsificante 1 y 2 grs de cal hidratada con el fin de mejorar la dispersión del polímero.
2. El orden seguido fue el siguiente: el aceite mineral con el viscosificante 1 fue mezclado en un vaso metálico a altas revoluciones en el agitador durante 10 minutos, luego le fue adicionada la cal hidratado y fue mezclado igualmente durante 10 minutos más. Al pasar el tiempo, a la mezcla anterior le fueron añadidos los 35 grs de polímero C y fue mezclado a altas revoluciones durante 8 horas para que la dispersión fuera eficiente.
3. Para comenzar con la preparación del fluido, se coloca en un vaso metálico la cantidad de aceite mineral presente en la tabla 14.
4. Colocar el vaso en el agitador a bajas revoluciones.
5. Pesar y añadir la cantidad de viscosificante 1 indicada en la tabla 14, y mezclarlo durante 20 minutos en el segundo nivel de velocidad del agitador.
6. Añadir a la mezcla anterior el emulsificante 1 en la cantidad indicada en la tabla 14, y agitarlo durante 20 minutos al mismo nivel de velocidad.

7. Añadir a la mezcla anterior el polímero C predisoluto en la cantidad indicada en la tabla 14 y agitar durante 20 minutos al mismo nivel de velocidad.
8. Añadir a la mezcla anterior la Cal hidratada en la cantidad indicada en la tabla 14 y agitar durante 10 minutos al mismo nivel de velocidad.
9. Añadir a la mezcla anterior el emulsificante 2 en la cantidad indicada en la tabla 14 y agitar durante 10 minutos al mismo nivel de velocidad.
10. Añadir a la mezcla anterior el Carbonato de calcio en la cantidad indicada en la tabla 14 y agitar durante 20 minutos al mismo nivel de velocidad.

#### **A.4 Preparación detallada de lechada formulada a partir del sistema A**

1. Agitar el fluido de perforación A durante 10 minutos a altas revoluciones.
2. En el vaso de la licuadora para la preparación de las lechadas, pesar la cantidad de lodo a utilizar según la cantidad indicada en la tabla 26.
3. Colocar la balanza en cero, y pesar en el mismo vaso de la licuadora con el lodo, la cantidad de agua según la cantidad indicada en la tabla 26.
4. Colocar el vaso en la licuadora y agitar entre 3000 y 4000 rpm durante 2 minutos.
5. Añadir a la mezcla anterior el NaOH según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
6. Añadir a la mezcla anterior el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
7. Añadir a la mezcla anterior el lignito según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
8. Añadir progresivamente a la mezcla anterior la cantidad de escoria según la cantidad indicada en la tabla 26 y cambiar la velocidad de agitación a 12000 rpm durante 35 segundos según lo expresa las especificaciones API RP10B.

#### **A.5 Preparación detallada de lechada formulada a partir del sistema B**

1. Agitar el fluido de perforación B durante 10 minutos a altas revoluciones.
2. En el vaso de la licuadora para la preparación de las lechadas, pesar la cantidad de lodo a utilizar según la cantidad indicada en la tabla 26.

3. Colocar la balanza en cero, y pesar en el mismo vaso de la licuadora con el lodo, la cantidad de agua según la cantidad indicada en la tabla 26.
4. Colocar el vaso en la licuadora y agitar entre 3000 y 4000 rpm durante 2 minutos.
5. Añadir a la mezcla anterior el NaOH según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
6. Añadir a la mezcla anterior el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
7. Añadir progresivamente a la mezcla anterior la cantidad de escoria según la cantidad indicada en la tabla 26 y cambiar la velocidad de agitación a 12000 rpm durante 35 segundos según lo expresa las especificaciones API RP10B.

