

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES PARA POZOS DE PETRÓLEO Y/O GAS CON PROPIEDADES ANTIMIGRATORIAS DE GAS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de Ingeniero Químico
Por la Br. Márquez F., Geilhy Z.

Caracas, Octubre 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES PARA POZOS DE PETRÓLEO Y/O GAS CON PROPIEDADES ANTIMIGRATORIAS DE GAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Luis Norberto Bueno

TUTOR INDUSTRIAL: Dr. Rafael Bolívar

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de Ingeniero Químico
Por la Br. Márquez F., Geilhy Z

Caracas, Octubre 2002

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Geilhy Márquez, titulado:

“EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES PARA POZOS DE PETRÓLEO Y/O GAS CON PROPIEDADES ANTIMIGRATORIAS DE GAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Acordado y firmado a los veinticinco días del mes de Octubre de dos mil dos.

Prof. José Sorrentino

Jurado

Prof. Mary Luz Alonso

Jurado

Prof. Luis Norberto Bueno

Tutor

Dr. Rafael Bolívar

Tutor

*A mis padres y hermanas que
siempre me acompañaron en
éste largo camino.*

AGRADECIMIENTOS

Antes que todo, quiero hacer un agradecimiento general en el cual están presentes, aunque no menciono sus nombres, todas las personas que estuvieron conmigo (algunas pasajeras y otras permanentes) durante toda mi carrera. Me refiero a mis amigos de los primeros semestres, que me hicieron más fácil el proceso de adaptación en la universidad, a mis amigos de siempre, a mis profesores, preparadores, técnicos, a mi familia por supuesto, a mi novio y a todas las personas que me ayudaron cuando más los necesitaba. Ellos saben quienes son y espero que nadie se sienta excluido de mi lista, porque todas sus caras y todos sus nombres están grabados en mi memoria.

Ahora si quisiera hacer algunos agradecimientos especiales a las personas que estuvieron conmigo durante la realización de éste trabajo, los voy a mencionar siguiendo un orden que me parece justo, pero que no hace a nadie ni más ni menos importante para mí:

A Dios, porque me dio la vida y me ha acompañado siempre, en las buenas y en las malas. Además me permitió conocer a muchas personas maravillosas, las cuales tengo el honor de colocar en mi lista.

A la mejor madre del mundo (Inés), le agradezco todo lo que ha hecho por mí, no me alcanzaría el papel para nombrar cada una de esas cosas, así que sólo puedo decirte que te Adoro!. Al igual que a mis hermanas, Getsy y Greisy que siempre han sido más que mis hermanas mis compañeras y amigas en todo este camino que hemos recorrido y que aún nos falta por recorrer, espero que continúen acompañándome. Igualmente agradezco a mi papá (José) por darme la vida y ayudarme a estar en ella.

A mi novio, por ser la persona que es y por apoyarme en cada momento de mi vida; porque más que mi novio es mi mejor amigo.

A las personas que hicieron posible que se presentara la investigación, participando tanto en la programación, ejecución, corrección, aporte de ideas, apoyo técnico, consejo y cualquier aporte valioso para la culminación de la misma. Dr. Rafael Bolívar, Urbano Medina, Norberto Bueno, Carmen Ramírez, Miriam Davalillo, Williams Aular, Christian Cadenas, César Serrano, Richard Muñoz, Jairo Marín, Eudes, Alicia Colina, Heriberto Sánchez, Franca Gambino, Vicente Ciccola, Juan Soto.

A mis amigos de siempre, porque nunca me han fallado y han estado presentes en los momentos más importante de mi vida. Gracias por ser unos verdaderos amigos y brindarme tanto su apoyo espiritual, económico, material, por permitirme quedarme en sus casas, por estar pendientes de mí y sobre todo por ser como son, los quiero y los admiro de todo corazón. Gonzalo, Mari, Yoli, Isabel, Armando, Bárbara, Gustavo, Javier, Thanne, Nelson(Primo).

A las personas que igualmente tienen un lugar en mi corazón, porque de una u otra forma hicieron que pasara momentos agradables y valiosos en mi vida de estudiante. Luis, María, Miguel, Humberto, José Daniel, Desireé, Juan, Bruno, Eduardo.

A mis dos nuevos amigos Urbano Medina y Mersha Campos. Señor Urbano con su sabiduría, entrega y paciencia hizo que cada día fuera más valioso para mí; estoy segura que sin su apoyo y todo la ayuda que me brindó no hubiese sido posible lograr mis metas. Mersha, gracias por estar siempre conmigo, por todas las cosas que pasamos juntas y por ser una persona especial, te aprecio mucho!.

Márquez F., Geilhy Z.

EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTANTES PARA POZOS DE PETRÓLEO Y/O GAS CON PROPIEDADES ANTIMIGRATORIAS DE GAS

Tutor académico: Prof. Luis Norberto Bueno. Tutor industrial: Dr. Rafael Bolívar. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2002, 117 p.

Palabras Claves: Cementación, Migración de gas, Formación, Fuerza de gel estática, Pérdida de fluido.

Resumen. Una de las etapas fundamentales en la construcción de pozos petroleros es la cementación, con la cual se pretende lograr el aislamiento zonal. Sin embargo, estudios recientes han revelado que un tercio de las fallas originadas en la cementación corresponden a la migración de gas presente en la formación. La misma consiste en la invasión de gas presente en la formación dentro del anular cementado, en el cual el gas puede viajar hacia zonas de más baja presión o hacia la superficie. Debido a la magnitud del problema, se han estudiado diversas propiedades del cemento como pérdida de fluido, permeabilidad, fuerza de gel estática, entre otras, a fin de establecer cómo afectan en la migración de gas. Sin embargo, no existe ninguna metodología que indique cuáles propiedades de la lechada de cemento deben evaluarse y controlarse para prevenir la migración de gas. El presente trabajo ofrece una relación entre el desarrollo de la fuerza de gel estática y el control de la migración de gas. Se presenta la relación para las lechadas de cemento con aditivos antimigratorios, estireno-butadieno y poliacrilamida sulfonada, y lechadas de cemento sin propiedades antimigratorias, evidenciando el hecho que la fuerza de gel estática es una de las principales propiedades involucradas en el control de la migración

de gas. Para ello se evaluaron las propiedades de las lechadas de cemento establecidas por el API, el desarrollo de la fuerza de gel estática, empleando el MiniMACS así como una metodología alternativa (viscosímetro rotacional) debido a problemas con el mismo. Posteriormente se evaluó el control de migración de gas, empleando la celda de migración de fluido (FMA). En el estudio de la fuerza de gel estática se consideraron dos aspectos muy importantes, tales como el tiempo de cero gel y el tiempo de transición. Se evidenció la importancia del tiempo de transición, obteniéndose que para lechadas de cemento antimigratorias éste tiempo no debe ser mayor de 90 minutos. Así mismo, se observó que propiedades como pérdida de fluido, tiempo de espesamiento y permeabilidad no presentaron relación con el control de la migración de gas, a las condiciones a las cuales se sometieron las pruebas. En conclusión, se enfatiza en la necesidad de estudiar el desarrollo de los geles del cemento a través de otras técnicas, a fin de establecer una metodología para evidenciar propiedades antimigratorias en lechadas de cemento.

INDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VIII
NOMENCLATURA	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. OBJETIVOS	5
3.1 General	5
3.2 Específicos	5
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 Proceso de perforación.	6
4.1.1 Equipos empleados en la perforación.	8
4.1.2 Fluido de perforación.	10
4.1.2.1 Funciones del fluido de perforación.	10
4.1.2.2 Reología.	11
4.2 Proceso de cementación de pozos petroleros.	15
4.2.1 Composición del cemento Pórtland.	15
4.2.2 Clases y tipos de cemento.	16
4.2.3 Resistencia del cemento a los sulfatos.	17
4.2.4 Retrogresión y uso de harina de sílice.	18
4.2.5 Propiedades de la lechada de cemento.	19

4.2.5.1	Tiempo de espesamiento.	19
4.2.5.2	Densidad de la lechada de cemento.	19
4.2.5.3	Resistencia a la compresión.	20
4.2.5.4	Permeabilidad.	20
4.2.5.5	Reología.	20
4.2.5.6	Pérdida de fluido.	20
4.2.5.7	Agua libre.	20
4.2.6	Clasificación del proceso de cementación.	21
4.2.6.1	Cementación primaria.	21
4.2.6.1.1	Métodos de cementación de pozos.	21
4.2.6.1.2	Fallas en la cementación primaria.	24
4.2.6.2	Cementación secundaria.	28
4.2.6.2.1	Objetivos de la cementación secundaria.	28
4.2.7	Tapones de cemento.	29
4.2.8	Aditivos del cemento.	30
4.3	Problema de migración de gas en cementación de pozos de petróleo y/o gas.	34
4.3.1	Posibles rutas de migración de gas.	35
4.3.2	Factores que controlan la entrada del gas presente en la formación al anular cementado.	36
4.3.2.1	La pérdida de fluido del cemento a la formación adyacente.	36
4.3.2.2	Las pérdidas de volumen durante las reacciones de hidratación del cemento.	37
4.3.2.3	Modificación de la permeabilidad del cemento.	39
4.3.2.4	El desarrollo de la fuerza de gel estática dentro de la lechada de cemento.	40
4.3.3	Control del fenómeno de migración de gas.	42
4.3.4	Consecuencias que origina la migración de gas.	48
4.4	Antecedentes.	48

5. PARTE EXPERIMENTAL	54
5.1 Descripción de materiales y equipos.	54
5.1.1 Equipos.	54
5.2 Procedimiento experimental.	59
5.2.1 Preparación de las lechadas de cemento.	59
5.2.2 Condiciones a las que se evaluaron los distintos sistemas.	63
5.2.3 Caracterización de las lechadas de cemento según especificaciones API.	65
5.2.4 Pruebas para evaluar la fuerza de gel estática a las lechadas de cemento.	67
5.2.5 Pruebas para evaluar el control de la migración de gas a las lechadas de cemento.	70
 6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	 71
6.1 Caracterización de las lechadas de cemento.	71
6.1.1 Reología de las lechadas de cemento evaluadas.	71
6.1.2 Pérdida de filtrado de las lechadas de cemento evaluadas.	74
6.1.3 Tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento	74
6.1.4 Agua libre de las lechadas de cemento evaluadas.	78
6.1.5 Resistencia a la compresión de los sistemas de cemento evaluados.	78
6.1.6 Sedimentación de los sistemas de cemento evaluados.	79
6.1.7 Permeabilidad de los sistemas de cemento evaluados.	80
6.2 Evaluación de la fuerza de gel estática a las lechadas de cemento estudiadas.	80
6.3 Evaluación del control de la migración de gas a las lechadas de cemento estudiadas.	89

7. CONCLUSIONES	100
8. RECOMENDACIONES	102
9. BIBLIOGRAFÍA	103
10. APÉNDICES	106
11. GLOSARIO	117

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de un pozo petrolero.	7
Figura 2. Taladro de perforación rotatoria.	9
Figura 3. Comportamiento de los distintos modelos reológicos.	14
Figura 4. Cementación en una sola etapa.	22
Figura 5. Cementación en dos etapas.	23
Figura 6. Proceso de desplazamiento del lodo de perforación.	24
Figura 7. Tipos de movimiento de tubería.	25
Figura 8. Régimenes de flujo.	26
Figura 9. Dos escenarios que muestran gas en el anular cementado.	34
Figura 10. Posibles rutas de migración de gas.	35
Figura 11. Pérdida de presión hidrostática debido a la pérdida de volumen.	37
Figura 12. Representación del gel del cemento.	40
Figura 14. Condiciones del pozo.	64

Figura 15. Comportamiento reológico de las lechadas de cemento evaluadas.	73
Figura 16. Tiempo de espesamiento para el sistema A.	76
Figura 17. Tiempo de espesamiento para el blanco del sistema A.	77
Figura 18. Tiempo de espesamiento para el sistema B.	77
Figura 19. Tiempo de espesamiento para el blanco del sistema B.	78
Figura 20. Comportamiento del desarrollo de la fuerza de gel estática del sistema A.	82
Figura 21. Comportamiento del desarrollo de la fuerza de gel estática del sistema B.	83
Figura 22. Desarrollo de la fuerza de gel estática de los sistemas A y B.	84
Figura 23. Esfuerzo de corte para los sistemas A y B.	86
Figura 24. Esfuerzo de corte para los blancos de los sistemas A y B.	89
Figura 25. Caída de presión hidrostática para el sistema A.	92
Figura 26. Pérdida de fluido y migración de gas para el sistema A.	93
Figura 27. Caída de presión hidrostática para el sistema B.	93
Figura 28. Pérdida de fluido y migración de gas para el sistema B.	94

Figura 29. Caída de presión hidrostática para el blanco del sistema A.	95
Figura 30. Pérdida de fluido y migración de gas para el blanco del sistema A.	95
Figura 31. Caída de presión hidrostática para el blanco del sistema B.	96
Figura 32. Pérdida de fluido y migración de gas para el blanco del sistema B.	96
Figura 33. Pérdida de filtrado puede conducir a migración de gas.	98

INDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Requerimientos químicos para el cemento Portland.	16
Tabla 2. Sistema A para la lechada de cemento con propiedades antimigratorias	61
Tabla 3. Blanco del sistema A para la lechada de cemento sin propiedades antimigratorias.	61
Tabla 4. Sistema B para la lechada de cemento con propiedades antimigratorias.	62
Tabla 5. Blanco del sistema A para la lechada de cemento sin propiedades antimigratorias.	62
Tabla 6. Reología de las lechadas de cemento.	72
Tabla 7. Ajuste de los datos reológicos de las lechadas de cemento.	73
Tabla 8. Pérdida de filtrado de las lechadas de cemento.	74
Tabla 9. Consistencia de las lechadas de cemento evaluadas.	75
Tabla 10. Tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento evaluadas.	76
Tabla 11. Resistencia a la compresión de los sistemas evaluados.	79
Tabla 13. Desarrollo de la fuerza de gel estática de los sistemas A y B @ 250°F.	81

Tabla 14. Esfuerzo de corte para los sistemas A y B @ 1rpm. 85

Tabla 15. Esfuerzo de corte para los blancos de los sistemas A y B @ 87 1rpm.

Tabla 16. Valores de presión hidrostática y caída de presión para el 90 sistema A.

Tabla 17. Valores de presión hidrostática y caída de presión para el 91 sistema B.

NOMENCLATURA

API	Instituto Americano de Petr3leo (American Petroleum Institute).
Bc	Unidades Bearden de Consistencia.
BHCT	Temperatura circulante de pozo. [T]
BHST	Temperatura est1tica de pozo. [T]
BTU	Unidades de Energ1a. [M.L ² / t ²]
C	Factor de compresibilidad para la lechada de cemento utilizada.
D	Di1metro del hoyo. [L]
D	Di1metro de la tuber1a. [L]
dv/dL	Tasa de corte. [t ⁻¹]
Δp	Ca1da de presi3n debido a la p3rdida de volumen de la lechada de cemento. [M/L.t ²]
FMA	Analizador de migraci3n de fluido (Fluid Migration Analyser).
GFP	Flujo Potencial de Gas. [Adim.]
HTHP	Alta Temperatura y Alta Presi3n.
K	Indice de consistencia del fluido. [M/L.T]
L _c	Longitud de la columna de lechada de cemento. [L]
L _m	Longitud de la columna de lodo. [L]
MD	Milidarcy. [M.L/t ²]
MiniMAC	Sistema Minim3ltiple Analizador de Cemento (Minim3ltiple Analysis Cement Sistem)
S	
MMUS\$	Millones de d3lares americanos.
N	Indice de comportamiento del flujo. [Adim.]
NA	No aplica.
NR	No se recomienda.
P _{ci}	Presi3n hidrost1tica inicial contra una zona cementada. [M/L.t ²]
P _{ct}	Presi3n hidrost1tica inicial contra una zona cementada a un tiempo dado. [M/L.t ²]
P _{dt}	Diferencial de presi3n dentro de una zona cementada a un tiempo dado. [M/L.t ²]
P _{fondo}	Presi3n en el fondo de la celda. [M/L.t ²]
P _m	Presi3n hidrost1tica ejercida por el lodo. [M/L.t ²]
P _{OB}	Presi3n de sobrebalance inicial contra una zona de gas. [M/L.t ²]
P _r	Reducci3n de presi3n debido a la fuerza de gel est1tica. [M/L.t ²]

$P_{R,MAX}$	Máxima presión posible para evitar migración de gas. [M/L.t ²]
P_{tope}	Presión en el tope de la celda para simular la caída de presión en el pozo. [M/L.t ²]
PVA	Polivinil acetato
R.C.	Resistencia a la compresión. [M/L.t ²]
Rpm	Revoluciones por minuto. [t ⁻¹]
R_1	Radio del cilindro externo del viscosímetro rotacional. [L]
R_2	Radio del cilindro interno del viscosímetro rotacional. [L]
SBR	Estireno-butadieno.
SGS	Fuerza de Gel Estática. [M/L.t ²]
Spec.10B	Especificaciones de la norma API referente a la caracterización de las lechadas de cemento.
TF	Toneladas fuerza. [M.L/t ²]
$-V_{FL}$	Reducción de volumen unitario producido por la pérdida de fluido durante el tiempo de transición. [L ³ /L ² .t]
$-V_H$	Reducción de volumen unitario producido por la reacción de hidratación durante el tiempo de transición. [L ³ /L ² .t]
γ	Tasa de corte. [t ⁻¹]
μ	Viscosidad. [M/L.t]
μ_p	Viscosidad plástica. [M/L.t]
ρ_c	Densidad de la lechada de cemento. [M/L ³]
ρ_m	Densidad del lodo. [M/L ³]
τ	Esfuerzo de corte. [M/L.t ²]
τ_0	Punto cedente. [M/L.t ²]

1. INTRODUCCION

La migración de gas es un problema ampliamente conocido en la industria petrolera. El mismo fue identificado a partir de 1960 cuando se comenzaron a perforar pozos con mayor profundidad en donde existían mayores reservorios de gas, y desde entonces se han realizado valiosos esfuerzos para combatir dicho problema.

La migración de gas puede ocurrir durante el proceso de perforación o de completación de pozos. Sin embargo, en general se puede decir que la misma consiste en la invasión de gas presente en la formación dentro del anular cementado, en el cual el gas puede migrar hacia zonas de más baja presión o hacia la superficie.

Las consecuencias de la migración de gas son numerosas y lamentablemente éstas no se pueden detectar inmediatamente. Una de la más desastrosa es cuando la presión del gas o el flujo de gas son tan grandes que llegan a la superficie, causando generalmente la pérdida total del pozo. Estudios recientes han revelado que las fallas de la Tecnología de Cementación representan 470MMUS\$ anuales para la industria petrolera mundialmente. Se considera que un tercio de estas fallas son atribuibles a problemas de migración de gas[1].

Debido a la dificultad que existe para detectar el problema inmediatamente y más aún para corregirlo, se han desarrollado numerosas técnicas especializadas de cementación y sistemas de cemento con la finalidad de prevenirlo. Todos estos sistemas han tenido cierto grado de éxito, pero ninguno ha sido completamente exitoso. La teoría de cómo el cemento pierde su presión hidrostática es una de las más aceptada por la industria. Sin embargo las teorías sobre el gel del cemento, la influencia de la permeabilidad, y la pérdida de fluido del cemento son todavía puntos de discusión, siendo la fuerza de gel estática una de las propiedades de la lechada de cemento que más se ha intentado definir y evaluar. Pero debido a la

dificultad que existe para medirla aún se siguen realizando estudios para especificarla mejor, ya que se tiene la certeza que está vinculada directamente con la pérdida de presión que ocurre en el cemento y por ende con el problema de migración de gas.

Cuando la lechada de cemento permanece un tiempo estática, las fuerzas iónicas crean una estructura terciaria débil que progresivamente se hace más fuerte. Esto es debido al proceso de hidratación del cemento. Esta estructura se manifiesta como gelación de la lechada de cemento y es cuantificada en términos de fuerza de gel estática. Este fenómeno conlleva a la adición de la lechada de cemento a la superficie del hoyo y causa que la columna de cemento pierda presión hidrostática. Esta gelación continúa hasta que el cemento se transforma en un sólido [2].

Debido a las razones antes mencionadas es que en la presente investigación se estudiará cómo el desarrollo de los geles y las propiedades (densidad, pérdida de fluido, permeabilidad, reología) en el cemento están relacionados con el control de la migración de gas de interés para la cementación de pozos profundos, a altas temperaturas y presión.