#### **A.6 Preparación detallada de lechada formulada a partir del sistema C**

1. Agitar el fluido de perforación C durante 10 minutos a altas revoluciones.
2. En el vaso de la licuadora para la preparación de las lechadas, pesar la cantidad de lodo a utilizar según la cantidad indicada en la tabla 26.
3. Añadir al lodo anterior la mezcla de surfactantes según la cantidad indicada en la tabla 26, sin agitación.
4. Colocar el vaso en la licuadora y añadir a la mezcla anterior el agua según la cantidad indicada en la tabla 26, y agitar entre 2000 y 3000 rpm durante 5 minutos.
5. Añadir a la mezcla anterior el NaOH según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
6. Añadir a la mezcla anterior el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> según la cantidad indica en la tabla 26 y agitar durante 1 minuto.
7. Añadir progresivamente a la mezcla anterior la cantidad de escoria según la cantidad indicada en la tabla 26 y cambiar la velocidad de agitación a 12000 rpm durante 35 segundos según lo expresa las especificaciones API RP10B.

## Apéndice B: Hoja de cálculo tipo usada para la formulación de los sistemas de lodo cementante

### LABORATORIO DE CEMENTACION HOJA DE CÁLCULO PARA LODO CEMENTANTE CON ESCORIA

FECHA: 13-Feb-04  
POZO: Laboratorio  
ESCORIA: Blue Circle  
REF: Test # 1

Aditivos por barril de lodo		Densidades	
Agua	294,00 cc	1 gr/cc	
Aceite	28,00 cc	0,82 gr/cc	
Masa densificante	50,00 lbs	2,7 gr/cc	
% de sólidos óptimo		8,00 %	
Fluido de dilución		1,00 gr/cc	
% de sólidos		14,29 %	
Dens. orig. calc.		8,73 lpg	
Dens. debida por dil.		8,56 lpg	

	LPG	G.Esp.	Vol. Ab.
Densidad original	8,73	1,048457	0,1145
Densidad Diluida	8,45	1,014406	0,118343
Fluido dilución	8,33	1	0,120048
Dens.final de lechada	13,50	1,620293	0,07409

Dilución con agua	99,2768	GPB
-------------------	---------	-----

Material	Peso lbs.	Vol.Ab. gals/lb	Volumen gals.
Lodo	366,81	0,1145	42
Agua	826,98	0,120048	99,2768
	1193,79		141,2768

	% Vol.
Lodo	29,73
Agua	70,27

#### Balance de Masa con Aditivos:

Materiales	Peso lbs.	Vol. Abs gals/lb	Volumen gals.
Caustic Soda	2	0,0563	0,1126
Soda Ash	8	0,0443	0,3544
Dispersante	2	0,0922	0,1844
Silica	0	0,0456	0
Escoria	314	0,0409	12,8426
Agua	166,86	0,120048	20,03149
Lodo	74,01	0,1145	8,474512
	566,88		42,00

Densidad=	13,50 lpg
-----------	-----------

Laboratorio:		
Materiales	Gramos/ 350ml	Gramos/ 600ml
Caustic Soda	2	3,42
Soda Ash	8	13,68
Dispersante	2	3,42
Silica	0	0
Escoria	314	536,94
Agua	166,8623	285,3345
Lodo	74,01341	126,5629

Campo:		63 bbls Teórico	65 bbls.Real
Materiales	LPB	Total lbs.Real	Total lbs.Teórico
Caustic Soda	2	130	126
Soda Ash	8	520	506
Dispersante	2	130	126
Silica	0		0
Escoria	314		19857
	GPB	Bbls.	Bbls.
Agua	20,03	31,00	30,16
Lodo	8,47	13,12	12,76

#### Estimación de Volumen de Lechada

Long. Rev. =	2000	Pies
Diam. Hoyo=	8,50	pulg.
Diam. Rev.=	7,00	pulg.
Vol. Anular=	45,17	Bbl
% Exceso=	40	%
Vol.Total=	63,24	Bbl

#### Tipo de Lodo:

Fluido Viscoelástico

#### Leyenda:

- Valor introducido
- Valores calculados

1 Pasos a seguir para utilizar la hoja de cálculo

**Apéndice C: Tablas de los resultados experimentales obtenidos de diferentes ensayos realizados**

**Tabla C. 1:** Pruebas de tiempo de espesamiento realizadas en función de diferentes concentraciones del activador NaOH para la formulación de la lechada a partir del sistema A