Para ello se estudiarán lechadas de cemento empleadas convencionalmente en lograr el aislamiento zonal de pozos productores de petróleo y/o gas, basándose en: sus propiedades, el desarrollo de fuerza de gel estática y el control de la migración de gas. Para la evaluación de las propiedades del cemento se emplearán los equipos estipulados por las Normas API [3]. Mientras que para la evaluación del desarrollo de la fuerza de gel estática y el control de la migración de gas se emplearán el Sistema Minimúltiple Analizador de Cemento (MiniMACS, por sus siglas en inglés) y el Analizador de migración de fluido (FMA, por sus siglas en inglés) respectivamente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de cementación como etapa fundamental en la construcción de un pozo pretende lograr el aislamiento zonal con la colocación de una lechada de cemento entre el revestidor y la formación, la cual sirve como sello entre estos. El desarrollo insuficiente de este sello en el anular del pozo aumenta la vulnerabilidad del trabajo de completación, presentándose como consecuencia problemas durante la vida útil del mismo.

Entre estos problemas se presenta la migración de gas desde las zonas de alta presión presentes en la formación hacia las zonas de más baja presión o hacia la superficie. Se ha estimado que esta situación afecta aproximadamente al 25% de los pozos cementados en el mundo causando hasta la pérdida total de los mismos[2].

La migración de gas es un problema complejo que involucra el control de la densidad de fluido, la remoción del lodo, las propiedades de la lechada de cemento, la hidratación del cemento y la adherencia cemento/revestidor/formación [4].

La migración de gas no es un problema nuevo sino que fue identificado desde principios de los años 60 y desde entonces se han realizado valiosos esfuerzos para solucionarlo. Por esta razón los estudios de los modelos de laboratorio a gran escala han evaluado fluidos de perforación, espaciadores, viscosidad, densidad, características de flujo, pérdida de fluido y configuración de la tubería, como los principales parámetros que la afectan [4].

Esta diversidad de parámetros involucrados en el problema de migración de gas trajo consigo que se hayan propuesto varios mecanismos según los cuales ocurre la migración de gas y los factores que afectan la misma, motivo por el cual

es indispensable establecer un criterio que indique cómo estos factores están involucrados en este fenómeno.

La importancia de establecer si uno o varios de estos parámetros influyen en el problema de la migración de gas conlleva a desarrollar una evaluación de los materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Estudiar y analizar los distintos materiales cementantes para pozos productores de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas a fin de establecer cuáles son los factores involucrados en el problema de la migración de gas.

3.2 Objetivos específicos

- ❖ Caracterizar las lechadas de cemento para pozos petroleros de acuerdo a las especificaciones del Instituto Americano de Petróleo (American Petroleum Institute, API).

- ❖ Evaluar y establecer comparaciones sobre la base del desarrollo de la fuerza de gel estática entre lechadas de cemento con propiedades antimigratorias comercialmente empleadas en operaciones de campo.

- ❖ Evaluar y establecer comparaciones sobre la base del control de migración de gas entre lechadas de cemento con propiedades antimigratorias comercialmente empleadas en operaciones de campo.

- ❖ Comparar estos resultados con los obtenidos empleando una lechada de cemento sin propiedades antimigratorias.

- ❖ Establecer criterios y/o correlaciones que permitan proponer metodologías de evaluación de las propiedades antimigratorias de gas en lechadas de cemento.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Proceso de perforación

Se conoce como operaciones de perforación todas aquellas actividades que permiten hacer accesibles a nivel de superficie las reservas de petróleo del subsuelo [5]. Constituyen las actividades finales del proceso de búsqueda de petróleo, que empieza con la actividad geológica, caracterización del yacimiento, cuantificación en términos de barriles y estrategia de explotación del yacimiento.

El proceso de perforación de pozos consiste básicamente en penetrar las capas de la corteza terrestre empleando mechas de perforación adecuadas a medida que se profundiza.

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 fig. 1), lo que finalmente permite tener un conducto entre la arena petrolífera y la superficie.

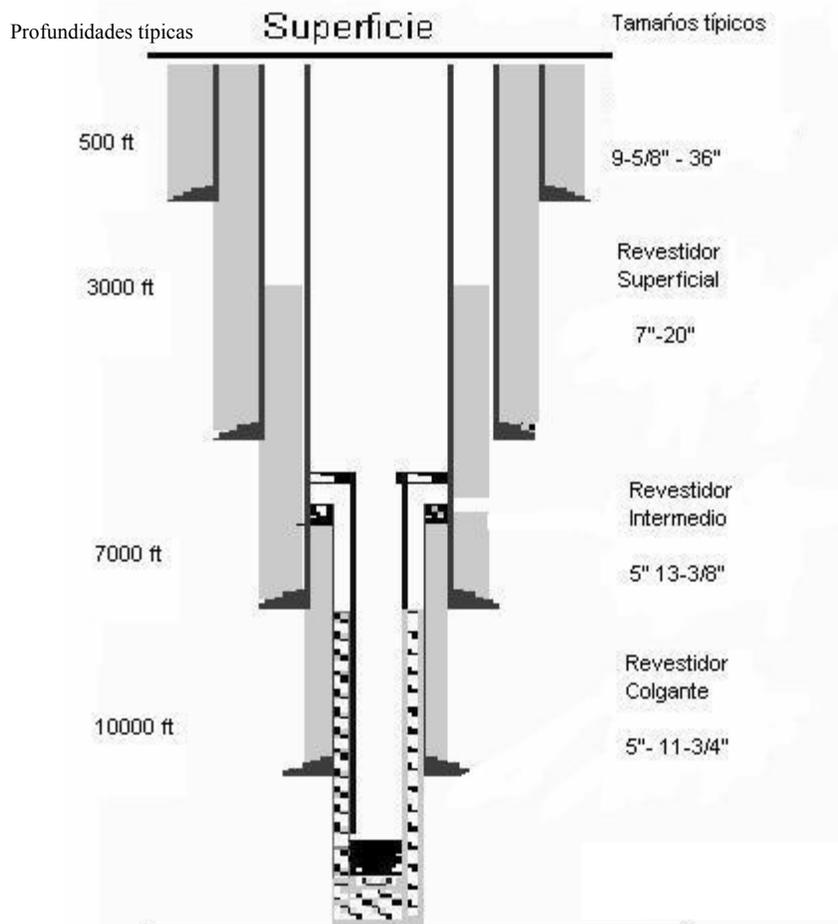


Figura 1. Diagrama de un pozo petrolero[5].

Durante la perforación es fundamental la circulación permanente de un fluido de perforación, el cual garantiza la seguridad y eficiencia en el proceso. Este fluido se inyecta entre la tubería y la mecha y asciende por el espacio anular que hay entre la tubería y las paredes del hoyo [6].

Existen dos métodos de perforación para pozos de petróleo y gas natural, el de perforación por percusión (está en desuso) y el de perforación rotativa empleado universalmente por la industria petrolera.

En la *perforación por percusión*, el pozo se construye con la aplicación de golpes periódicos empleando para ello una mecha sobre el fondo, bajo la acción del peso de dicha mecha y una barra pesada de percusión [7]. Con la aplicación de este método existe la posibilidad de concentrar en el contacto de la mecha con la roca grandes potencias y de perforar rocas de cualquier dureza. Sin embargo, el empleo de bajas frecuencia para lograr dicho objetivo origina que las velocidades de penetración sean bajas, por lo que sólo se perforan unos pocos metros por hora.

En la *perforación rotativa* la roca en el fondo del pozo se perfora con la mecha en giro, cuyo movimiento se lo imprime una mesa rotatoria. La potencia suministrada a la mecha es por término medio varias veces mayor que en la perforación por percusión, lo cual asegura velocidades de profundización más altas, las cuales alcanzan 100m/h al perforar rocas de dureza media y blandas [7].

4.1.1 Equipos empleados para la perforación

Los equipos empleados en la perforación rotativa constan de cuatro sistemas fundamentales: energía, levantamiento, rotatorio y circulación (ver fig. 2).

El sistema de energía está constituido por motores de diesel, los cuales le suministran la energía a los equipos. Esta energía es mayormente consumida por los sistemas de levantamiento y circulación y en menor grado por el sistema rotatorio, equipos de iluminación y otros motores [8].

El sistema de levantamiento es empleado para levantar, bajar y suspender básicamente la tubería de perforación y producción en el pozo. Este sistema consta de una torre de acero, la cual soporta a la polea superior y a la tubería de perforación; la línea de alzamiento, la cual se enrolla y desenrolla en un carrete; y la polea inferior, en la cual se encuentra el gancho que sostiene al sistema rotatorio [8].

El sistema rotatorio es empleado para perforar el pozo, y está constituido por una tubería de perforación, la mecha, y todo el equipo relacionado los cuales reciben el nombre de cadena de perforación. Dentro de esta cadena se encuentra una tubería muy fuerte llamada Kelly, la cual gira toda la tubería que se encuentra debajo para perforar al pozo y cuyo giro se lo imprime la mesa rotatoria [6].

El sistema de circulación consta de todos los equipos relacionados con el almacenamiento, mezclado y manejo del lodo de perforación para facilitar el logro de las especificaciones requeridas.

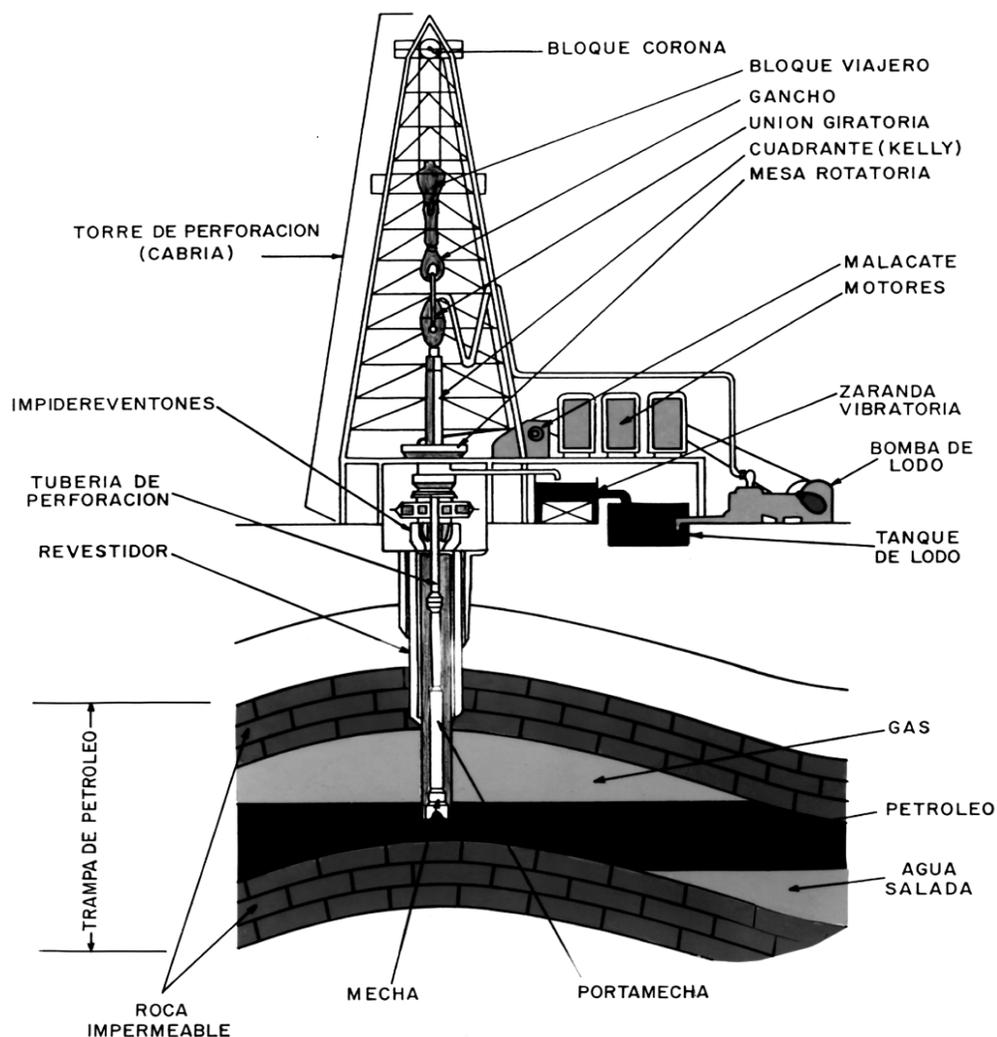


Figura 2. Taladro de perforación rotatoria [11].

4.1.2 Fluido de perforación

El fluido de perforación es un líquido lubricante y transportador de los ripios de perforación que se utiliza para perforar pozos petroleros. Este fluido se bombea hasta la mecha o punta del taladro y arrastra hasta arriba, a la boca del pozo, todos los pedazos de tierra y ripios que se han taladrado hasta el momento [9].

El fluido de perforación puede ser definido como una suspensión de sólidos en una fase líquida, donde la fase líquida puede ser agua o aceite. Existen tres tipos de lodos comúnmente usados: base agua, base aceites y las emulsiones.

4.1.2.1 Funciones del fluido de perforación

❖ *Enfriar y lubricar la mecha del taladro y sus dientes.* La perforación requiere una considerable cantidad de energía en la forma de peso, rotación y energía hidráulica. Una gran proporción de esta energía es disipada en forma de calor, la cual debe ser removida para permitir que la mecha funcione apropiadamente. Este fluido también ayuda a remover los ripios de perforación que se incrustan entre los dientes de la mecha previniendo así que la misma deje de cumplir su función [10].

❖ *Enfriar y lubricar la sarta de perforación.* A medida que la sarta de perforación roza contra las paredes del pozo se genera una cantidad considerable de calor, la cual debe ser disipada fuera del pozo [10]. Este fluido ayuda a enfriar la sarta de perforación, absorbiendo este calor y liberándolo por convección y radiación. Este también logra reducir la fricción entre la sarta y las paredes del pozo por efectos de la lubricación.

❖ *Controlar la presión en la formación.* Por razones de seguridad durante la perforación, las altas presiones en la formación deben ser contenidas dentro del pozo para prevenir daños al equipo y al personal. Este fluido logra esta función suministrando una presión hidrostática mayor que la presión en la formación.

❖ *Transportar los ripios que se producen durante la perforación fuera del pozo.* Para que la perforación sea efectiva, los ripios generados por la acción de la mecha deben removerse inmediatamente. El fluido de perforación arrastra estos ripios hasta la superficie del pozo en donde son separados del mismo. Por esta razón, el fluido debe poseer las propiedades necesarias para permitir la separación de los ripios en la superficie y su posterior recirculación [6].

❖ *Estabilizar las paredes del pozo para prevenir las fracturas.* Un buen fluido de perforación puede ayudar a estabilizar las paredes del pozo. La diferencia de presión entre la presión hidrostática del fluido y la presión de la formación también ayuda a mantener las paredes del pozo estables. Su diseño debe ser tal que logre la estabilidad del hoyo y evite fracturar la formación [6].

❖ *Ayuda en la evaluación e interpretación de los registros del pozo.* El fluido de perforación permite determinar la porosidad, tipo de formación, tamaño de las formaciones, formaciones con presiones anormales y permite obtener información para la construcción del próximo pozo, a través del estudio de los ripios transportados a la superficie.

4.1.2.2 Reología

Por medio de ésta se describe el comportamiento de los fluidos (tanto de los fluidos de perforación como de la lechada de cemento) a través de las tuberías. Para lograr esto se emplean diferentes modelos reológicos, entre los que se pueden mencionar:

❖ *Modelo Newtoniano.* En este modelo el esfuerzo de corte que se le aplica al fluido es directamente proporcional a la tasa de corte. Esta relación lineal sólo es válida cuando el fluido se mueve en capas o láminas. Un fluido que fluye en esta forma se denomina fluido laminar. Esto ocurre a bajas tasas de corte. A altas tasas de corte el fluido cambia de laminar a turbulento [11] .

La forma de la curva de un fluido Newtoniano es una línea recta que pasa por el origen cuya pendiente de la curva representa la viscosidad (ver fig.3, curva A). Para este modelo el esfuerzo de corte está relacionado con la tasa de corte por la relación:

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dL} \Rightarrow \tau = \mu \cdot \gamma \quad \text{ec. 1}$$

Donde γ es la tasa de corte, τ es el esfuerzo de corte y μ es la viscosidad. Como la viscosidad no cambia con la tasa de corte, este parámetro se convierte en el único que caracteriza a un fluido Newtoniano a temperatura constante.

❖ **Modelo no-Newtoniano.** Muchos fluidos son tan complejos que no pueden ser caracterizados por un simple valor de viscosidad. Los fluidos que no presentan una proporcionalidad directa entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte se clasifican como no-Newtonianos [11].

Los fluidos no-Newtonianos que dependen de una tasa de corte son *pseudoplásticos* si la viscosidad aparente disminuye al incrementarse la tasa de corte y son *dilatantes* si la viscosidad aparente se incrementa con un incremento en la tasa de corte.

Por otro lado, los fluidos no-Newtonianos que dependen de una tasa de corte son *tixotrópicos* si la viscosidad aparente disminuye un tiempo después que la tasa de corte se incrementa a un nuevo valor constante; y son *reopécticos* si la viscosidad aparente se incrementa un tiempo después que la tasa de corte se incrementa a un nuevo valor constante. Los fluidos de perforación y las lechadas de cemento son generalmente fluidos tixotrópicos, aunque actualmente estos no están modelados matemáticamente [2].

Los modelos reológicos de plástico de Bingham y ley de potencia son utilizados para aproximar el comportamiento pseudoplástico de los fluidos de perforación y las lechadas de cemento.

❖ *Modelo Plástico de Bingham.* El modelo plástico de Bingham está definido por:

$$\tau = \mu_p \cdot \gamma + \tau_0 \quad \text{ec. 2}$$

El plástico de Bingham no fluirá hasta que se aplique un esfuerzo cortante τ que exceda a un cierto valor mínimo de τ_0 conocido como punto cedente. Después que se excede este punto, los cambios en el esfuerzo cortante son proporcionales a los cambios en la tasa de corte y la constante de proporcionalidad se denomina viscosidad plástica, μ_p (ver fig.3, curva D).

La viscosidad plástica es generalmente descrita como la parte de la resistencia al flujo causada por fricción mecánica y es principalmente afectada por el porcentaje volumétrico de sólidos en el lodo.

❖ *Modelo de la ley de potencia.* El modelo de ley de potencia está definido por:

$$\tau = k \cdot \gamma^n \quad \text{ec. 3}$$

Como el modelo de Plástico de Bingham, el modelo de ley de potencia (ver fig.3, curva B) requiere de dos parámetros para la caracterización del fluido. Sin embargo, el modelo de la ley de potencia se puede usar para representar un fluido pseudoplástico ($n < 1$), un fluido Newtoniano ($n=1$) o un fluido dilatante ($n > 1$).

El parámetro k es llamado usualmente índice de consistencia del fluido y su significado físico es similar a la viscosidad plástica. Un aumento de k indica un

aumento en la concentración de sólidos o un aumento del número de partículas. El parámetro n es llamado usualmente índice de comportamiento del fluido.

Es importante resaltar que existe una modificación del modelo la ley de Potencia, el cual incluye el punto cedente. Este modelo se denomina Herschel-Bulkley o Ley de Potencia Modificada y se puede observar en la figura 3, curva C.

La Ley de Potencia Modificada está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n \quad \text{ec. 4}$$

Tal como ocurre con la Ley de Potencia, n es una medida de la capacidad del fluido para reducir la viscosidad por corte y K es una medida de los sólidos. Sin embargo, los valores de n y de K serán usualmente diferentes para las dos leyes, potencia y potencia modificada. Esta última ley se aproxima más estrechamente al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de los lodos de perforación [11].

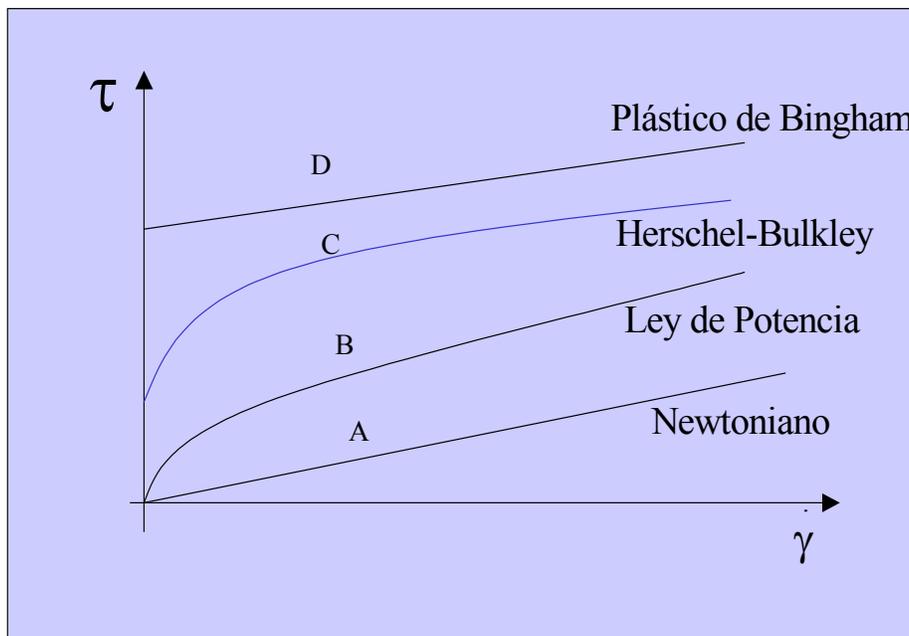


Figura 3. Comportamiento de los distintos modelos reológicos [4].

4.2 Proceso de cementación de pozos petroleros

El proceso de cementación de pozos petroleros consiste en el desplazamiento de una lechada de cemento a través de una tubería con la finalidad de colocarla entre el revestidor y la formación de un pozo.

El objetivo principal de la cementación de pozos petroleros es proporcionar la lechada de cemento necesaria para que una vez solidificada se forme una barrera que permita lograr el aislamiento zonal. Esto con la finalidad de prevenir la migración de gas u otros fluidos presentes en la formación, además de servir como soporte para la tubería y protegerla de la corrosión.

La lechada de cemento está formada por una mezcla de agua con cemento Portland, o con cemento mezclado con aditivos. Este cemento debe cumplir con las siguientes funciones: [6]

- ❖ Restringir el movimiento del fluido entre las zonas permeables del pozo.
- ❖ Proveer el soporte mecánico para el revestidor.
- ❖ Proteger al revestidor de la corrosión debido a la presencia de sulfatos y otras sustancias.
- ❖ Servir de soporte para las paredes del pozo para prevenir que colapse la formación.

4.2.1 Composición del cemento Portland

El cemento Portland está compuesto básicamente de silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), aluminoferrita tetracálcica ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Estos compuestos

denominados “clinker” (excepto el yeso) se forman en un horno por una serie de reacciones a una temperatura de 1500°C aproximadamente [4].

Las materias primas básicas que se alimentan al horno son derivadas de rocas calcáreas y arcillosas, tales como piedra caliza, arcilla, y cualquier otro material que contenga un alto porcentaje de carbonato de calcio [4]. La materia prima también puede incluir arena, mineral de hierro, etc.

Después de un período de tiempo determinado, se le agrega al “clinker” una cantidad controlada de yeso y otros aditivos para obtener el cemento Portland, el cual se emplea en la construcción de pozos petroleros.

4.2.2 Clases y tipos de cemento

De acuerdo a lo establecido por la API [3] el cemento Portland se clasifica en ocho tipos, que van de la A hasta la H (ver tabla N° 1). Esta clasificación responde a las condiciones de profundidad, presión y temperatura a los cuales pueden ser expuestos:

Tabla N°1. Requerimientos químicos para el cemento Portland [4].

	Clases de Cemento					
	A	B	C	G	D,E,F	H
GRADO ORDINARIO (O)						
Oxido de Magnesio (MgO), máximo, porcentaje	6.0	NA	6.0	NA	NA	NA
Trióxido de sulfuro (SO ₃), máximo, porcentaje	3.5	NA	4.5	NA	NA	NA
Perdida en ignición, máximo, porcentaje	3.0	NA	3.0	NA	NA	NA
Residuo insoluble, máximo, porcentaje	0.75	NA	0.75	NA	NA	NA
Aluminato tricalcio (C ₃ A), máximo, porcentaje	NR	NA	15	NA	NA	NA
GRADO DE RESISTENCIA AL SULFATO MODERADA						
Oxido de Magnesio (MgO), máximo, porcentaje	NA	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trióxido de sulfuro (SO ₃), máximo, porcentaje	NA	3.0	3.5	3.0	3.0	3.0
Perdida en ignición, máximo, porcentaje	NA	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Residuo insoluble, máximo, porcentaje	NA	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricalcio (C ₃ S), máximo, porcentaje	NA	NR	NR	NR	58	58
mínimo, porcentaje	NA	NR	NR	NR	48	48
Aluminato tricalcio (C ₃ A), máximo, porcentaje	NA	8	8	8	8	8
Contenido total del álcali expresado como equivalente a oxido de sodio (Na ₂ O), máximo, porcentaje	NA	NR	NR	NR	0.75	0.75

El sulfato de calcio reacciona con el aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) para formar etringita (trisulfato aluminato de calcio, $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2[\text{SO}_4]_3 \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$) la cual causa una expansión del material. La expansión ilimitada del cemento causa fractura del material e incluso daños al revestidor.

La resistencia al ataque de los sulfatos puede incrementarse disminuyendo la cantidad de aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) presente en el "clinker" [10].

4.2.4 Retrogresión y uso de harina de sílice.

A temperaturas por encima de 110°C (230°F) el cemento pierde sus propiedades físicas, concretamente la resistencia a la compresión, por lo que no se alcanzan los valores esperados para este material. Esto es lo que se conoce como el fenómeno de retrogresión [4].

El fenómeno de retrogresión puede atribuirse a la metamorfosis que sufre la fase de silicato de calcio hidratado, la cual presenta una estructura amorfa, convirtiéndose en una nueva fase llamada α - Silicato dicálcico hidratado. El material presente en esta última fase es altamente cristalino y más denso que el de la fase silicato de calcio hidratado, pero debido a que es mucho más compacto aumenta su porosidad. Esto trae como consecuencia la disminución de la resistencia a la compresión e incremento de la permeabilidad [4].

El problema de la retrogresión puede ser prevenido por la reducción de la relación CaO/SiO_2 , la cual se logra reemplazado parcialmente al cemento Pórtland por cuarzo molido (material pozolánico). El cemento fraguado resultante tiene mayor resistencia a la compresión, menor permeabilidad y menos cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libre, por lo que es más resistente a sulfatos y otros fluidos corrosivos [4]. La harina de sílice es usualmente empleada en cementación de pozos en donde las temperaturas son mayores a 110°C (230°F). Por esta razón, en todas las

formulaciones que se emplearon en el presente estudio se utilizó este aditivo debido a que las condiciones de operación son superiores a 230°F.

La inhibición de la retrogresión se explica por el rearrreglo de la estructura cristalina que sufren las fases presentes de acuerdo a la relación CaO/SiO₂. Esta relación varía a medida que se desplaza en el diagrama binario dando lugar a fases con distintas propiedades. Cuando la relación CaO/SiO₂ tiende a la unidad se evita la formación de la fase α - Silicato dicálcico hidratado, la cual es la causante principal de este fenómeno.

Así, la formación de α - Silicato dicálcico hidratado que se da a una relación de CaO/ SiO₂ de 2 a 3 no se produce cuando esta última es de uno. En lugar de esto se forma la Tobermorita y otras fases que ofrecen mejores propiedades mecánicas [4].

4.2.5 Propiedades de la lechada de cemento

4.2.5.1 Tiempo de espesamiento. El tiempo de espesamiento es el tiempo que la lechada de cemento permanecerá bombeable bajo condiciones de pozo [12]. También se define como el tiempo requerido para que la lechada de cemento alcance 100 unidades Bearden de consistencia (Bc) [10].

Es importante tomar en consideración que el tiempo de espesamiento debe ser mayor que el tiempo que va a durar el trabajo de cementación, para evitar cementación en la superficie de la tubería, en la cabeza de cementación y/o dentro del revestidor. Por lo tanto, este tiempo se debe estimar como el tiempo total del trabajo de cementación más un factor de seguridad de una a dos horas.

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

Se pueden obtener densidades elevadas disminuyendo el volumen de agua en la mezcla o agregando materiales de gravedad específica alta [12]. Las densidades bajas se requieren algunas veces para reducir el riesgo de fractura de la formación, lo cual puede ser producida por una excesiva presión hidrostática de la columna de cemento.

4.2.5.3 Resistencia a la compresión. Se refiere a la fuerza que puede soportar un cubo de cemento de cierta superficie antes de romperse [3]. Cuando el cemento tiene un valor de resistencia a la compresión de 500 psi, es considerado adecuado para muchos trabajos [12].

4.2.5.4 Permeabilidad. Se refiere a la capacidad de un medio poroso para permitir el flujo de fluidos o gases [3]. La unidad de medición es normalmente el milidarcy, mD.

4.2.5.5 Reología. Por medio de ésta se describe el comportamiento de la lechada de cemento en movimiento a través de las tuberías y otros conductos. Para describir las propiedades reológicas de las lechadas de cemento se utilizan comúnmente el modelo de plástico de Bingham o el modelo de la Ley de Potencia, los cuales fueron explicados anteriormente.

4.2.5.6 Pérdida de fluido. Se refiere al fluido perdido de una lechada de cemento cuando se prueba contra una pantalla de 325 mesh y una presión diferencial de 1000psi [3].

4.2.5.7 Agua libre. En pozos inclinados, el agua libre puede coalescer para formar canales continuos sobre la parte superior de pozo, lo cual crea una especie de canal por donde puede migrar el gas [2]. En pozos verticales, el agua libre evita que la lechada de cemento sea homogénea, por lo que la cantidad de agua es menor a la evaluada. Esto trae como consecuencia que las formulaciones de lechadas de cemento cambien sus propiedades con respecto a

las iniciales. Por esta razón se recomienda usar lechadas de cemento que no desarrollen agua libre.

4.2.6 Clasificación del proceso de cementación

En general, el proceso de cementación de pozos se puede clasificar en cementación primaria y cementación secundaria.

4.2.6.1 Cementación primaria:

La cementación primaria es la operación realizada inmediatamente después de bajar el revestidor dentro del pozo y con su aplicación se pretende lograr el aislamiento zonal [13].

Es importante realizar un buen trabajo de cementación ya que si no se logra el aislamiento zonal requerido se puede afectar la vida productiva del pozo. El fracaso en el aislamiento de zonas de interés puede conducir a una comunicación indeseable de fluidos del pozo o a una acumulación de gas en el anular [12].

4.2.6.1.1 Métodos de cementación de pozos

Existen diferentes métodos para realizar la cementación, los cuales dependen principalmente del tipo de pozo y sus características. Entre estos se pueden citar:

- **Cementación directa de una etapa.**

Este método es el más empleado, ya que es simple y en muchos casos es bastante seguro. Este consiste en inyectar inicialmente en la tubería de revestimiento la lechada de cemento por medio de un dispositivo especial

denominado cabezal de cementación, el cual se desplaza mediante un fluido de desplazamiento, que generalmente es el lodo de perforación [7].

En la tubería de revestimiento, la lechada de cemento se separa del lodo por medio de los tapones separadores. En esta fase es importante emplear líquidos separadores que ayuden a prevenir el mezclado entre la lechada de cemento y el fluido de perforación [7].

El proceso se controla midiendo el volumen de líquido bombeado así como también midiendo la presión en la boca del pozo. Cuando el tapón superior de cementación se asienta con el cuello flotador se origina un incremento en la presión, la cual sirve de señal para finalizar el desplazamiento de la lechada cemento (ver fig. 4).

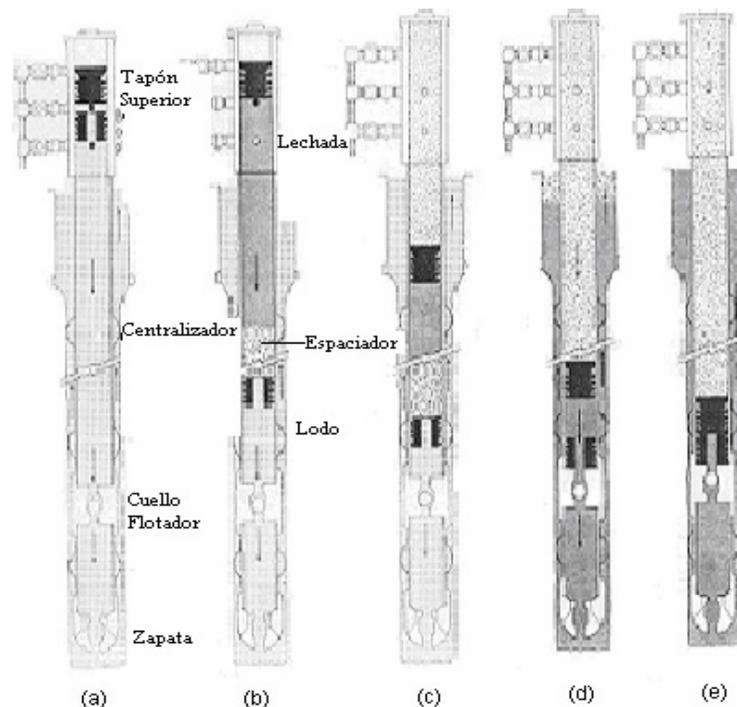


Figura 4. Cementación en una sola etapa. a. Lodo de perforación circulando b. Bombeo de la lechada de cemento c. Desplazamiento de la lechada de cemento por la tubería d. Desplazamiento de la lechada de cemento por el anular y e. Trabajo terminado [7].

- **Cementación de varias etapas.**

Este método se aplica cuando existe peligro de ruptura hidráulica de la formación; al cementar pozos de gas natural a fin de disminuir la probabilidad de migración del mismo; en los casos cuando se limita el tiempo de cementación a causa del posible fraguado anticipado de la lechada de cemento en los pozos profundos de altas temperaturas; cuando conforme a las condiciones térmicas se requiere el uso de materiales de cementación diferentes; con el propósito de reducir la presión en la boca del pozo al desplazar la lechada de cemento a presión (ver fig.5) [12].

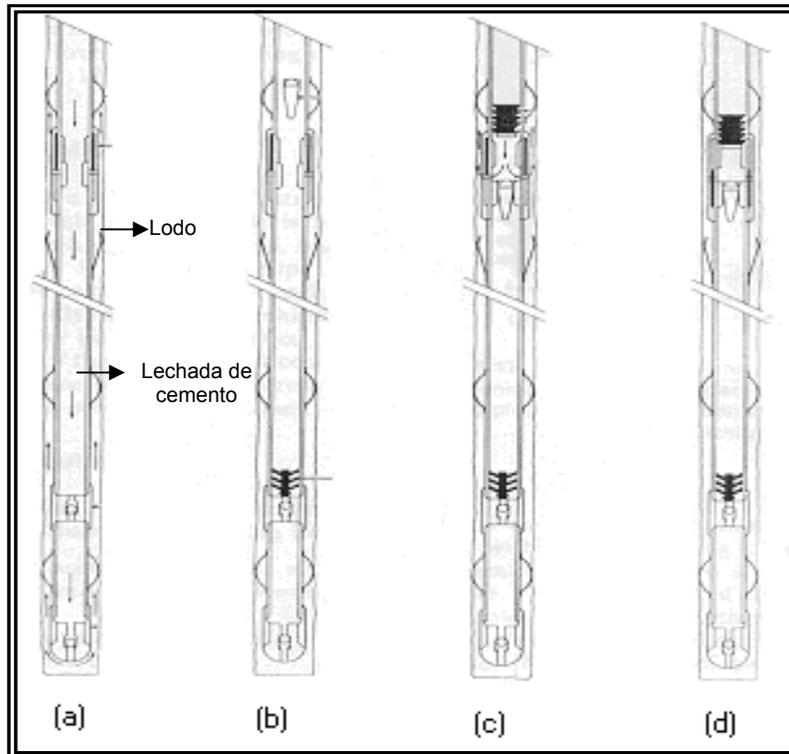


Figura 5. Cementación en dos etapas. a. Lodo de perforación circulando. b. Desplazamiento de la lechada de cemento en la primera etapa. c. Desplazamiento de la lechada de cemento en la segunda etapa y cierre del tapón. d. Trabajo terminado. [7]

4.2.6.1.2 Fallas en la cementación primaria

Investigaciones han revelado que el principal factor que afecta la colocación de la lechada de cemento es el desplazamiento efectivo del fluido de perforación del anillo[14] (ver figura 6), y su reemplazo con cemento fraguado debe resultar a tal punto de poder soportar, proteger el revestidor y suministrar un sello para las presiones hidráulicas provenientes de las formaciones[15].

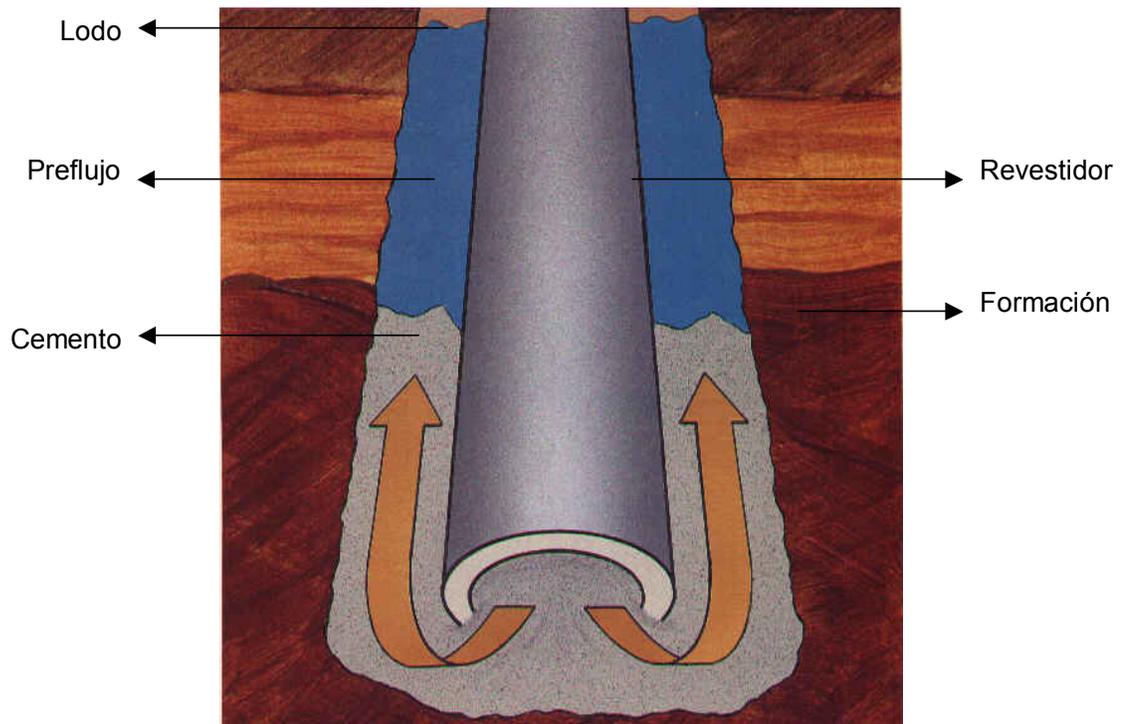


Figura 6. Proceso de desplazamiento del lodo de perforación [14].

Existe una serie de factores que influyen directamente con la eficiencia del desplazamiento del lodo [16,17,15,18,19]. Entre los más importantes se encuentran los siguientes:

❖ *Movimiento de la tubería.* El movimiento de la tubería durante la colocación de la lechada de cemento ayuda a remover el lodo que posiblemente se encuentra atrapado en las zonas más angostas del anular [12]. Este punto es uno de los factores principales que ayudan a un buen desplazamiento del lodo.