	<b>Densidad de lechada = 13,5 lpg 70% de dilución</b>		
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (lb/bbl)</b>	8	<b>8</b>	8
<b>NaOH (lb/bbl)</b>	0,5	<b>2</b>	2,5
<b>Dispersante (lb/bbl)</b>	2	<b>2</b>	2
<b>Tiempo de espesamiento obtenido (horas)</b>	+ 4:40	<b>3:06</b>	2:25
<b>Observaciones</b>	Prueba detenida por pasar el tiempo requerido	<b>Cumplió con el tiempo requerido</b>	Menor al tiempo requerido

**Tabla C.2:** Pruebas de tiempo de espesamiento en función de diferentes concentraciones del activador NaOH para la formulación de la lechada a partir del sistema B

	<b>Densidad de lechada = 11,5 lpg 20 % de dilución con agua</b>		
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (lb/bbl)</b>	<b>8</b>	8	8
<b>NaOH (lb/bbl)</b>	<b>1</b>	2	4
<b>Tiempo de espesamiento obtenido (horas)</b>	<b>03:06</b>	02:38	01:24
<b>Observaciones</b>	<b>Tiempo requerido</b>	Menor al tiempo requerido	Menor al tiempo requerido

**Tabla C.3:** Pruebas de tiempo de espesamiento en función de diferentes concentraciones del activador NaOH para la formulación de la lechada a partir del sistema C

	<b>Densidad de lechada = 12,5 lpg 73 % de dilución con agua</b>		
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (lb/bbl)</b>	10	10	<b>10</b>
<b>NaOH (lb/bbl)</b>	2	3	<b>4</b>
<b>Tiempo de espesamiento obtenido (horas)</b>	05:45	04:37	<b>03:48</b>
<b>Observaciones</b>	Mayor al tiempo requerido	Mayor al tiempo requerido	<b>Tiempo requerido</b>

**Tabla C.4:** Lecturas reológicas en orden ascendente y descendente obtenidas a 80°F de la lechada formulada a partir del fluido A

<b>RPM del viscosímetro</b>	<b>Lecturas del Viscosímetro a 80°F</b>			
	12,5 lpg		13,5 lpg	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
1	4	4	8	9
2	4	5	11	11
3	5	5	12	12
6	6	6	14	13
10	7	6	15	14
20	8	7	18	16
30	9	8	21	18
60	11	10	26	24
100	14	14	32	31
200	21	20	46	46
300	28	28	60	60

**Tabla C.5:** Lecturas reológicas en orden ascendente y descendente obtenidas a 138°F de la lechada formulada a partir del fluido A

RPM del viscosímetro	Lecturas del Viscosímetro a 138°F			
	12,5 lpg		13,5 lpg	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
1	10	9	15	11
2	11	10	16	12
3	12	11	17	14
6	16	14	21	17
10	19	17	25	20
20	22	19	34	25
30	24	21	37	28
60	28	25	46	36
100	31	30	55	45
200	37	38	72	62
300	46	46	79	79

**Tabla C.6:** Lecturas reológicas en orden ascendente y descendente obtenidas a 80°F de la lechada formulada a partir del fluido B

RPM del viscosímetro	Lecturas del Viscosímetro a 80°F			
	12,5 lpg		13,5 lpg	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
1	13	14	24	24
2	15	16	29	28
3	17	17	32	31
6	20	20	40	37
10	23	23	46	43
20	29	28	58	55
30	33	33	67	64
60	44	43	90	85
100	56	56	115	110
200	83	82	168	163
300	107	107	212	212

**Tabla C.7:** Lecturas reológicas en orden ascendente y descendente obtenidas a 138°F de la lechada formulada a partir del fluido B

RPM del viscosímetro	Lecturas del Viscosímetro a 138°F			
	12,5 lpg		13,5 lpg	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
1	11	11	18	20
2	13	13	22	24
3	14	14	25	27
6	17	16	31	32
10	20	19	38	38
20	24	24	49	48
30	28	28	58	56
60	38	37	80	75
100	48	47	103	97
200	71	70	151	144
300	91	91	185	185

**Tabla C.8:** Lecturas reológicas en orden ascendente y descendente obtenidas a 80°F de la lechada formulada a partir del fluido C

RPM del viscosímetro	Lecturas del Viscosímetro a 80°F			
	12,5 lpg		13,5 lpg	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
1	17	16	26	29
2	19	20	34	42
3	20	20	44	55
6	22	21	52	61
10	23	24	57	65
20	25	26	65	72
30	27	27	73	79
60	32	33	88	94
100	37	38	109	110
200	48	49	144	144
300	58	58	171	171