Para lograr esto se emplea el movimiento de tubería de rotación y/o el de reciprocación, dependiendo del tipo de operación y geometría del hoyo (ver fig. 7). [17,18]

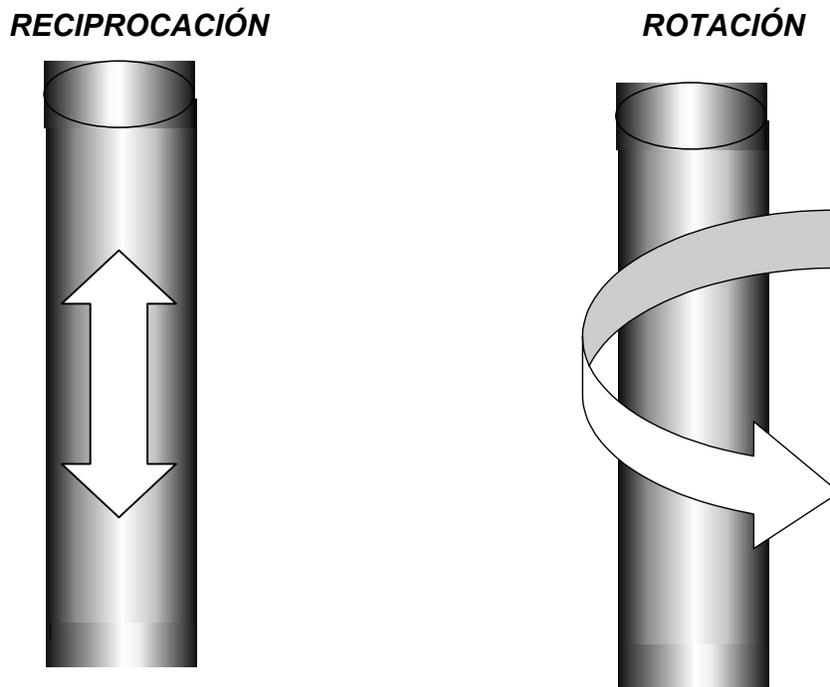


Figura N° 7. Tipos de movimientos de tubería [20].

❖ *Centralización de la tubería y tasas de desplazamiento.* Cuando se evalúan los factores que afectan el desplazamiento inefectivo del fluido de perforación, es necesario considerar el comportamiento del fluido en un anular excéntrico, en donde la tubería no se encuentra exactamente centralizada en el hoyo, ya que una tubería centralizada origina un área de flujo uniforme en el anular y por lo tanto se logra una distribución uniforme de la presión alrededor de la tubería [12]. Por el contrario, si la tubería está descentralizada la velocidad del fluido no es uniforme, debido a que éste tiende a fluir a tasas más elevadas entre los sitios que ofrecen menor resistencia al flujo (lado ancho de la excentricidad).

Se desarrolla en consecuencia, la canalización del lodo en el lado estrecho debido a su pérdida de fluidez y a la desigual distribución de presiones. [16,17]

En la figura N° 8 se puede observar dos tipos de flujos asociados al desplazamiento del lodo, el flujo laminar y el turbulento. En general, se considera que bajo condiciones de flujo turbulento se presentan las tasas más altas de desplazamiento y las mayores velocidades.

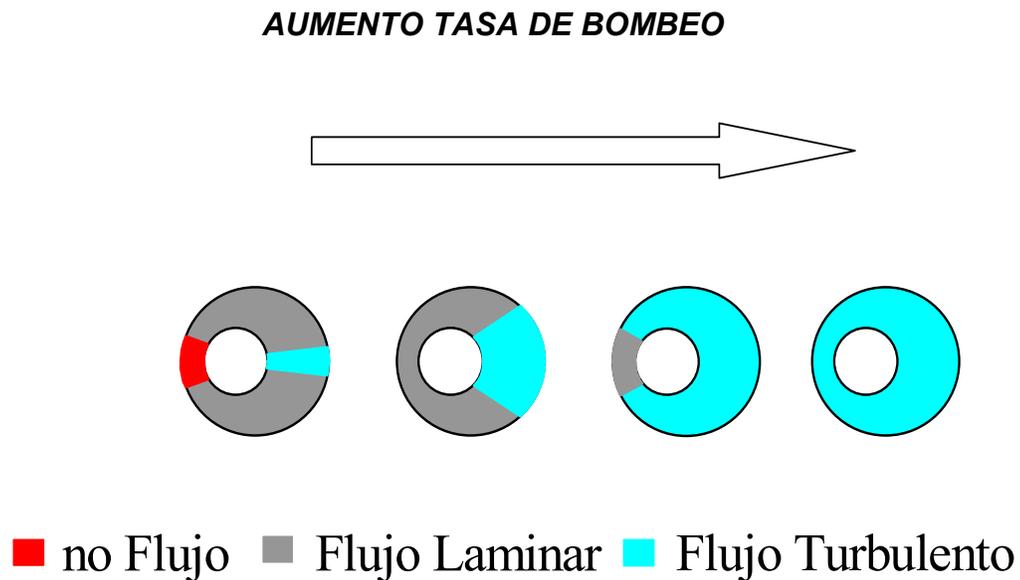


Figura N° 8. Régimenes de flujo [20].

❖ *Diferencia de densidades.* Estudios realizados han encontrado que la diferencia de densidad entre el lodo y la lechada de cemento es un factor significativo para lograr una buena remoción del lodo [10].

Si el lodo es más ligero que el cemento, la capacidad de flotación del lodo contribuirá a su remoción, se desarrollan unas fuerzas denominadas de flotación que tienden a aplanar la interfase cemento-lodo y se promueve la eficiencia del desplazamiento [16]. Sin embargo la diferencia de densidades no necesariamente

debería ser la máxima posible, ya que se alcanza una mejor remoción con una reducida diferencia de densidad, aplicándole al cemento una tasa más alta de desplazamiento [18].

❖ *Cantidad de fluido desplazado.* Según estudios realizados el tiempo de contacto (tiempo en que la lechada de cemento permanece en contacto con un punto en particular en el área anular) parece tener efectos positivos sobre la eficiencia en la remoción del lodo. Este tiempo se ha estimado que debería ser mayor de 10 minutos para lechadas de cemento en régimen turbulento [12].

❖ *Espaciadores y lavadores.* En muchos casos durante los trabajos de cementación puede existir incompatibilidad entre la lechada de cemento y el fluido de perforación, por lo que se forma una masa viscosa difícil de bombear en la interfase de estos fluidos. Esto trae como consecuencia que la lechada de cemento no pueda desplazar todo el fluido de perforación y queden restos de lodo contaminado en las paredes del revestidor y de la formación [11].

Para evitar este problema se bombea dentro del pozo, antes de introducir la lechada de cemento, un fluido que sea compatible tanto con la lechada de cemento como con el fluido de perforación. Este fluido es conocido con el nombre de prefluo.

Los preflujos deben por tanto eliminar el lodo de perforación del revestidor y de las paredes de la formación. Estos se clasifican según su formulación en lavadores y espaciadores.

Los lavadores son fluidos cuya densidad y viscosidad son muy parecidas a las del agua o el aceite, y están constituidos por una mezcla de dispersantes, surfactantes y solventes, la cual actúa adelgazando y dispersando al lodo. Debido a su baja viscosidad, estos son particularmente empleados para desplazamientos en flujos turbulentos. La forma más simple de un lavador es el agua fresca [11].

Los *espaciadores* son preflujos con densidades y propiedades reológicas diseñadas cuidadosamente. Estos poseen un contenido de sólidos mayor que los lavadores, y son generalmente efectivos para evitar el contacto entre los dos fluidos presentes en el pozo. Un buen espaciador debería separar adecuadamente ambos fluidos y ser compatible con los mismos, remover tanto el fluido de perforación como la torta de filtrado y no afectar las propiedades de la lechada de cemento o del fluido de perforación [12].

Los espaciadores son químicamente más complejos que los lavadores y aunque algunos pueden ser bombeados en flujo turbulento, causando el mismo efecto que los anteriores, algunos están diseñados para ser bombeados en régimen laminar.

4.2.6.2 Cementación secundaria:

La cementación secundaria o remedial consiste en aplicar una 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 [6].

4.2.6.2.1 Objetivos de la cementación secundaria

- ❖ Reparar fallas originadas en la cementación primaria debido a canalización o insuficiente altura de cemento colocada en el anular.
- ❖ Eliminar el exceso de agua (mejorar la relación crudo/agua a través del aislamiento de zonas de agua).
- ❖ Reparar grietas en el revestidor causadas por la corrosión o rompimiento de la tubería.

- ❖ Abandonar zonas de producción agotadas para prevenir la migración de fluidos y la contaminación de otras zonas o pozos.

4.2.7 Tapones de cemento

Un tapón de cemento es un volumen relativamente pequeño de lechada de cemento que se coloca dentro del pozo. Existen varias razones para colocar los tapones de cemento, entre las que se encuentran: [13]

- ❖ *Abandono de un pozo seco o una zona agotada.* Para sellar un pozo seco o una zona agotada se colocan tapones de cemento a las profundidades requeridas. Estos tapones previenen la comunicación zonal evitando cualquier migración de fluido no deseado.

- ❖ *Perforación direccional.* Se coloca un tapón de cemento a una profundidad específica para desviar un hoyo debido a que se realizó en una dirección indeseable o en una posición estructural pobre.

- ❖ *Control de pérdida de circulación.* Si existe pérdida de circulación durante la perforación, éste se puede restaurar en algunos casos colocando un tapón de cemento contra la zona donde se está produciendo dicha pérdida y posteriormente se perfora de nuevo a través del tapón, el cual se denomina “tapón perforable”.

4.2.8 Aditivos del cemento

Los aditivos tienen como función adaptar los diferentes cementos petroleros a las condiciones específicas de trabajo, lo que permite un mayor manejo de la lechada de cemento cuando se introduce entre el revestidor y la formación.

Existen trece categorías de aditivos generalmente reconocidas:

1. **Aceleradores:** Son empleados para reducir el tiempo de espesamiento y acelerar el proceso de endurecimiento del cemento. El acelerador más común es el cloruro de calcio, ya que además de ser el más efectivo para lechadas de cemento para pozos petroleros se puede obtener fácilmente y es económico [4].

2. **Retardadores:** Son químicos que se le añaden al cemento para aumentar el tiempo de fraguado, con la finalidad de garantizar el tiempo necesario para que la lechada de cemento sea bombeada y colocada en su lugar antes que frague [4].

Los aditivos retardadores incluyen a los lignosulfonatos, los derivados de la celulosa, derivados del azúcar y mezclas orgánicas.

3. **Extendedores:** Son aditivos que disminuyen la densidad del cemento, y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen de cemento fraguado.

La densidad de la lechada se puede reducir con extendedores como bentonita, pozzolan, tierras diatomáceas y silicato de sodio. Es importante resaltar que el agua es el principal aditivo extendedor y que los materiales antes mencionados sólo ayudan a transportar el agua para aliviar la lechada de cemento [4].

4. **Agentes densificantes:** Son aquellos que aumentan la densidad de la lechada de cemento, con la finalidad de utilizarla en pozos profundos para vencer las altas presiones en el fondo del mismo.

Entre los principales agentes densificantes se encuentran: la barita, la ilmenita y la hematita.

5. **Dispersantes:** Son aquellos que reducen la viscosidad de la lechada de cemento. Entre los principales dispersantes se encuentran: los lignosulfonatos, el polinaftaleno sulfonado y los ácidos hidroxicarboxílicos [4].

6. **Agentes que controlan pérdida de fluido:** Son aquellos que controlan el escape prematuro de la fase acuosa de la lechada de cemento hacia la formación. Esto se debe controlar ya que debido a la disminución de la fase acuosa, la densidad de la lechada de cemento aumenta, lo que trae como consecuencia que ésta no sea bombeable [4].

Los controladores de pérdida de fluido más comunes son los polímeros solubles en agua.

7. **Agentes que controlan pérdida de circulación:** Son aquellos materiales que controlan la pérdida de lechada de cemento hacia formaciones débiles o altamente permeables. Entre los principales agentes que controlan la pérdida de circulación se encuentran: materiales fibrosos fragmentados, perlas expandidas, celofán y materiales granulados [4].

8. **Espumantes:** Estos aditivos se emplean para obtener lechadas de cemento espumadas.

9. **Antiespumantes:** Son aquellos que reducen el entrapamiento de aire durante la preparación de la lechada de cemento causado por la acción de otros aditivos. Los agentes antiespumantes producen un cambio en la tensión superficial y/o alteran la dispersabilidad de los sólidos, lo que evita que se produzca espuma en la lechada de cemento [12].

Los antiespumantes más comúnmente usados son los éteres de poliglicoles y las siliconas [4].

10. Antisedimentantes: Son aquellos que permiten obtener lechadas de cemento homogéneas, restaurando los valores de punto cedente y permitiendo un bajo contenido de agua libre. Entre los antisedimentantes más usados se encuentran: la bentonita, los polímeros hidrosolubles y los silicatos.

11. Tixotrópicos: Son empleados para combatir la pérdida de circulación y para minimizar la migración de gas a través del crecimiento acelerado de la fuerza de gel estática de la lechada de cemento [12].

12. Inhibidores de retrogresión: Son aquellos que ayudan a prevenir la pérdida de resistencia a la compresión del cemento (retrogresión). El aditivo mayormente usado es la sílica flour y se recomienda que la cantidad óptima empleada para controlar la retrogresión sea de 30% a 40% [12].

13. Antimigratorios: Son aquellos que ayudan a prevenir la migración de fluidos durante el fraguado de la lechada de cemento. El desarrollo de estos aditivos está basado en el comportamiento de la lechada de cemento entre el estado fluido y sólido, ya que se tiene la certeza que es en ese período que el fluido puede migrar [12].

Los aditivos antimigratorios generalmente usados son los látex. Los polímeros más comúnmente usados en el látex para el cemento Portland son: resinas de estireno-butadieno (SBR), acrílicos, estireno-acrílicos, polivinil acetato (PVA) y copolímeros de vinil acetato [4].

Existen varias razones para utilizar estos polímeros como aditivos en el mezclado del cemento. Los polímeros mejoran la adhesión sobre la superficie, las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) y reducen la permeabilidad

en el cemento fraguado. Además, las partículas de látex promueven un excelente control de pérdida de fluido.

Las resinas de estireno-butadieno (SBR) presentan las mejores propiedades de adhesión de todos los polímeros mencionados, la mejor resistencia al agua y a la abrasión. Este aditivo fue identificado por Parcevaux, en 1985, como un aditivo efectivo para la prevención de migración de gas en pozos petroleros [4].

Otro grupo de polímeros empleados para el control de migración de gas, son los del tipo aniónico, los cuales están compuestos por co ó ter-polímeros derivados de la acrilamida. La poliacrilamida es no iónica y no es utilizada por sí sola en mezclas de cemento. Sin embargo se emplean copolímeros de poliacrilamida que contienen un monómero sulfonado: 2-acrilamido-2-ácido metilpropanosulfónico, para conseguir mejores resultados [4].

En la presente investigación se emplearon los dos tipos polímeros mencionados (estireno-butadieno y poliacrilamida sulfonada) en la formulación de las lechadas de cemento.

4.3 Problema de migración de gas en cementación de pozos de petróleo y/o gas.

La migración de gas consiste en el movimiento del gas que se encuentra en la formación hacia canales creados en el anular cementado. Este fluido puede migrar hacia las zonas de más baja presión o hacia la superficie (ver fig. 9).

En 1995, un estudio realizado por Westport Technology reveló que las fallas en los trabajos de cementación primaria alcanzan el 15% del trabajo total en el pozo y que aproximadamente una tercera parte de este problema corresponde a la migración de fluidos presentes en la formación, durante el período de colocación y transición del cemento [1].

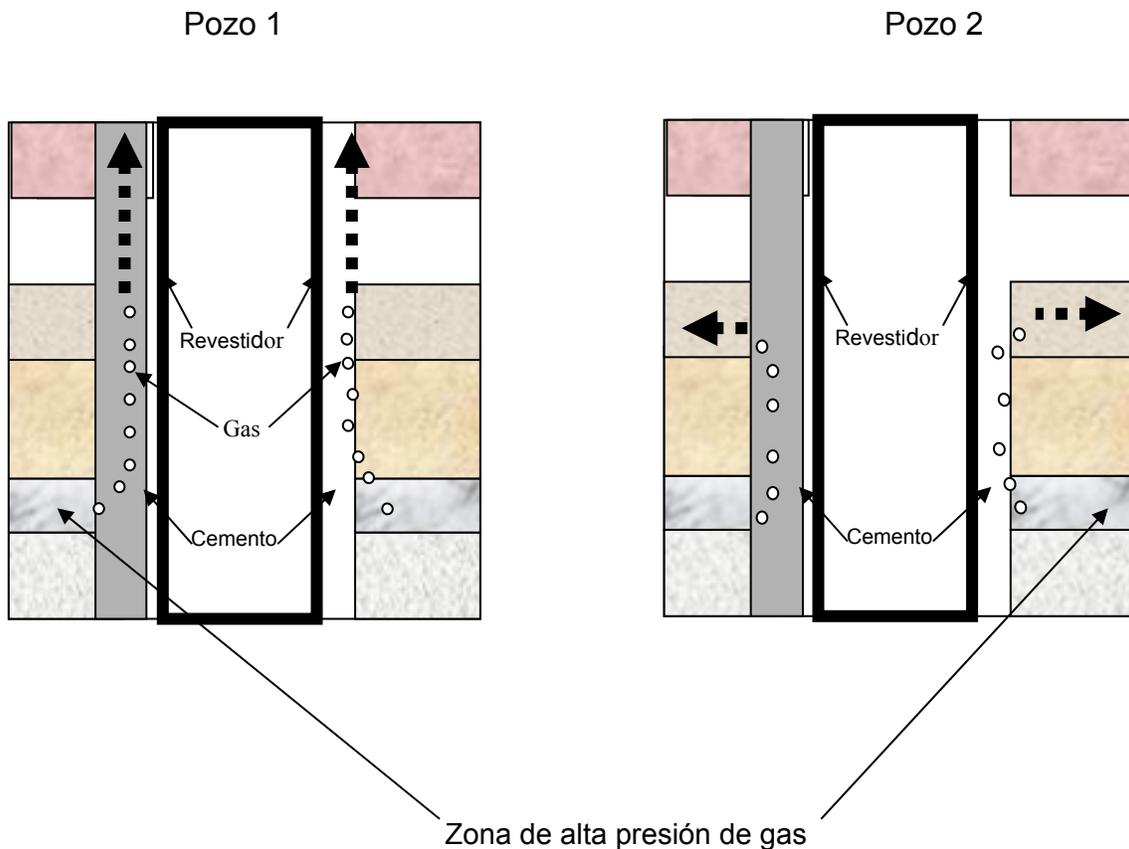


Figura 9. Dos escenarios que muestran la migración de gas en el anular cementado.

4.3.1 Posibles rutas de migración de gas en el anular.

Una vez que el gas ha entrado en el anular, este viaja a lo largo de una trayectoria hacia la superficie o dentro de otra formación permeable para completar la acción del flujo de gas. El gas fluye luego por el anular a través de tres trayectorias [21]: la interfase cemento/formación; la interfase cemento/tubería; los canales formados a través de la matriz del cemento (ver fig. 10).

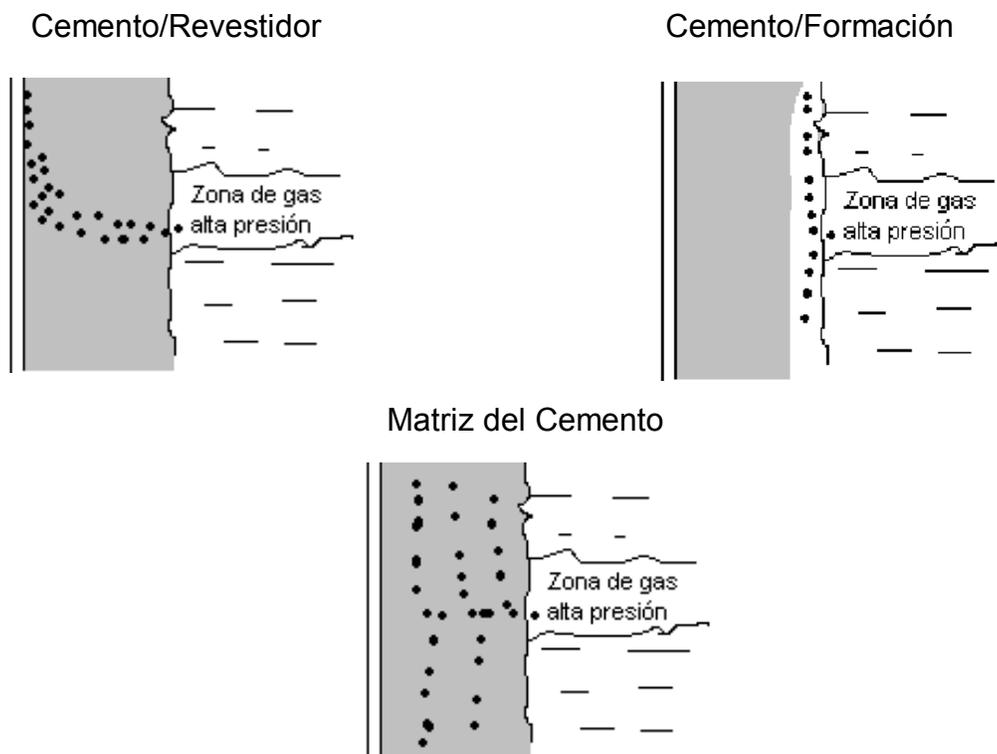


Figura 10. Posibles caminos de migración de gas [2].

Los microanulos pueden formarse en la interfase del cemento con la tubería o la formación. Estos microanulos se forman como resultado de fluctuaciones en la temperatura o la presión en el pozo durante la cementación [4]. En algunos casos, se pueden formar microanulos más grandes en la interfase cemento/tubería por

canales formados por una mala remoción del fluido de perforación durante la adhesión del cemento a la tubería o a las paredes del pozo.

4.3.2 Factores que controlan la entrada del gas presente en la formación al anular cementado

El fenómeno de migración de gas ha sido estudiado por muchos autores desde principios de los años 60 (1960), pero aún no se conoce con exactitud cómo ocurre, ya que es un fenómeno físico/químico muy complejo que depende de muchos factores.

En la literatura se encuentran reportados al menos 22 modelos diferentes para evaluar la migración de gas [2,4,21,22,23,24,25] y cada uno de ellos se basa en uno o varios parámetros en particular, los cuales pueden resumirse en los siguientes:

4.3.2.1 La pérdida de fluido del cemento a la formación adyacente.

La influencia negativa de la pérdida de fluido de la lechada de cemento hacia la formación fue reconocida por Carter y Slagle en 1970, como uno de los factores más importantes que contribuyen a que se produzca la migración de gas en el pozo [4].

Para que ocurra el proceso de deshidratación del cemento y pueda migrar el gas, debe existir una zona permeable por encima del reservorio de gas. Las partículas del cemento (torta de filtrado) se van aglomerando contra esa zona permeable por lo que no se transmite la presión hidrostática en toda la columna de cemento. Esto trae como consecuencia que la presión hidrostática comience a disminuir hasta que se iguala o se hace menor que la presión del reservorio de gas, por lo que éste comienza a entrar en el anular. (ver fig. 11)

Sabins y Sutton en 1982 reportaron la importancia de los aditivos de pérdida de fluido en la migración de gas. Los resultados de este trabajo mostraron que sin un adecuado control de pérdida de fluido, puede ocurrir la deshidratación dentro del anular [26].

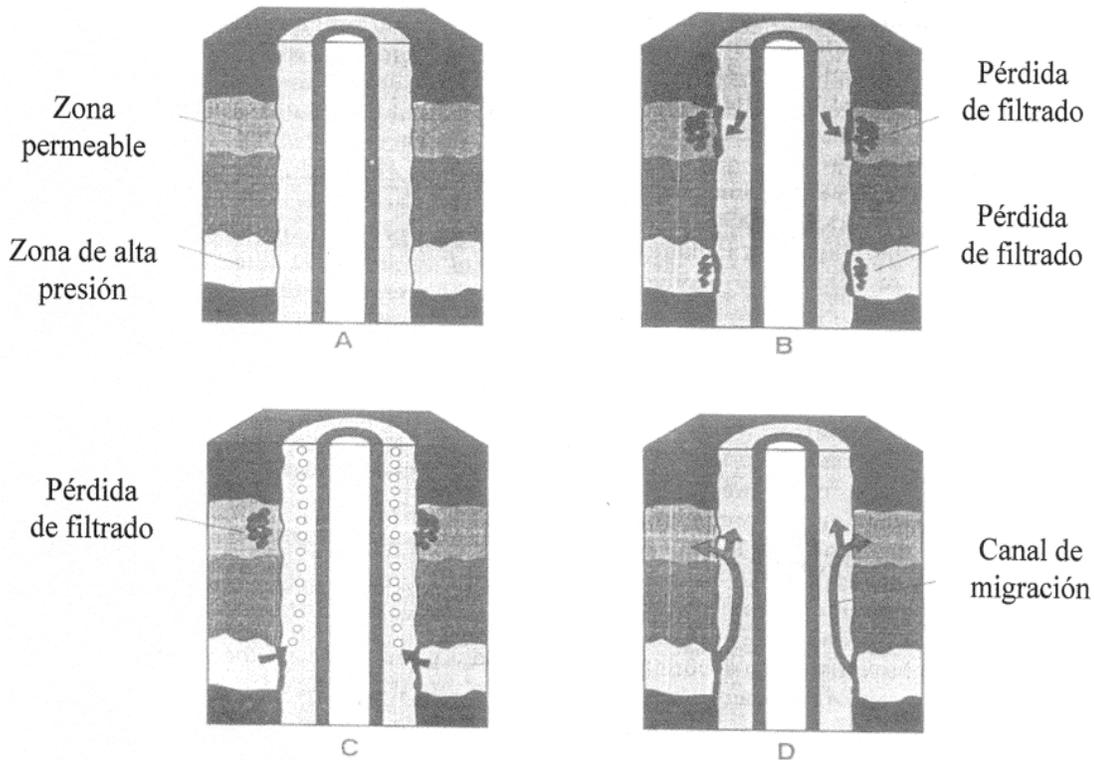


Figura N° 11. Pérdida de presión hidrostática debido a la pérdida de volumen [2].

4.3.2.2 Las pérdidas de volumen durante las reacciones de hidratación del cemento.

La reducción del volumen por la reacción de hidratación ocurre en el cemento Portland durante el proceso del fraguado. Esta pérdida resulta de la combinación química del agua y los compuestos reactivos del cemento.

La reducción de presión en la columna de lechada de cemento fue demostrada en el laboratorio por varios investigadores, incluyendo Christian (1975) y Levine (1979). Sutton (1984) presentó cálculos básicos para la tasa de

caída de presión basado en la reducción de volumen y las restricciones de presión causadas por el desarrollo de la fuerza de gel estática [4]. La ecuación para la caída de presión con la pérdida de volumen establecida fue la siguiente:

$$\Delta p = \frac{\bar{V}_{FL} + \bar{V}_H}{c} \quad \text{ec. 7}$$

La restricción de presión producida por la fuerza de gel estática es representada por la ecuación:

$$P_r = \frac{SGS \cdot 4 \cdot L_c}{(D - d)} \quad \text{ec. 8}$$

El valor de la fuerza de gel estática mínima para prevenir que el gas migre a través de la lechada de cemento es de 500 lb-f /100 ft². Esto da un valor variable de presión producida por la fuerza de gel que depende del diámetro y la longitud donde se esté estudiando el fenómeno [4]. Esta ecuación se obtiene al sustituir el valor de fuerza de gel estática mínima para prevenir la migración de gas en la ecuación 8 dando así la ecuación 9:

$$P_{R,MAX} = \frac{1.67 \cdot L_c}{(D - d)} \quad \text{ec. 9}$$

Para comparar la máxima presión posible a fin de evitar el ingreso de gas al sistema producida por la fuerza de gel estática con la presión ejercida por la zona de gas confinada en la formación, se utiliza una relación que es dada por estos dos. Este factor se llama potencial flujo de gas (GFP) y se representa en la ecuación 10.

$$GFP = \frac{P_{R,MAX}}{P_{OB}} \quad \text{ec. 10}$$

La magnitud del GFP para un pozo en específico representa el nivel de dificultad para controlar el flujo de gas a través de la lechada de cemento. Esta magnitud varia desde cero a infinito. Un pozo que presente un factor de flujo de gas de 0 a 3 tiene una formación de gas baja, si el factor está entre 3 y 8 es moderada y si es mayor a 8 es un pozo con una formación de gas alta [2].

4.3.2.3 Modificación de la permeabilidad del cemento.

Diversos métodos de control de gas basan su teoría en que algunas formulaciones de cemento desarrollan permeabilidades extremadamente altas durante el proceso de hidratación, creando de esta manera un canal de flujo a través de la matriz del cemento [2]. Así lo demostraron Cheung y Beirute [21] cuando describieron el uso de un cemento impermeable el cual opera inmovilizando los fluidos dentro de los poros del cemento. Debido a que el agua contenida en el cemento no puede ser desplazada, el gas no puede moverse dentro los poros de la lechada de cemento [4]. Así mismo Parcevaux y Drecq [27] emplearon la técnica del cemento látex impermeable señalando que éste es un efectivo y satisfactorio método para prevenir la migración de gas. Ellos encontraron algunos látex excelentes para este propósito y partieron del hecho que cuando el látex se deshidrata en los poros del cemento y las partículas coalescen forman una película impermeable al gas y a los líquidos bien distribuida dentro de la matriz del cemento. El gas es atrapado dentro de la matriz y no puede moverse [27].

Contrario a esto, en 1989 Sutton y Ravi demostraron con ecuaciones matemáticas que los canales en la columna de cemento no están vinculados con la permeabilidad de la lechada de cemento. Sin embargo algunos estudios de laboratorio indican que la permeabilidad intrínseca del cemento puede contribuir al problema de migración. Así lo demostró Backe en 1997 cuando estableció la importancia que tiene la permeabilidad en relación con el movimiento del flujo dentro y a través de los poros del cemento [28].

4.3.2.4 El desarrollo de la fuerza de gel estática dentro de la lechada de cemento.

Después que la lechada de cemento se coloca en el anular, ésta se comporta inicialmente como un fluido el cual trasmite por completo la presión hidrostática. Cuando la lechada de cemento está un tiempo estática las fuerzas iónicas pueden crear una estructura terciaria débil que posteriormente se transformará en una estructura más fuerte [2]. Esta estructura es lo que se conoce como gel, el cual se define como una estructura que posee propiedades de cohesión que pertenecen al estado sólido así como la propiedad de fluir que pertenece al estado líquido. Así mismo, es la que señala el punto en el cual la lechada de cemento comienza a cambiar de un fluido hidráulico que transmite completamente la presión hidrostática a un material sólido al cual se le puede medir la resistencia a la compresión (ver fig. 12) [29].

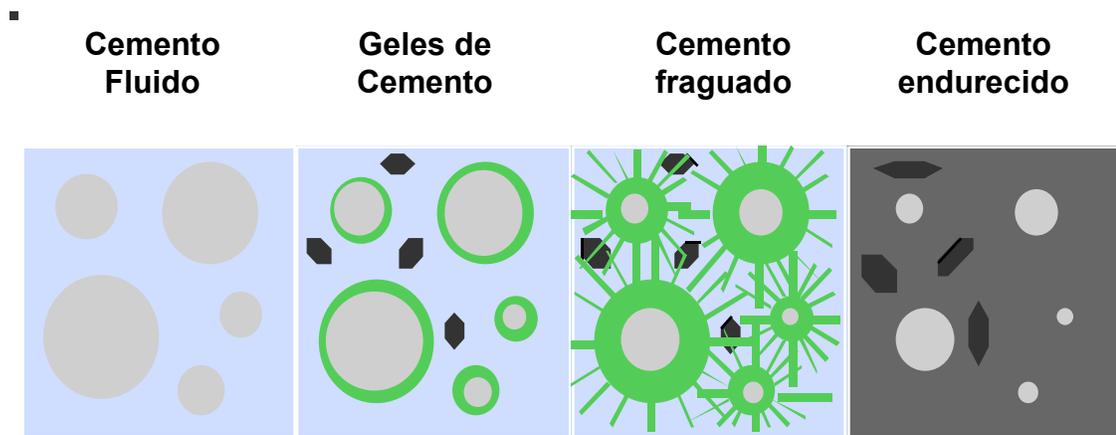


Figura N° 12. Representación del gel del cemento.

En 1980 Sabins realizó un estudio en donde cuantificó el grado de gelación en términos de fuerza de gel estática (SGS, por sus siglas en inglés), la cual definió como la medida directa de la fuerza adhesiva de un fluido a la pared del hoyo o revestidor. Así mismo introdujo el concepto de tiempo de transición como el intervalo durante el proceso de fraguado desde que la columna de lechada de

cemento comienza a perder la capacidad para transmitir toda la presión hidrostática hasta que el cemento desarrolla suficiente fuerza de gel para prevenir la entrada o migración de gas. Se ha determinado experimentalmente que este valor debe ser mínimo $500\text{lb-f}/100\text{ft}^2$ [2].

En el siguiente diagrama (ver fig. 13) se muestra claramente el efecto que tiene la gelación del cemento sobre la caída de presión hidrostática hasta el punto de potencial invasión de gas. Este es uno de los puntos de mayor interés en el estudio de migración de gas, ya que teóricamente si el cemento no posee $500\text{lb-f}/100\text{ft}^2$ en este momento, el gas puede invadirlo. Es por esta razón que se deben realizar pruebas para verificar si realmente el cemento es capaz de controlar la entrada de gas en este punto.

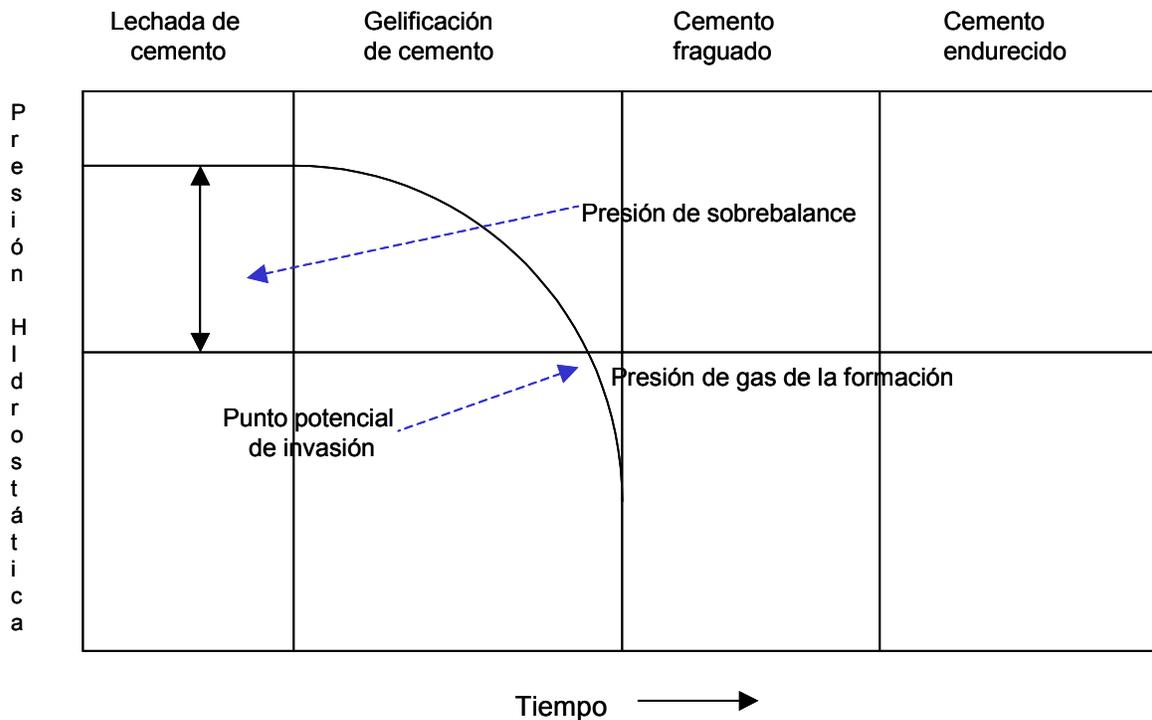


Figura N° 13. Efecto de la gelación del cemento sobre la pérdida de presión hidrostática [2].

4.3.3 Control del fenómeno de migración de gas

Para controlar el fenómeno de migración de gas se deben realizar todos los esfuerzos posibles para evitar que el gas entre dentro del anular. Para ésto se requiere mantener controlada la presión sobre el reservorio de gas y eliminar los canales por donde pueda migrar el gas.

Existen algunos métodos disponibles para prevenir la migración de gas. Estos son:

1. *Alteración de las características de la lechada de cemento.* Esto se puede lograr alterando las tres características que afectan al cemento tales como, desarrollo de la fuerza de gel estática, pérdida de fluido, o reducción de volumen [2]. Se han desarrollado algunas metodologías para crear las alteraciones necesarias. Estas incluyen el incremento del control de pérdida de fluido, ejerciendo una presión sobre el anular después que se coloca el cemento, incrementando la densidad de los fluidos en el pozo, ajustando el tiempo de espesamiento de la lechada, disminuyendo la columna de cemento, disminuyendo el tiempo de transición del cemento, incrementando la compresibilidad, o disminuyendo la permeabilidad interna del cemento. Estas técnicas se han aplicado y en algunos casos han resultado exitosas.

2. *Método mecánico.* Este método consiste en colocar un sello externo al revestidor para retener al gas en las zonas más profundas del pozo. Este es instalado en el revestidor colgante por encima de la zona de gas, y posteriormente el cemento es colocado normalmente. Cuando el cemento es colocado y aún no ha fraguado el sello expande formando un sello mecánico para el flujo de gas [2].

3. *Incremento de la presión inicial.* Este método consiste en incrementar la densidad del fluido con la finalidad de aumentar la diferencia de presión para

lograr que la formación de gas sea taponada. Así mismo se puede aplicar presión en la superficie o incrementar la densidad del fluido de perforación para crear los mismos efectos. Todo esto se debe realizar tomando en consideración los valores máximos permitidos de densidad y presión para evitar posibles fracturas sobre la formación, lo que origina ciertas limitaciones en el momento de aplicar este método.

4. *Técnicas de ensayo de laboratorio.* Existe una gran variedad de prototipos que intentan describir o simular el proceso de migración de gas. No obstante, se explicaran dos técnicas de mucha utilidad debido a su capacidad de evaluar los parámetros de control de gas bajo condiciones específicas de operación [2].

La primera de estas técnicas fue descrita por Beirute y Cheung en 1990 [21]. El dispositivo y método de ensayo fueron diseñados para evaluar la capacidad del cemento de contener gas bajo condiciones específicas de pozo. En este equipo se simula la pérdida de presión hidrostática que sufre una columna de cemento en contra de un reservorio de gas, como consecuencia del desarrollo de la fuerza de gel estática y la pérdida de volumen. La aplicación de presión desde el tope de la celda por medio del uso de un pistón simula la presión hidrostática que ejerce la columna de cemento y lodo sobre la formación de gas. Adicionalmente durante el ensayo se puede simular la temperatura de operación [2].

Para llevar a cabo la simulación, Beirute en 1982 desarrolló el método de “scale-down”, con la finalidad de evaluar los parámetros involucrados en el pozo a escala de laboratorio. Esto permitió realizar pruebas más reales de formulaciones de cemento empleadas para el control de migración de fluidos presentes en la formación después de la colocación del cemento. En este método se asume que la zona de gas estudiada tiene suficiente permeabilidad, espesor y volumen de gas para invadir completamente al anular cementado, si las condiciones lo permiten [21].

El procedimiento puede ser demostrado mejor con un ejemplo, por lo que se usarán las siguientes condiciones de un pozo imaginario: Una zona de alta presión de gas localizada a 10000 ft va a ser cementada para prevenir la migración de gas a una zona de baja presión localizada a 9900 ft. Las zonas están separadas por una zona impermeable. Para cubrir otras zonas potencialmente productivas, el tope de cemento estará a 8000ft. Los parámetros del pozo se resumen a continuación [21]:

Profundidad de la zona de alta presión de gas (7000 psi) ...	10000 ft
Profundidad de la zona de baja presión de gas (6500 psi)..	9900 ft
Tope de la columna de cemento	8000 ft
Temperatura circulante	167°F
Temperatura estática	230°F
Diámetro de la tubería	5"
Diámetro promedio del hoyo	8"
Densidad del fluido de perforación	14.5 lb/gal
Densidad de la lechada de cemento.....	16.4 lb/gal

El primer paso que se debe realizar es calcular la presión hidrostática sobre el tope de la columna de lechada de cemento debido al peso del lodo o fluido de perforación, a través de la siguiente ecuación:

$$P_m = L_m \times \rho_m \times 0.052 \quad \text{ec. 11}$$

$$P_m = 8000 \times 14.5 \times 0.052 = 6032 \text{ psi}$$

La presión hidrostática inicial sobre la zona de gas debido al lodo y a la lechada de cemento se calcula de manera similar de la siguiente ecuación:

$$P_{c_i} = P_m + L_c \times \rho_c \times 0.052 \quad \text{ec. 12}$$

$$P_{c_i} = 6032 + 2000 \times 16.4 \times 0.052 = 7738 \text{ psi}$$

Es bien entendido que cuando el cemento permanece estático en el anular después del trabajo de cementación, esta presión hidrostática inicial comienza a disminuir con el tiempo. El mecanismo por el cual ocurre esto es muy complejo, ya que es una función entre otras cosas de la fuerza de gel estática de la lechada de cemento, el control de la pérdida de fluido, así como de las condiciones de pozo, tales como presión y temperatura. Algunos investigadores han decidido simplificar el mecanismo de pérdida de presión hidrostática asumiendo, en el caso de Bannister, que el principal factor involucrado en este mecanismo es la pérdida de filtrado de la lechada de cemento [30] y en el caso de Sutton y Sabins lo atribuyeron al desarrollo de la fuerza de gel estática de la lechada de cemento [31].