**Tabla C.9:** Lecturas reológicas en orden ascendente y descendente obtenidas a 138°F de la lechada formulada a partir del fluido C

RPM del viscosímetro	Lecturas del Viscosímetro a 138°F	
	12,5 lpg	
	Ascendente	Descendente
1	9	6
2	9	8
3	9	8
6	11	11
10	14	14
20	24	19
30	30	21
60	41	27
100	52	33
200	56	48
300	67	67

**Tabla C.10:** Resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema A

Relación de activadores Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /NaOH (lb/bbl)	Densidad de la lechada (lpg)	Resistencia a la compresión (lpc)			Resistencia a la compresión promedio (lpc)
		Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3	
8/2	12,5	583	599	577	586
10/2	12,5	576	592	605	591
6/2	13,5	596	526	580	567
8/2	13,5	972	935	915	941
9/2	13,5	966	973	980	973
10/2	13,5	939	1073	950	987

**Tabla C.11:** Resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema B

Relación de activadores $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaOH}$ (lb/bbl)	Densidad de la lechada (lpg)	Resistencia a la compresión (lpc)			Resistencia a la compresión promedio (lpc)
		Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3	
6/1	11,5	213	249	225	229
8/1	11,5	283	266	255	268
9/1	11,5	264	255	261	260
10/1	11,5	258	257	278	264
8/1	12,5	405	442	383	410
10/1	12,5	595	570	578	581

**Tabla C.12:** Resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión convencional en función de la concentración del activador  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , para lechadas de distintas densidades formuladas a partir del sistema C

Relación de activadores $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaOH}$ (lb/bbl)	Densidad de la lechada (lpg)	Resistencia a la compresión (lpc)			Resistencia a la compresión promedio (lpc)
		Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3	
8/4	12,5	590	602	585	592
10/4	12,5	594	654	612	620
8/4	13,5	645	630	635	637
10/4	13,5	866	850	895	877

**Tabla C.13:** Resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión convencional para lechadas de distintas densidades formuladas con cemento Portland clase H + 5% bentonita

Densidad de la lechada (lpg)	Resistencia a la compresión (lpc)			Resistencia a la compresión promedio (lpc)
	Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3	
11,5	175	138	142	152
12,5	343	325	310	326
13,5	625	672	633	643

**Tabla C.14:** Resultados de las pruebas de sedimentación para la lechada formulada a partir del fluido A

**Muestra 1**

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B1	40,81	27,21	1,500	12,493
M1	39,49	26,9	1,468	12,229
T1	38,88	26,63	1,460	12,162

**Muestra 2**

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B2	38,85	25,94	1,498	12,476
M2	38,97	26,31	1,481	12,338
T2	28,44	19,4	1,466	12,212

**Muestra 3**

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B3	42,01	25,8	1,628	13,564
M3	46,33	28,51	1,625	13,537
T3	46,14	28,56	1,616	13,458

#### Muestra 4

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B4	41,91	26,17	1,601	13,340
M4	41,22	25,83	1,596	13,293
T4	42,44	26,74	1,587	13,221

#### Muestra 5

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B5	44,66	27,72	1,611	13,421
M5	43,49	27,04	1,608	13,398
T5	43,66	27,24	1,603	13,351

**Tabla C.15:** Resultados de las pruebas de sedimentación para la lechada formulada a partir del fluido B

#### Muestra 1

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B1	36,65	24,73	1,482	12,345
M1	39,69	26,85	1,478	12,314
T1	33,13	22,39	1,480	12,326

#### Muestra 2

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B2	40,62	27,41	1,482	12,345
M2	39,96	27,06	1,477	12,301
T2	39,88	27,13	1,470	12,245

#### Muestra 3

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B3	34,2	25,27	1,353	11,274
M3	36,85	27,18	1,356	11,294
T3	36,87	27,24	1,354	11,275

#### Muestra 4

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B4	35,17	26,05	1,350	11,246
M4	36,01	26,62	1,353	11,268
T4	36,15	26,75	1,351	11,257