Para llevar a cabo el método de “scale-down” se asumió que la pérdida de presión hidrostática es causada principalmente por el desarrollo de la fuerza de gel estática de la lechada de cemento [21]. Asumiendo ésto, la reducción de presión hidrostática en cualquier punto de la columna de cemento en función del tiempo puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$P_r = \frac{SGS \times L_c}{300 \times (D - d)} \quad \text{ec. 13}$$

Aplicando la ecuación 13 al pozo del ejemplo en estudio, se tiene:

$$P_r = \frac{SGS \times 2000}{300 \times (8 - 5)} = (2.22 \times SGS) \text{psi}$$

Para un tiempo cualquiera la presión hidrostática contra la zona de gas es la presión hidrostática inicial menos la reducción de presión debido a la fuerza de gel estática de la lechada cemento contra la zona de gas, lo cual puede expresarse de la siguiente manera:

$$Pc_t = Pc_i - P_r \quad \text{ec. 14}$$

Aplicando la ecuación 14 al pozo del ejemplo en estudio, la presión hidrostática para cualquier tiempo a 10000 ft es por lo tanto igual a:

$$Pc_t = (7738 - 2.22 \times SGS) \text{psi}$$

La disminución del diferencial de presión en el anular cementado a cualquier tiempo viene dado por:

$$Pd_t = Pc_t - P_p \quad \text{ec. 15}$$

Aplicando esta ecuación al ejemplo, se obtiene que:

$$Pd_t = 7738 - 2.22 \times SGS - 7000 = (738 - 2.22 \times SGS) \text{psi}$$

Para llevar estas mismas condiciones a escala de laboratorio, ya que sería muy dificultoso trabajar a presiones por el orden de los 7000 psi, como lo muestra el ejemplo, el método descrito propone como criterio importante establecer que el diferencial de presión tanto en el pozo como en la celda de laboratorio sean iguales. Se obtiene así, la presión de tope que hay que irle aplicando a la muestra de lechada de cemento para obtener la misma caída de presión que ocurre en el pozo [21]. La siguiente deducción nos permite llegar a la ecuación 18:

$$Pd_t(\text{pozo}) = Pd_t(\text{celda}) \quad \text{ec. 16}$$

El diferencial de presión para el pozo ya está definido por la ec. 15, por lo que faltaría definir el diferencial de presión de la celda de la siguiente manera:

$$Pd_t(\text{celda}) = P_{\text{tope}} - P_{\text{fondo}} \quad \text{ec. 17}$$

Igualando las ecuaciones 15 y 17, y despejando la presión de tope obtenemos:

$$P_{C_t} - P_p = P_{tope} - P_{fondo}$$
$$P_{tope} = P_{C_t} - P_p + P_{fondo} \quad \text{ec. 18}$$

Donde la presión de fondo de la celda es un valor arbitrario que se fija para simular el diferencial de presión deseado, cumpliéndose por supuesto que sea el mismo que el del pozo, lo que permite manejar presiones muy bajas. Así en el ejemplo mostrado se está aplicando un diferencial de presión de 738psi, el cual resulta de la diferencia de 7738psi que corresponden a la presión hidrostática inicial menos 7000psi que corresponde a la presión gas de la formación. Con el método propuesto este mismo diferencial se podría lograr si aplicáramos, por ejemplo, 1038psi por el tope correspondiente a la presión hidrostática inicial y 300 psi por el fondo correspondiente a la presión de gas de la formación. Así con la ecuación 18 se puede simular a escala de laboratorio lo que ocurre en el pozo.

Con el resultado de este ensayo se puede concluir la incidencia o prevención del flujo de gas con la identificación de los canales potenciales de gas, por lo que se puede decir que este sistema de ensayo proporciona medios reales de comparación, en relación con el control de migración de gas para lechadas de cemento de distintas composiciones bajo condiciones similares a las del pozo [2].

Las mediciones de laboratorio de la fuerza de gel estática de la lechada de cemento bajo condiciones simuladas de pozo son necesarias para estimar la caída de presión hidrostática que posteriormente se le aplicará a la columna de cemento. Para obtener dichas medidas se emplea un dispositivo, el cual está diseñado para determinar la fuerza de gel estática de una lechada de cemento. Esta segunda técnica consiste en un equipo que contiene una cámara de presión con una paleta rotativa. Esta paleta puede ser rotada a altas velocidades mientras se alcanza la temperatura y la presión en el fondo del pozo y posteriormente la paleta puede rotar lentamente (0.5-2 grados/min), esto con la finalidad de

prevenir el rompimiento de los geles mientras son detectados los cambios en la fuerza de gel estática. El valor de esta medida se obtiene a través del torque requerido para mantener la velocidad de la paleta, el cual es convertido posteriormente en valores de fuerza de gel estática (lb-f/100 ft²) [2].

4.3.4 Consecuencias que origina la migración de gas

Las consecuencias de la migración de gas son numerosas y lamentablemente éstas no se pueden detectar inmediatamente. Una de la más desastrosa es cuando la presión del gas o el flujo de gas son tan grandes que llegan a la superficie, causando generalmente la pérdida total del pozo.

La cementación remedial se realiza hasta que se logra parar el flujo de gas, y la presión del gas se reduce a niveles seguros. Sin embargo, la eficiencia de este trabajo en tal situación es muy pobre debido a que los canales de gas son difíciles de localizar. Estos pueden ser tan pequeños que no se pueden rellenar con cemento o la presión ejercida durante la cementación remedial es suficiente para causar fracturas a la formación. En general, se puede decir que los trabajos de reparación son muy costosos por lo que resulta más conveniente prevenir el problema de migración de gas que repararlo [4].

4.4 TRABAJOS PREVIOS

A continuación se presentan algunos estudios realizados en relación con las propiedades del cemento y el esfuerzo por combatir la migración de gas:

*** Relación entre el tiempo de espesamiento, la fuerza de gel estática y la resistencia a la compresión en cemento petrolero.**

En este trabajo se emplearon una gran variedad de tipos de lechadas de cemento así como un amplio rango de condiciones de pozo, con la finalidad de

establecer correlaciones entre el tiempo de espesamiento, la fuerza de gel estática y la resistencia a la compresión [26].

A todas las lechadas de cemento se les evaluaron las propiedades de acuerdo con las especificaciones API. Las pruebas de tiempo de espesamiento fueron realizadas empleando un consistómetro HTHP convencional, en el cual se ajustaron las lechadas de cemento a tiempos distintos de espesamiento. Después que se obtuvo el tiempo de espesamiento para cada prueba se les evaluó el desarrollo de la fuerza de gel estática, simulando las condiciones de trabajo. Estas medidas se realizaron empleando un diseño similar al empleado en la presente investigación (MiniMACS).

No se encontró ninguna relación positiva entre el tiempo de espesamiento y el desarrollo de la fuerza de gel estática en las lechadas de cemento. Con pocas excepciones todas las lechadas de cemento evaluadas desarrollaron valores por encima de $100\text{lb-f}/100\text{ft}^2$ en menos de veinte minutos. Los resultados obtenidos muestran que el tiempo para desarrollar una específica fuerza de gel estática está más relacionado con el tipo de la lechada que con la duración del tiempo de espesamiento [26].

*** Un procedimiento de laboratorio a baja escala para enfocarlo a condiciones específicas de pozo: La selección de formulaciones de cemento para controlar la migración de fluido después de la cementación.**

En este trabajo se propuso un método para escalar algunos parámetros relacionados con el pozo a condiciones de laboratorio, con la finalidad de que la evaluación de lechadas de cemento destinadas a controlar la invasión/migración de fluido a la formación fuera lo más real posible. Este procedimiento era necesario ya que la industria dispone de equipos de laboratorio y procedimientos que no pueden simular las condiciones en el pozo (presión hidrostática, presión de la formación de gas, y gradiente de gas a la cual el gas viaja a través de la

columna de cemento), las cuales se consideran críticas en el diseño de lechadas de cemento para esta aplicación [21].

En este trabajo se muestra detalladamente todos los principios en que se basa el método de “scale-down” así como el uso de la celda de migración de fluido, la cual es similar al equipo que se empleó en la presente investigación (FMA). Para usar este método es necesario realizar medidas de fuerza de gel estática a cada una de las lechadas de cemento, las cuales se sugiere que se obtengan según el diseño disponible en la industria. Las medidas realizadas en esta investigación se obtuvieron, sin embargo, a través de correlaciones empíricas desarrolladas para un consistómetro en particular, pero luego de varias investigaciones se llegó a la conclusión que este método no era el más idóneo.

Basados en sus experimentos, se logran establecer algunos criterios para seleccionar lechadas de cemento para ser empleadas en un pozo en particular, siendo uno de los más resaltantes el hecho que la rata de flujo de gas medida en la muestra debería ser cero, con un máximo de aproximadamente 30 ml/min, usando la celda de migración de fluido [21].

*** Correlación entre las propiedades críticas del cemento y los cambios en el volumen durante el fraguado del cemento.**

En esta investigación se estudian una serie de términos referentes a la cementación, con la finalidad de clarificar la etapa de fraguado del cemento y su capacidad para controlar el fluido interzonal. También se discuten los resultados de distintos procedimientos diseñados para medir dos o más propiedades del cemento simultáneamente, bajo condiciones simuladas de pozo. Estos procedimientos evalúan la validez de teorías y procedimientos para controlar flujo de gas en el anular, adherencia del cemento, canalización interzonal y aislamiento zona [24].

Para llevar a cabo los experimentos se realizaron algunas adaptaciones a equipos de laboratorio ya existentes e igualmente se diseñó un equipo nuevo. Esto con la finalidad de medir la interrelación entre el desarrollo de fuerza de gel estática, la reducción de volumen, las temperaturas durante la hidratación, cambios en la permeabilidad y resistencia a la compresión.

Los resultados indicaron que la reducción de volumen por hidratación durante el período de transición es relativamente pequeña y muestra una correlación general con el volumen contenido en el cemento; el incremento de temperatura durante la hidratación muestra fuerte relación con el desarrollo de la fuerza de gel estática; la permeabilidad durante el desarrollo de la fuerza de gel estática disminuye rápidamente y muestra una correlación definida con los valores de pérdida de filtrado; el encogimiento en el estado plástico es sólo una pequeña parte de la reducción de volumen por hidratación [24].

*** Modelo de migración de gas a través de lechadas de cemento.**

Con este trabajo se logra identificar un mecanismo que pudiera ser responsable de la invasión de gas dentro de la columna de cemento después de su colocación. Se desarrolló un modelo para predecir el riesgo de invasión de gas y promover en el diseño de un trabajo de cementación una lechada de cemento que desarrolle geles retardados. Este modelo provee el nivel de migración teórico absoluto cuando se conocen tanto las propiedades del cemento como los parámetros asociados a la formación [32].

En el trabajo se realizan los cálculos para la caída de presión hidrostática, para la estimación de la rata de ingreso de fluido debido a la contracción y la filtración en el cemento y para la descripción del proceso de ascenso de la burbuja a través de la matriz del cemento.

*** Estudio paramétrico de la invasión de gas dentro del anular cementado.**

En este trabajo se estudiaron los parámetros que afectan la entrada de gas dentro del anular cementado. Así mismo se incorpora un estudio detallado de los factores que contribuyen a la invasión de gas desde el tiempo de colocación inicial de la lechada de cemento, a través del estado de gelación o transición, hasta la condición de fraguado del mismo [23].

Basado en el estudio de los procesos involucrados en la invasión de gas, se desarrolló un simulador que puede predecir la cantidad de gas que entra en el anular cementado y puede identificar los parámetros críticos que afectan la invasión de gas.

A partir de este estudio se concluyó, entre otras cosas, que la fuerza de gel estática de la lechada de cemento es una propiedad crítica que afecta la invasión de gas dentro del anular cementado. Así mismo, se concluyó que la lechada de cemento que tenga una tendencia de crecimiento de geles retardados es más preferible que una lechada que tenga una tendencia de crecimiento de geles lentos [23].

*** Caracterización de las lechadas de cemento por permeabilidad, fuerza a la tensión y encogimiento.**

Este trabajo fue realizado para obtener más conocimiento acerca del período de transición de la lechada de cemento una vez colocado en el pozo. Los resultados muestran que las propiedades que se evaluaron son una función de la temperatura y que existe una correlación entre la contracción del cemento con respecto a su contenido [28].

Se propuso un mecanismo para evaluar la migración de gas así como se dedujo un factor a partir de la combinación de valores obtenidos por permeabilidad

y presión hidrostática, el cual caracteriza la capacidad de la lechada de cemento para resistir la migración de gas. Se pudo concluir la importancia que tiene que la lechada de cemento presente un período de transición corto [28].

*** Método acústico para determinar la fuerza de gel estática de las lechadas de cemento.**

Este estudio describe el descubrimiento de que cuando las lechadas de cemento desarrollan la fuerza de gel estática, la atenuación de una señal acústica de alta frecuencia transmitida a través de la lechada de cemento disminuye. Este cambio en la amplitud se relaciona con la fuerza de gel estática de la lechada de cemento [29].

A partir de este descubrimiento se desarrolla un método acústico y un sistema para determinar la fuerza de gel estática de una muestra de cemento, lo que provee una medida continua, precisa y no mecánica de la fuerza de gel estática de la muestra de lechada de cemento. Las medidas se realizaron a temperaturas y presiones de pozo, por encima de 400°F y 20.000 psi y se determinó que las medidas ultrasónicas pueden ser usadas para determinar la fuerza de gel estática empleando correlaciones que involucren la atenuación de la señal con la fuerza de gel estática [29].

5. PARTE EXPERIMENTAL

Para establecer un criterio con respecto a las propiedades que influyen en el fenómeno de la migración de gas se hizo necesario evaluar, a nivel de laboratorio, el desarrollo de la fuerza de gel estática y el control de la migración de gas. Para ello se mantuvo entre las distintas formulaciones de lechadas de cemento estudiadas una gran similitud con respecto a las otras propiedades involucradas.

Esto permitió determinar la influencia del desarrollo de geles en el control de la migración de gas, a pesar que propiedades como: filtrado estático, tiempo de espesamiento, agua libre, entre otras, se mantuvieron controladas.

5.1 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

5.1.1 Equipos

Balanza electrónica, Marca Mettler, Modelo PM2000: Utilizada para pesar los aditivos del cemento según su formulación. La carga indicada en las balanzas debe ser precisa con un error de ± 0.1 por ciento de la carga indicada.

Mezcladora, Marca Chandler Engineering Company, Modelo 3060-110V: La mezcladora utilizada para la preparación de las lechadas de cemento posee un tamaño aproximado de un cuarto de galón, consta de una cuchilla tipo mezclador y una unidad inferior. El recipiente para el mezclado y la cuchilla son de un material resistente a la corrosión. El ensamblaje del mezclador está diseñado para que la cuchilla pueda separarse de la unidad del mecanismo mezclador.

Este equipo opera a dos velocidades que simulan el mezclado y homogenización de la lechada de cemento, 4000 ± 200 rpm y 12000 ± 500 rpm respectivamente, según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B [3].

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 la norma API Spec. 10B [3]. Este equipo consta de una copa de volumen fijo, en el cual se introduce la muestra de lechada de cemento y se tantea con los pesos que contiene, hasta que se equilibre la copa. En ese instante se lee directamente el valor de la densidad en lb/gal.

En esta balanza la muestra de la lechada de cemento es colocada bajo presión en una copa de volumen fijo, con la finalidad de minimizar el efecto del aire entrampado en las mediciones de la densidad, de manera tal que es posible obtener una medición de la densidad igual a la que se obtendría bajo las condiciones de fondo de pozo.

Consistómetro presurizado, Marca Chandler Engineering Company, Modelo Cp7: Utilizado para predecir el tiempo en que la lechada de cemento es bombeable dentro del pozo a presión y temperaturas simuladas, según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B [3].

El equipo consiste básicamente en un recipiente cilíndrico rotatorio para la lechada de cemento, el cual posee un ensamblaje de paleta fija. Todos los elementos están contenidos en un recipiente capaz de resistir las presiones y temperaturas del pozo. El espacio entre el recipiente de la lechada de cemento y las paredes del recipiente de presión es llenado con un aceite de hidrocarburo. El aceite seleccionado debe tener las siguientes propiedades físicas [3]:

Viscosidad: 49-350 SSU @ 100 °F

Calor específico: 0.5-0.58 Btu/lb^x°F

Conductividad térmica: 0.0685-0.0770 Btu/hxft² x(°F/ft)

Gravedad específica: 0.85-0.91

También se cuenta con un elemento de calentamiento capaz de elevar la temperatura de baño de aceite a la tasa de al menos 5°F por minuto. El recipiente para la lechada de cemento gira a una velocidad de 150 ± 15 rpm. La paleta y todas las partes del recipiente de la lechada de cemento, expuestas a la misma, son fabricadas con materiales anti-corrosivos.

Cámara de curado presurizada, Marca Chandler Engineering Company, Modelo CC1: Utilizada para llevar (envejecer) la lechada de cemento a la presión y temperatura de pozo, con la finalidad de determinar posteriormente la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la sedimentación de la muestra estudiada.

La lechada de cemento es colocada en moldes ya preparados, los cuales se introducirán en el recipiente de curado presurizado a la temperatura deseada para iniciar la prueba (normalmente 80 ± 5 °F). Se aplica calor y presión (3000psi máximo) de acuerdo al programa de la prueba y se deja la muestra por un lapso de veinticuatro horas [3].

Prensa mecánica, Marca Shimadzu, Modelo UH-20A: Utilizada para determinar la resistencia a la compresión de la muestra de cemento. El ensayo realizado en equipo es destructivo. En equipo se puede desarrollar pruebas de tensión, compresión e inflexión sobre materiales metálicos.

El sistema de carga hidráulica de la máquina posee un amplio rango de control el cual permite ajustar la velocidad y la carga aplicada a la misma. La carga aplicada a un espécimen es detectada como un cambio en la presión de aceite dentro del cilindro, y es convertida en una señal de voltaje por una celda de presión de alta precisión y un amplificador de alto desempeño. Esta señal analógica es convertida luego en una señal digital, la cual es mostrada en pantalla en unidades de toneladas-fuerza (tF).

Consistómetro atmosférico, Marca Chandler Engineering Company, Modelo 1250: Empleado para acondicionar la lechada a la temperatura circulante de pozo, a la cual se le determinará posteriormente la reología, pérdida de fluido y el fluido libre. Adicionalmente se empleó a temperatura y presión atmosférica con la finalidad de simular el proceso de premezclado de las lechadas de cemento que se evaluaron en el MiniMACS y FMA.

Este equipo consiste en un baño de agua, en el cual se pueden introducir dos contenedores con lechada de cemento. Así mismo posee un controlador de temperatura el cual funciona también como un indicador de temperatura digital. La velocidad del motor viene colocada de fábrica a 150rpm pero posee un control de velocidad variable la cual permite ajustar el valor de la misma. Las unidades de consistencia de la lechada del cemento son indicadas directamente sobre el marcador que se encuentra en la tapa del tope de cada uno de los contenedores.

Viscosímetro, Marca Chandler Engineering Company, Modelo 35: La viscosidad plástica, el punto cedente y el esfuerzo de corte a 1rpm de la lechada de cemento según la formulación se determinaron empleando el viscosímetro rotacional. Con este tipo de viscosímetro la lechada de cemento es confinada entre dos cilindros concéntricos de radio R_1 y R_2 ($R_1 > R_2$), uno de los cuales, el rotor, está rotando a una velocidad rotacional constante. La rotación del rotor en presencia de la muestra produce un torque el cual es generalmente medido en el interior del cilindro. El radio del cilindro debe ser tal que la muestra esté homogénea y que el esfuerzo de corte sea tan uniforme como sea posible. Los valores obtenidos de velocidad rotacional y torque son convertidos a tasa de corte y esfuerzo de corte empleando correlaciones adecuadas, con la finalidad de seleccionar el modelo reológico más adecuado (plástico de Bingham o Ley de Potencia). Esto se logra graficando la tasa de corte vs. el esfuerzo de corte y se elige el modelo con el mejor coeficiente de ajuste (R^2) [3]. En el apéndice A se muestra en detalle la figura del equipo.

Cámara de filtrado, Marca OFI, Modelo PCA: Esta cámara es utilizada para medir la pérdida de filtrado en la lechada de cemento según su formulación y la misma consiste en una celda de filtrado de 500 ml, la cual está diseñada para operar a altas presiones y temperaturas. La misma es presurizada con nitrógeno debido al gran volumen de gas requerido para conducir la prueba.

La temperatura se ajusta por medio de una perilla anexa al termostato. La temperatura de la chaqueta de calentamiento o de la pared se mide insertando una termocupla dentro de la celda. Esta prueba se lleva a cabo introduciendo en la celda la muestra de lechada de cemento, a la cual se le aplica una presión de 1000psi. Sobre una balanza analítica se va recogiendo el filtrado en un envase de 250ml hasta cumplir 30 minutos o hasta que la lechada de cemento se deshidrate en un tiempo menor al especificado [3].

Cilindro graduado de 250ml: Utilizado para estimar el agua libre en la lechada de cemento según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B [3].

Sistema Mini Multiple Analizador de Cemento (MiniMACS), Marca Halliburton: Este equipo está programado para realizar dos funciones, las medidas de tiempo de espesamiento y las de fuerza de gel estática de la lechada de cemento. En el presente estudio se empleó para determinar la fuerza de gel estática de las lechadas de cemento. Este aparato mide la fuerza de gel estática después de un período de agitación que simula la colocación de la lechada de cemento.

El equipo está diseñado para operar a una temperatura máxima de 500 °F y una presión máxima de 20000 psi. La baja fricción en el disco magnético permite que la lechada de cemento sea agitada mientras se muestran los valores de consistencia durante el período de agitación. Después de simular el período de colocación, el motor se apaga y comienza a girar a una velocidad muy baja (0.5 a 2 grados/min). La fuerza de gel estática es determinada midiendo continuamente

el torque requerido para rotar la paleta a dicha velocidad. La fuerza de gel estática es posteriormente calculada del torque medido y de la geometría de la paleta. El movimiento lento de la paleta permite medir la fuerza de gel estática sin inhibir el desarrollo de los geles [33]. Una descripción un poco más detallada del equipo se encuentra en el apéndice B.

Analizador de Migración de Fluido (FMA), Marca Chandler Engineering Company, Modelo 7150: Utilizado para medir la pérdida de fluido y la migración de gas en la lechada de cemento. La celda del FMA posee el mismo diámetro interno que una celda de pérdida de fluido HTHP API. En el tope de la celda se encuentra un pistón hidráulico el cual es presurizado con agua para simular el efecto de la presión hidrostática sobre el cemento. El filtrado de la lechada de cemento se recoge en el fondo de la celda a través de una malla estándar de pérdida de fluido de 325 mesh. La presión de poro de formación y la entrada del fluido se simula en el fondo de la celda. La migración de fluido a través del cemento es monitoreada usando un transductor de presión. También se simula en la celda, el diferencial de presión contra el cemento, motivando la migración de fluido [34]. Una descripción un poco más detallada de la celda se encuentra en el apéndice C

5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.2.1 Preparación de las lechadas de cemento

Para realizar el estudio de las propiedades antimigratorias en las lechadas de cemento, se emplearon dos formulaciones distintas usadas comercialmente para prevenir la migración de gas y que denominamos sistemas A y B. Igualmente se emplearon los respectivos Blancos, los cuales se definen en trabajo como aquella lechada de cemento que no posee propiedades antimigratorias. Sin embargo su formulación fue ajustada para que cumpliera con los requerimientos mínimos exigidos para realizar un trabajo de cementación, y a éstos los denominamos

Blancos A y B. Esto se realizó con la finalidad de fijar un punto de referencia y poder establecer diferencias entre el comportamiento de las lechadas de cemento cuando se les agrega o no aditivos antimigratorios.

En las tablas 2, 3, 4 y 5 se muestran los componentes y cantidades de los aditivos empleados para preparar 600 ml de cada una de las lechadas de cemento evaluadas a condiciones HTHP, temperatura estática de 250°F y presión de 7500 psi.

La metodología empleada para la preparación de las lechadas es la descrita por las especificaciones API Spec. 10B [3]. Estos sistemas son el resultado de ajustar ciertas propiedades de las lechadas de cemento para que todas cumplan con características similares. Esto se logró caracterizándolas, siguiendo igualmente las especificaciones anteriores así como las recomendadas por buenas prácticas de laboratorio.

Tabla 2. Sistema A para la lechada de cemento con propiedades antimigratorias.

ADITIVO	FUNCIÓN	PORCENTAJE (% p / p)
CEMENTO DICKEROFF API CLASE G	-----	51.30
POLIESTIRENO-BUTADIENO	PREVENIR MIGRACIÓN DE	9.10
SÍLICE CRISTALINO	EVITAR RETROGRESIÓN	17.96
POLINAFTALENO SULFONATO DE SODIO	DISPERSAR	0.11
LIGNOSULFONATO DE SODIO + ACIDO HIDROXICARBOXILICO (ÁCIDO CÍTRICO, GLUCOHEPTÓNICO O GLUCÓNICO)	RETARDAR	0.02
POLIPROPILENGLICOL	CONTROLAR LA ESPUMA	0.14
POLIOL AROMATICO AMINATADO	ESTABILIZAR	0.48
AGUA	-----	20.85

Tabla 3. Blanco del Sistema A para la lechada de cemento sin propiedades antimigratorias.

ADITIVO	FUNCIÓN	PORCENTAJE (% p / p)
CEMENTO DICKEROFF API CLASE G	-----	51.02
SÍLICE CRISTALINO	EVITAR RETROGRESIÓN	17.86
POLINAFTALENO SULFONATO DE SODIO	DISPERSAR	0.10
POLIPROPILENGLICOL	CONTROLAR LA ESPUMA	0.14
CLORURO DE SODIO	CONTROLAR FILTRADO	4.40
AGUA	-----	26.50

Tabla 4. Sistema B para la lechada de cemento con propiedades antimigratorias.

ADITIVO	FUNCIÓN	PORCENTAJE (% p/ p)
CEMENTO DICKEROFF API CLASE G	-----	51.22
POLIMERO DE ACRILAMIDA SULFONADO	PREVENIR MIGRACIÓN DE GAS	0.36
SILICE CRISTALINO	EVITAR RETROGRESIÓN	17.93
COPOLIMERO DE ACRILAMIDA MODIFICADO	CONTROLAR FILTRADO	0.51
POLÍMERO SINTETIZADO O COPOLIMERO	RETARDAR	0.04
AGUA	-----	29.95

Tabla 5. Blanco del Sistema B para la lechada de cemento sin propiedades antimigratorias.

ADITIVO	FUNCIÓN	PORCENTAJE (% p / p)
CEMENTO DICKEROFF API CLASE G	-----	50.11
SILICE CRISTALINO	EVITAR RETROGRESIÓN	17.54
POLIMERO ACRILICO	CONTROLAR FILTRADO	1.50
COPOLIMERO DE ACRILAMIDA MODIFICADO	CONTROLAR FILTRADO	0.50
CLORURO DE CALCIO	ACELERAR	1.17
SAL ACIDA SULFONICA	DISPERSAR	0.15
AGUA	-----	28.97

5.2.2 Condiciones a las que se evaluaron los distintos sistemas.

Para realizar el estudio de las propiedades, el desarrollo de la fuerza de gel estática así como de la evaluación de la migración de gas en las lechadas de cemento se hizo indispensable plantear un pozo con condiciones reales, tal como se mostró en ejemplo de la sección 4.3.3. Es importante resaltar que las condiciones de trabajo son bastante fuertes para manipular los equipos en el laboratorio, pero con esto se quiso acercar lo más posible a las condiciones reales del pozo.

Las condiciones de pozo que se plantearon para evaluar el comportamiento de las lechadas de cemento para un diferencial de presión de 500psi son las siguientes (ver figura 14):

Profundidad de la zona de alta presión de gas (7000 psi)	10500 ft
Profundidad de la zona de baja presión de gas (6500 psi) ...	10300 ft
Tope de la columna de cemento	8904 ft
Temperatura circulante	180°F
Temperatura estática	250°F
Diámetro de la tubería	5,5"
Diámetro promedio del hoyo	8"
Densidad del fluido de perforación	14.5 lb/gal
Densidad de la lechada de cemento.....	15.5 lb/gal
Tiempo de colocación de la lechada de cemento	3h:30min

El siguiente pozo muestra las condiciones de profundidad y presión a las cuales se encuentran las diferentes zonas involucradas en el mismo.

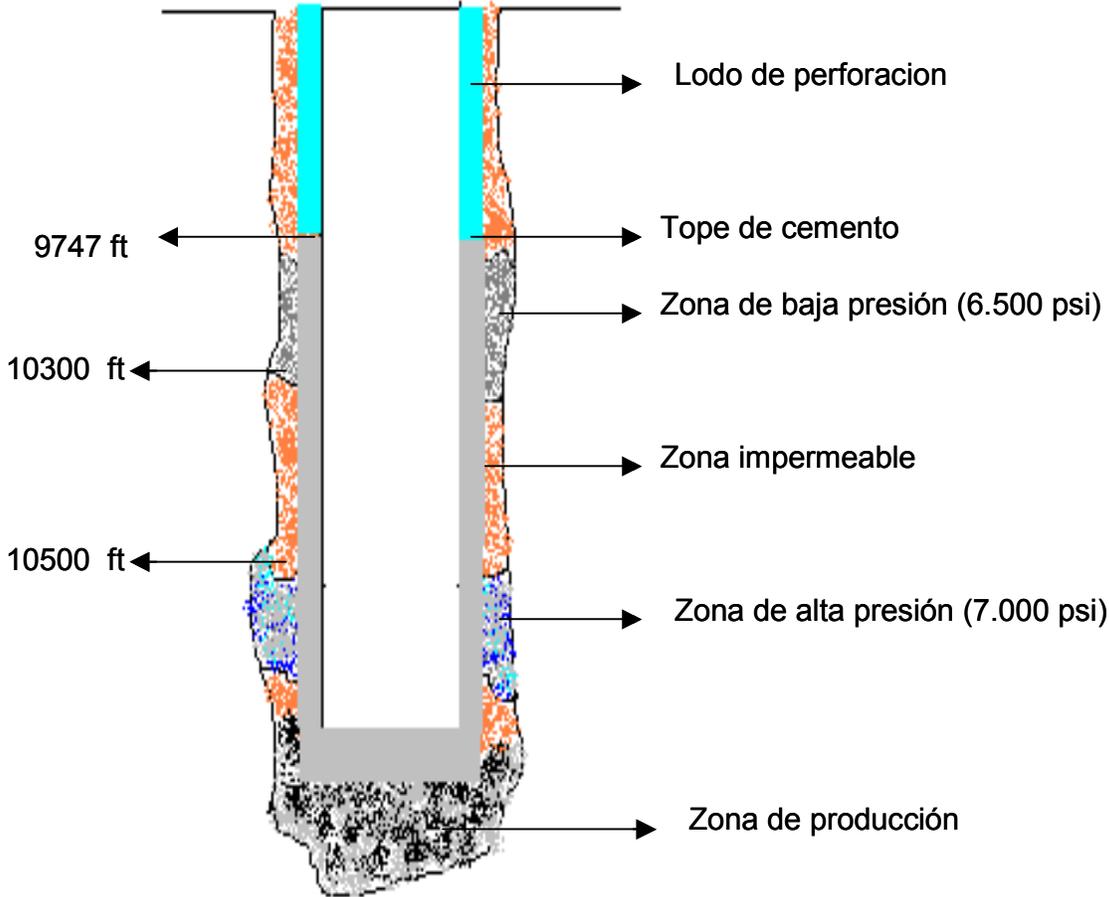


Figura 14. Condiciones de pozo

5.2.3 Caracterización de las lechadas de cemento según especificaciones API.

Determinación de la densidad de la lechada: La densidad se determinó a temperatura ambiente, según procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3].

Determinación de la reología: La reología se determinó empleando primero el consistómetro atmosférico, en el cual se acondicionó la lechada de cemento durante veinte minutos a la temperatura circulante de pozo, BHCT=180°F. Posteriormente se empleó el viscosímetro a las mismas condiciones, según procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3].

Determinación de la pérdida de filtrado: Se empleó la celda de filtrado siguiendo el procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3]. La prueba se realizó a la temperatura circulante de pozo, BHCT= 180°F y a un diferencial de presión de 1000 psi.

Determinación del tiempo de espesamiento: El tiempo de espesamiento se ajustó hasta que las lechadas de cemento alcanzaran 100 unidades Barden (Bc), valor en el cual dicha lechada no es bombeable. La prueba se realizó a la temperatura circulante de pozo, BHCT= 180°F y a presión de 7500 psi, según procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3].

Determinación del fluido libre: El fluido libre se obtuvo acondicionando previamente en el consistómetro atmosférico la lechada de cemento durante veinte minutos a la temperatura circulante de pozo, BHCT=180°F. Posteriormente se midió el agua retenida en la superficie de la lechada de cemento según procedimiento descrito en las normas API Spec.10B [3].

Determinación de la sedimentación: La sedimentación se determinó acondicionando previamente la lechada de cemento en la cámara de curado durante veinticuatro horas a la temperatura estática, BHST= 250°F y presión de 3000 psi, según procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3]. Se emplearon celdas cilíndricas las cuales se dividieron posteriormente en tres partes, con la finalidad de determinarle la densidad a cada una de las partes.

Determinación de la resistencia a la compresión: La resistencia a la compresión se determinó a la temperatura estática, BHST= 250°F y presión de 3000 psi, según procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3]. Se emplearon celdas cúbicas a las cuales se les aplicó posteriormente una carga hasta que el cubo de cemento se rompiera, y con este valor y el área del cubo se obtuvo la resistencia a la compresión en psi.

Determinación de la permeabilidad: La permeabilidad se midió empleando un permeámetro de cemento, a la temperatura estática, BHST= 250°F y presión de 3000 psi, según procedimiento descrito en las normas API Spec. 10B [3].

Una vez que las lechadas de cemento se caracterizaron según las normas API Spec. 10B [3], para realizar el estudio de las propiedades antimigratorias, se emplearon dos metodologías disponibles comercialmente que permiten determinar dichas propiedades en las lechadas de cemento a nivel de laboratorio, las cuales fueron descritas anteriormente. Adicionalmente se intentó obtener fuerza de gel estática empleando otra metodología (viscosímetro rotacional) debido a problemas con una de las metodologías disponibles (MiniMACS).

5.2.4 Pruebas para evaluar la fuerza de gel estática a las lechadas de cemento

Se obtuvo el desarrollo de la fuerza de gel estática en función del tiempo sólo para las lechadas de cemento antimigratorias (sistemas A y B), mediante el MiniMACS, a la temperatura estática BHST=250°F y 7500psi de presión. Las pruebas se realizaron acondicionando la lechada de cemento previamente en el consistómetro atmosférico durante treinta minutos a T= 80°F, y posteriormente se determinó el desarrollo de gel de las mismas.

Para realizar ésta prueba se siguió detalladamente el procedimiento especificado en el apéndice B. Estas medidas se emplearon posteriormente para determinar la caída de presión que sufre la lechada en función del tiempo, lo cual permitió que se realizara la simulación en el FMA.

Como se mencionó anteriormente, sólo se pudo obtener la fuerza de gel estática de los sistemas A y B y esto fue debido principalmente a problemas de diseño que presentó el equipo.

A continuación se mencionan algunos de las principales fallas que presentó el equipo y que nos condujeron a emplear una metodología alternativa, que nos permitiera culminar con los objetivos planteados:

1. El equipo no lograba mantener la presión durante toda la prueba, lo que traía como consecuencia que constantemente la bomba realizara su trabajo para remediar ésta falla. Esto causaba vibraciones en todo el equipo y específicamente al traductor, lo que impedía que se realizara la lectura de fuerza de gel estática. Mientras el equipo vibraba, la lectura era cero y una vez recuperada la presión, el mismo tardaba en recuperar la lectura de SGS. Es importante resaltar que la bomba se encuentra justo debajo del traductor, motivo por el cual se supone que pudiera ser una falla de diseño.

2. La parte mecánica del equipo, en la cual existe un ensamblaje entre la paleta que ejerce un torque sobre la lechada de cemento contenida en el recipiente y el mecanismo que hace girar la misma, no es la adecuada debido a que el vástago de la paleta se dobla una vez acoplados. Esto origina que se midan valores de fuerza de gel estática erróneos.

3. La parte electrónica, la cual se encarga de traducir el valor del torque medido en unidades de fuerza de gel estática, y que se encuentra integrada con la parte mecánica del equipo, sufrió daños irreversibles los cuales impidieron finalmente culminar las pruebas planteadas. Esto posiblemente debido a salpicaduras de agua o al vapor que se genera cuando el sistema se enfría y que están en contacto directo con la misma. Esto pareciera también una falla de diseño, ya que la parte electrónica debería estar aislada del resto del equipo para evitar daños durante la operación del mismo.

Al parecer aspectos de diseño no se tomaron en consideración dada la sensibilidad de la medida. La fuerza de gel estática se mide haciendo girar la paleta a velocidades de 0.5 – 2 grados/min y cualquier vibración puede desajustar la paleta perdiéndose la lectura de la misma. Por lo que se considera que el MiniMACS es un equipo rústico, que provoca muchas perturbaciones al sistema, lo que impide (a pesar que es uno de los equipos en donde menos se rompe el gel del cemento debido a la baja rotación de la misma) que se realice eficientemente la medición.

Debido a lo antes expuesto, se propuso el empleo de otra metodología para obtener la fuerza de gel estática de las lechadas de cemento sin propiedades antimigratorias (Blancos de los sistemas A y B). En un esfuerzo por obtener estos valores se intentó establecer un vínculo entre las unidades reportadas por un viscosímetro rotacional ($\text{lb-f}/100 \text{ ft}^2$) y por el MiniMACS ($\text{lb-f}/100 \text{ ft}^2$). Esto se fundamentó en un estudio realizado por Moon en 1999, en donde definió fuerza de gel estática como el esfuerzo de corte que se origina en la cercanía de las paredes

del pozo debido a la presión ejercida sobre la columna de cemento. Esta puede expresarse en unidades de esfuerzo de corte ($\text{lb-f}/100 \text{ ft}^2$) [29]. En otras palabras, las medidas del viscosímetro rotacional permiten que a una tasa de corte dada se determine el esfuerzo de corte. Similarmente, el MiniMACS a una tasa de corte muy baja determina valores de SGS. La diferencia radica en que la menor tasa de corte en el viscosímetro rotacional empleado es de 1rpm mientras que en el MiniMACS es de $5,6 \cdot 10^{-3}$ rpm, es decir 178 veces mayor la primera con respecto a la última. Esto nos indica que cuantitativamente no se pueden reproducir los valores obtenidos por el MiniMACS en el viscosímetro rotacional, pero si se puede establecer una tendencia entre las lechadas de cemento si se les evalúa a la misma tasa de corte.

Para corroborar la afirmación antes expuesta, se evaluó el esfuerzo de corte de los sistemas A y B a condiciones similares a las anteriores (se realizó el mismo acondicionamiento y se sometió a $\text{BHST}=200^\circ\text{F}$ y presión atmosférica) y se comparó con el resultado obtenido empleando el MiniMACS. Se observaron las mismas tendencias, motivo por el cual se evaluaron igualmente los Blancos de los sistemas A y B con ésta metodología. Esto sólo nos permitió establecer comparaciones basándonos en las tendencias de las lechadas de cemento cuando se les agrega o no aditivos antimigratorios, y es por ésta razón que estos valores no se emplearon para realizar la simulación en el FMA.

La metodología aplicada consistió básicamente en aplicar una tasa de corte constante de 1rpm sobre la muestra de lechada de cemento, previamente acondicionada en el viscosímetro atmosférico, y leer directamente el valor de esfuerzo de corte en intervalos de 15 minutos aproximadamente (esto con la finalidad de evitar el rompimiento del gel lo mayor posible) hasta obtener un valor de $300 \text{ lb-f}/100 \text{ ft}^2$ (limitación del equipo). Posteriormente se realizó un ajuste de las curvas obtenidas con la finalidad de estimar el tiempo en que se alcanzan $500 \text{ lb-f}/100 \text{ ft}^2$.