#### Muestra 5

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B5	38,14	27,71	1,376	11,465
M5	38,16	28,19	1,354	11,276
T5	37,43	28,2	1,327	11,056

**Tabla C.16:** Resultados de las pruebas de sedimentación para la lechada formulada a partir del fluido C

#### Muestra 1

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B1	43,75	27,13	1,613	13,433
M1	43,73	27,14	1,611	13,422
T1	43,86	27,22	1,611	13,422

#### Muestra 2

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B2	42,88	26,52	1,617	13,469
M2	40,57	25,18	1,611	13,421
T2	30,84	19,13	1,612	13,429

#### Muestra 3

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B3	42,87	26,59	1,612	13,430
M3	33,12	20,58	1,609	13,406
T3	35,05	21,74	1,612	13,430

#### Muestra 4

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B4	39,4	26,39	1,493	12,437
M4	39,43	26,47	1,490	12,408
T4	39,7	26,77	1,483	12,353

#### Muestra 5

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B5	40,47	27,06	1,496	12,458
M5	42,2	28,31	1,491	12,417
T5	41,96	28,23	1,486	12,381

#### Muestra 6

	Masa	Volumen	Densidad	
			gr/cc	lpg
B6	39,05	26,12	1,495	12,454
M6	30,45	20,38	1,494	12,446
T6	39,56	26,54	1,491	12,417

**Tabla C.17:** Resultados de las pruebas de filtrado API para los sistemas de lechadas estudiados

<b>Formulación</b>	<b>Pérdida de filtrado API</b>		<b>Pérdida de filtrado contrarevoque</b>	
	<b>t (seg)</b>	<b>Filtrado (cc)</b>	<b>t (seg)</b>	<b>Filtrado (cc)</b>
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	39	82	1800	5
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	22	71	1800	6
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	87	65	441	68
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	103	78	408	75
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	154	112	87	89
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	110	98	116	92

**Tabla C.18:** Resultados de las pruebas de resistencia a la tensión realizadas a los sistemas de lechadas estudiados

<b>Formulación</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Fuerza máxima (kN)</b>	<b>Resistencia a la tensión (lpc)</b>
Cemento H + 5% bentonita @ 11,5 lpg	26,04	24,67	0,31	44,55
Cemento H + 5% bentonita @ 12,5 lpg	25,41	24,87	0,54	79,51
	25,38	26,28	0,63	87,73
Cemento H + 5% bentonita @ 13,5 lpg	25,15	27,11	1,14	153,69
	25,11	25,88	1,30	184,53
	25,14	26,27	1,25	174,59
Lodo cementante A @ 12,5 lpg	25,50	15,75	0,82	188,34
	24,85	16,70	0,82	182,27
Lodo cementante A @ 13,5 lpg	25,70	17,75	1,18	238,61
Lodo cementante B @ 11,5 lpg	25,77	13,73	0,31	80,82
	25,80	14,25	0,30	75,27
Lodo cementante B @ 12,5 lpg	25,47	12,90	0,45	126,34
	25,90	15,11	0,61	143,78
Lodo cementante C @ 12,5 lpg	25,46	20,15	0,65	116,87
	25,95	24,34	0,58	84,70
Lodo cementante C @ 13,5 lpg	25,72	20,12	0,95	169,34

**Tabla C.19:** Resultados de las pruebas de flexión realizadas a la lechada formulada a partir del sistema A para densidades de 12,5 y 13,5 lpg.

Muestras	Medidas (pulgadas)			Carga (Tnf)	Carga máxima de ruptura (lpc)
	Altura	Largo	Ancho		
1a	1,4365	6,307	1,5865	0,025	145,67
2a	1,441	6,308	1,5726	0,030	175,22
3a	1,4325	6,307	1,5829	0,025	146,79
1b	1,4645	6,308	1,5890	0,045	251,87
2b	1,5025	6,308	1,5815	0,035	187,00
3b	1,4705	6,308	1,5725	0,040	224,36

Subíndice “a” significa muestras diseñadas a 12,5 lpg

Subíndice “b” significa muestras diseñadas a 13,5 lpg

**Tabla C.20:** Resultados de las pruebas de flexión realizadas a la lechada formulada a partir del sistema B para densidades de 11,5 y 12,5 lpg.

Muestras	Medidas (pulgadas)			Carga (Tnf)	Carga máxima de ruptura (lpc)
	Altura	Largo	Ancho		
1a	1,5950	6,308	1,5810	0,020	94,85
2a	1,4275	6,308	1,5820	0,025	147,93
3a	1,5770	6,307	1,5890	0,025	120,66
1b	1,5728	6,308	1,5920	0,030	145,31
2b	1,5880	6,308	1,5845	0,035	171,38
3b	1,5655	6,306	1,5870	0,040	196,08

Subíndice “a” significa muestras diseñadas a 11,5 lpg

Subíndice “b” significa muestras diseñadas a 12,5 lpg

**Tabla C.21:** Resultados de las pruebas de flexión realizadas a la lechada formulada a partir del sistema C para una densidad de 12,5 lpg.

Muestras	Medidas (pulgadas)			Carga (Tnf)	Carga máxima de ruptura (lpc)
	Altura	Largo	Ancho		
1a	1,5285	6,308	1,5725	0,060	311,53
2a	1,5230	6,308	1,5880	0,060	310,63
3a	1,5325	6,308	1,5730	0,055	283,99
1b	1,440	6,308	1,5795	0,040	232,96
2b	1,502	6,307	1,5880	0,045	239,60
3b	1,5415	6,308	1,5730	0,060	306,20

Subíndice “a” significa muestras diseñadas a 12,5 lpg

Subíndice “b” significa muestras diseñadas a 13,5 lpg

#### Apéndice D: Cálculos tipo

**D. 1** Valores de viscosidad plástica y punto cedente calculados a partir de las lecturas reológicas obtenidas a 120°F para el fluido A después de ser envejecido a 150°F y 150lpc (ver datos de Tabla 16)

$$\mu_p = L_{600} - L_{300} = 54 - 43 = 11 \text{ cps} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\tau_o = L_{300} - \mu_p = 43 - 11 = 32 \text{ lbf} / 100 \text{ pie}^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

**D.2** Contenido de sólidos teórico y calculado para el fluido A después de ser envejecido a 150°F y 150lpc (ver datos de Tabla 20)

$$\% \text{sólidos calculado (m/v)} = \frac{(Plodo - Pfilt)}{Plodo} \times 100 = \frac{(46,0 - 39,7)}{46,0} \times 100 = 13,7\% \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\%sólidos\ teóric(m/v) = \frac{Psólidos}{350} \times 100 = \frac{50}{350} \times 100 = 14,28\% \quad (\text{Ec. 7})$$

**D.3** Cálculo de la pérdida de filtrado a los 30 minutos para el lodo cementante A @ 12,5 lpg, a través del método API (ver datos de tabla C.16)

$$Pérdida\ de\ filtrado\ API\ calculada = \frac{2Qt\ 5,477}{\sqrt{t}} = \frac{2(82)5,477}{\sqrt{\frac{39}{60}}} = 1120\ cc \quad (\text{Ec. 8})$$

**D.4** Cálculo de resistencia a la tensión realizada a la lechada formulada a partir del sistema A para una densidad de 13,5 lpg (ver datos de tabla C.17)

$$To = 92245,44 \frac{F\ máx}{D \times L} = 92245,44 \left( \frac{1,18}{25,70 \times 17,75} \right) = 239\ lpc \quad (\text{Ec. 9})$$

**D.5** Cálculo de resistencia a la flexión realizada a la lechada formulada a partir del sistema A para una densidad de 13,5 lpg (ver datos de Tabla C.19 para muestra 1b)

$$\sigma_f = \frac{3 \times P \times l}{2bd^2} \times (2016) = \frac{3 \times (0,045)(6,308)}{2(1,58990)(1,4645)^2} \times (2016) = 251,87\ lpc \quad (\text{Ec. 10})$$

**D.6** Cálculo del porcentaje de expansión de la lechada formulada a partir del sistema A para una densidad de 13,5 lpg, para la 1° celda a las 24 horas de tiempo de curado (ver datos de Tabla 44)

$$\% \text{ expansión} = (Mt - Mi) \times 10,95 = (0,4066 - 0,3512) \times 10,95 = 0,607\% \quad (\text{Ec. 11})$$