5.2.5 Pruebas para evaluar la migración de gas a las lechadas de cemento

Estas pruebas se realizaron con la finalidad de verificar si existe migración de gas en el punto de potencial invasión de gas en las lechadas de cemento evaluadas. Para ello se trabajó a las mismas condiciones de temperatura a las cuales se determinó el desarrollo de los geles, BHST=250°F y con un diferencial de presión en la columna de cemento de 500 psi. Para realizar ésta prueba se siguió detalladamente el procedimiento especificado en el apéndice C.

Los cálculos para obtener los valores de presión de confinamiento y caída de presión en función del tiempo se presentan en el apéndice C.

Como se explicó en la sección anterior, los valores obtenidos en el viscosímetro rotacional no se emplearon para realizar la simulación en el FMA. Sin embargo, para evaluar el control de migración de gas de los Blancos de los sistemas A y B se mantuvo la presión hidrostática inicial constante por un tiempo mayor que sus respectivos sistemas, ya que la tendencia indica que estos sistemas desarrollan geles más tarde. Posteriormente, en un instante determinado se bajó la presión totalmente (siendo la presión hidrostática menor que la presión de la formación) y se verificó si había migración de gas.

Realizando la prueba de ésta manera se está sometiendo la muestra de lechada de cemento a mejores condiciones de las que realmente posee. Manteniendo la presión hidrostática constante se está ayudando físicamente a que la lechada de cemento controle la entrada de gas. Asegurando de ésta forma que si no controla migración de gas, disminuyendo la presión hidrostática menos la controlaría.

6. PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 CARACTERIZACION DE LAS LECHADAS DE CEMENTO

Para caracterizar las lechadas de cemento algunas propiedades fueron ajustadas y otras medidas. Las propiedades que se ajustaron fueron reología, pérdida de fluido y tiempo de espesamiento, esto con la finalidad de que todas las lechadas de cemento evaluadas cumplieran con las mismas especificaciones. Las propiedades que se midieron fueron agua libre, resistencia a la compresión, sedimentación y permeabilidad ya que éstas son propiedades características de cada formulación.

6.1.1 REOLOGÍA DE LAS LECHADAS DE CEMENTO EVALUADAS

En la tabla 6 se muestran los valores reológicos obtenidos de las lecturas del viscosímetro, descrito en la sección 5.1.1, para las distintas formulaciones de lechada de cemento evaluadas.

Tabla 6. Reología de las lechadas de cemento @ 180°F (BHCT).

LECHADAS DE CEMENTO				
	Sistema A	Blanco del Sistema A	Sistema B	Blanco del Sistema B
Tasa de Corte (rpm)	Lectura leída	Lectura leída	Lectura leída	Lectura leída
1	10	2	30	4
2	12	2	32	6
3	12	3	36	7
6	13	4	39	10
10	12	8	45	13
20	19	12	59	19
30	20	17	80	27
60	25	31	110	42
100	31	48	146	66
200	44	92	205	105
300	56	126	270	140

En la figura 15 se muestra la representación gráfica de los resultados presentados en la tabla 6

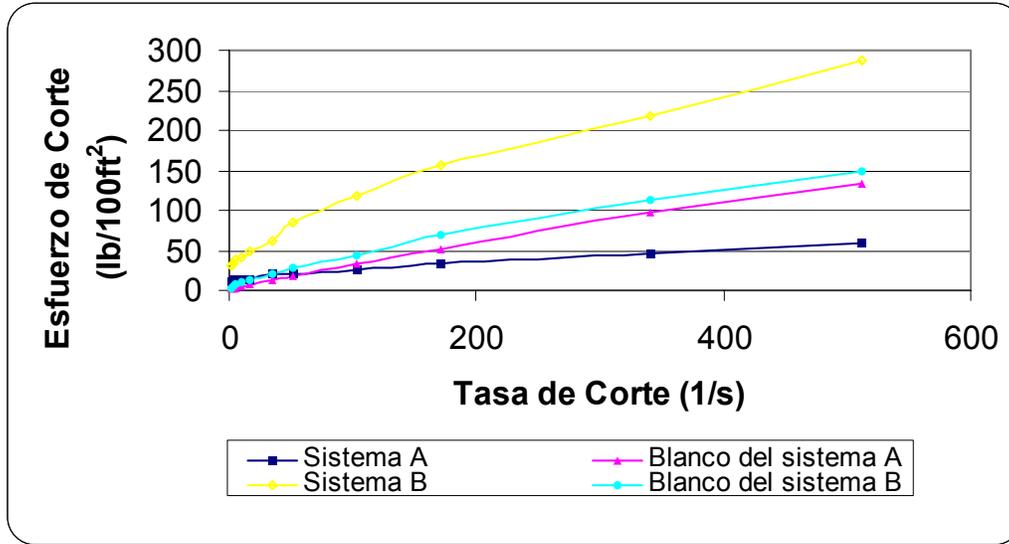


Figura 15. Comportamiento reológico de las lechadas de cemento evaluadas.

En la tabla 7 se resumen los parámetros reológicos que definen tanto el modelo de Plástico de Bingham como el de Ley de Potencia para cada una de las formulaciones de lechadas de cemento estudiadas, obtenidos empleando las ecuaciones 2 y 3 respectivamente. Como puede observarse todas las lechadas de cemento se ajustaron al modelo de Plástico de Bingham, ya que para los cuatro sistemas evaluados el valor de R^2 fue mayor para Plástico de Bingham que para Ley de Potencia.

Tabla 7. Ajuste de los datos reológicos de las lechadas de cemento @ 180 °F (BHCT).

Lechadas de Cemento	MODELOS REOLOGICOS					
	Plástico de Bingham			Ley de Potencia		
	μ_p	τ_0	R^2	n	K	R^2
Sistema A	46	14	0.97	0.303	0.071	0.93
Blanco del Sistema A	127	3	1.00	0.802	0.008	0.99
Sistema B	240	46	0.97	0.401	0.191	0.95
Blanco del Sistema B	138	10	0.99	0.643	0.024	0.99

6.1.2 PÉRDIDA DE FILTRADO DE LAS LECHADAS DE CEMENTO EVALUADAS

En la tabla 8 se presentan los valores de pérdida de filtrado API a 180 °F y diferencial de presión de 1000psi, obtenidos con la celda de filtrado, descrita en la sección 5.1.1. Los valores se ajustaron de acuerdo a los requerimientos API, tomando como valor máximo 100 ml/30min para lechadas de cemento empleadas en pozos con problemas de migración de fluido. Los valores reportados de filtrado son en base a 30 minutos, según especificaciones API[3].

Tabla 8. Pérdida de filtrado de las lechadas de cemento @180°F (BHCT).

LECHADAS DE CEMENTO	VALOR MEDIDO (ml)	TIEMPO (min)	FILTRADO
Sistema A	31.08	24.40	68.50
Blanco del Sistema A	38.56	30.00	77.12
Sistema B	44.00	30.00	88.00
Blanco del Sistema B	25.60	30.00	51.20

6.1.3 TIEMPO DE ESPESAMIENTO DE LAS LECHADAS DE CEMENTO EVALUADAS

En la tabla 9 se muestra la consistencia en todo el período de cada una de las lechadas de cemento evaluadas y en la tabla 10 se resumen los tiempos de espesamientos alcanzados por éstas lechadas de cemento, obtenido empleando el consistómetro presurizado, descrito en la sección 5.1.1. Como se puede observar todas las lechadas de cemento se ajustaron para que alcanzaran 100 Bc de consistencia a las tres horas y media aproximadamente (210 min).

Tabla 9. Consistencia de las lechadas de cemento evaluadas @ 180 °F

Tiempo(min)	Consistencia (Bc)			
	Sistema A	Blanco del Sistema A	Sistema B	Blanco del Sistema B
0	7	16	13	19
10	6	13	28	18
20	6	12	59	17
30	5	11	18	16
40	4	10	15	13
50	3	8	13	11
60	3	18	13	9
70	2	20	10	8
80	1	20	10	7
90	1	18	10	7
100	1	18	10	7
110	0	18	10	6
120	1	18	10	6
130	0	17	10	6
140	0	17	10	6
150	0	16	12	6
160	0	16	12	6
170	1	16	12	7
180	1	16	14	7
190	3	16	18	9
200	24	21	26	16
210	68	38	38	38
220	100	45	79	64
223	-----	48	100	100
228	-----	100	-----	-----

Tabla 10. Tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento evaluadas @ 180 °F

LECHADAS DE CEMENTO	TIEMPO DE ESPESAMIENTO (min)
Sistema A	220
Blanco del Sistema A	223
Sistema B	228
Blanco del Sistema B	228

En las figuras 16, 17, 18 y 19 se muestra la representación gráfica de los resultados presentados en la tabla 9.

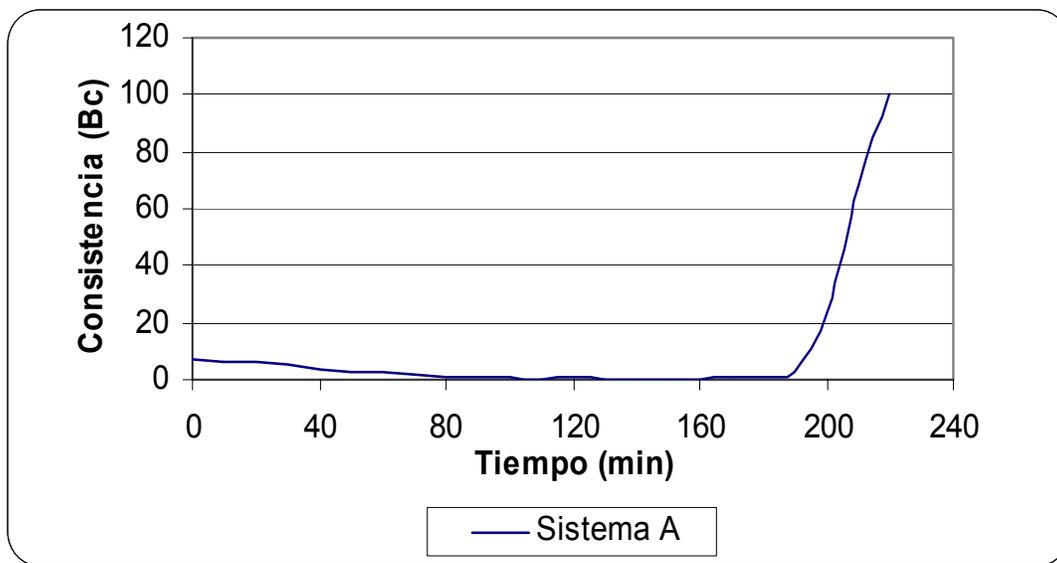


Figura 16. Tiempo de espesamiento para el sistema A.

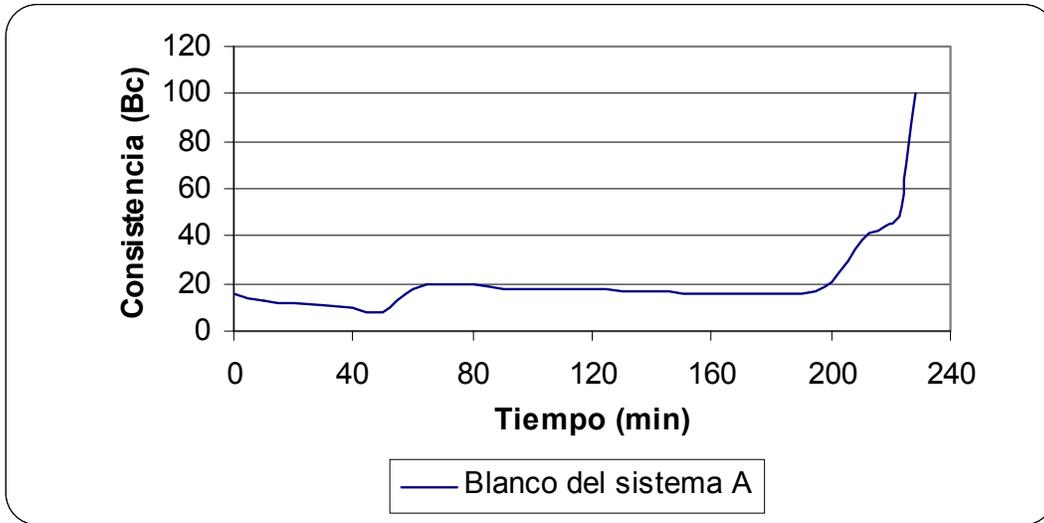


Figura 17. Tiempo de espesamiento para el Blanco del sistema A.

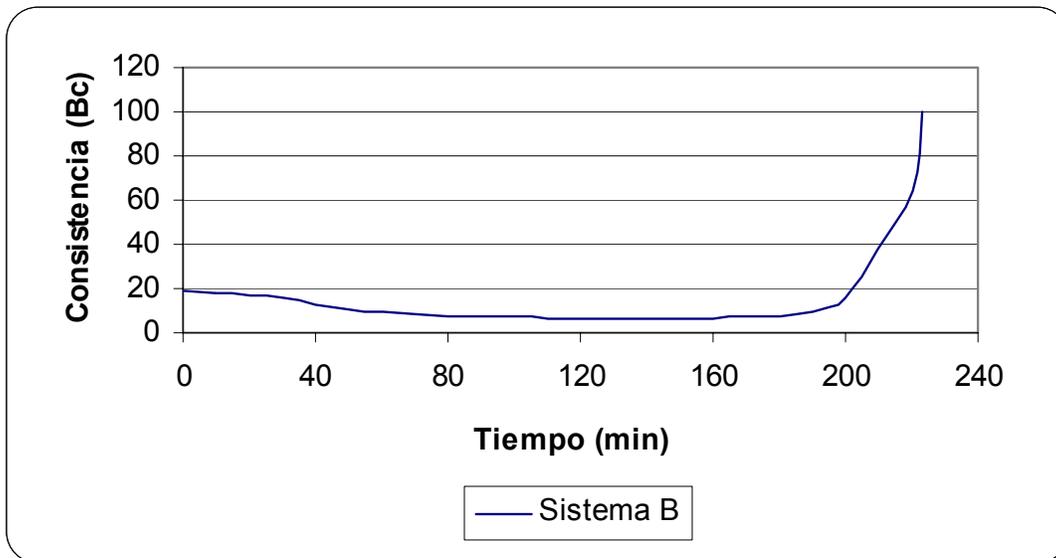


Figura 18. Tiempo de espesamiento para el Sistema B

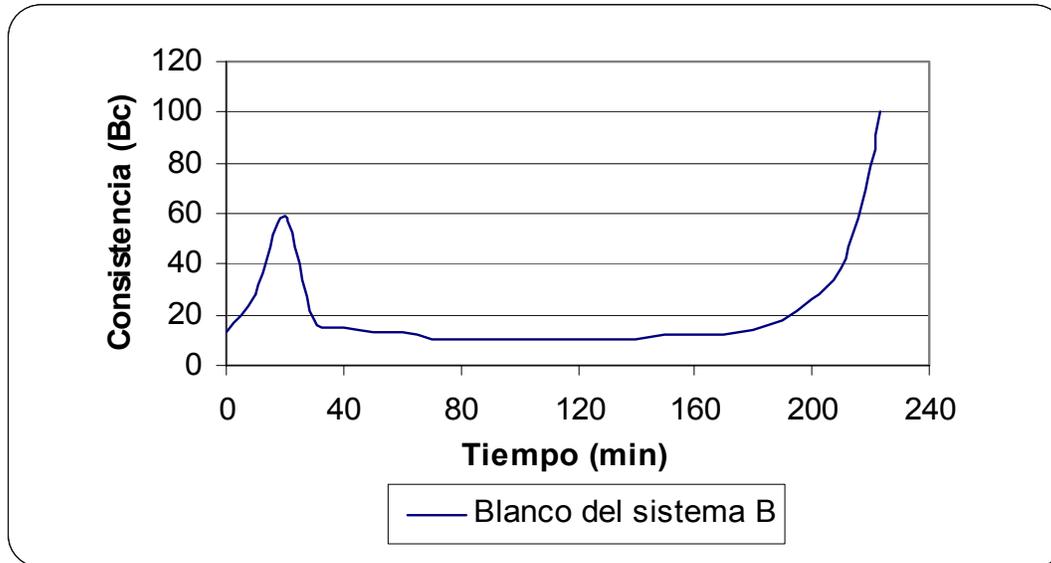


Figura 19. Tiempo de espesamiento para el Blanco del sistema B.

6.1.4 AGUA LIBRE DE LAS LECHADAS DE CEMENTO EVALUADAS

Las lechadas de cemento evaluadas se ajustaron para que presentaran cero agua libre, esto con la finalidad de asegurar que no se presente ningún problema de homogeneidad en las lechadas de cemento que se van emplear en la presente investigación [4].

6.1.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS SISTEMAS DE CEMENTO EVALUADOS

En la tabla 11 se muestran los valores de resistencia a la compresión calculados para cada una de las formulaciones de cemento estudiadas. Estos valores corresponden a la fuerza que soporta un cubo de cemento antes de romperse y según las especificaciones API el valor mínimo de resistencia a la compresión para el cemento clase G, es 1500 psi aproximadamente a 250°F y 24 horas de curado [3]. Como puede observarse todos las formulaciones de cemento

están dentro del valor establecido, por lo que se puede decir que son adecuados para emplearlos en las operaciones de cementación.

Tabla 11. Resistencia a la compresión de los sistemas evaluados @ 250°F (BHST)

LECHADAS DE CEMENTO	AREA (in)	LECTURA (tF)	R.C. (psi)
Sistema A	3,8295	4,441	2567
Blanco del Sistema A	4,0353	5,618	3069
Sistema B	2,8384	4,176	2399
Blanco del Sistema B	4,0318	4,085	2231

6.1.6 SEDIMENTACION DE LOS SISTEMAS DE CEMENTO EVALUADOS

En la tabla 12 se presentan los resultados de los valores obtenidos de sedimentación para cada una de las formulaciones de cemento estudiadas. Este valor es importante ya que permite verificar que la densidad es homogénea en toda la muestra, dentro de un error de aproximadamente 20%, el cual entra el rango estimado para operaciones de campo [3]. Esto garantiza que la lechada de cemento transmitirá la presión hidrostática uniformemente a lo largo de toda la columna de cemento.

Tabla 12. Sedimentación de los sistemas evaluados.

	LECHADAS DE CEMENTO			
	Sistema A	Blanco del Sistema A	Sistema B	Blanco del Sistema B
Sección	Densidad (g/ml)	Densidad (g/ml)	Densidad (g/ml)	Densidad (g/ml)
1	0.571	0.600	0.679	0.610
2	0.606	0.604	0.690	0.620
3	0.649	0.610	0.700	0.633
4	0.678	0.615	0.705	0.634

6.1.7 PERMEABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE CEMENTO EVALUADOS

Los valores de permeabilidad de los sistemas evaluados no se pudieron obtener, ya que con el manómetro disponible no se logró medir el flujo de gas que pasaba a través de la muestra de cemento fraguado. Esto nos hace suponer que la permeabilidad de las muestras era muy baja. De hecho, a temperaturas por debajo de 90°C la permeabilidad del cemento decrece con el tiempo y la temperatura, y después de siete días de curado usualmente es muy baja. La permeabilidad del cemento petrolero al gas con tres días de curado es aproximadamente de 0.1mD [35]. Por ésta razón, en la presente investigación se ha considerado que los sistemas evaluados presentan permeabilidades similares a dicho valor.

6.2 EVALUACION DE LA FUERZA DE GEL ESTATICA A LAS LECHADAS DE CEMENTO ESTUDIADAS

En la tabla 13 se muestra el desarrollo de la fuerza de gel estática para los sistemas A y B respectivamente. Como puede observarse los sistemas se evaluaron hasta un valor mayor de 500 lb-f/100ft², ya que dicho ha sido establecido experimentalmente como el punto en que la lechada de cemento no debe permitir que pase el flujo de gas a través de ella [2]. Adicionalmente, no se evaluaron para valores mayores a los reportados debido a razones prácticas, ya que se corría el riesgo que la muestra fraguara en la celda causándole daños a la misma.

Tabla 13. Desarrollo de la fuerza de gel estática de los sistemas A y B @ 250°F (BHST)

Tiempo (min)	SGS (lb-f/100ft ²)	
	Sistema A	Sistema B
0	15,38	0,90
5	40,68	41,40
10	47,43	51,00
15	48,58	51,70
20	58,63	61,60
25	70,43	72,70
30	79,88	84,20
35	81,18	96,10
40	102,23	107,50
45	100,58	125,80
50	133,38	132,60
55	144,58	152,90
60	189,28	176,70
65	211,98	189,30
70	272,58	220,20
75	342,23	227,20
80	438,00	249,50
85	544,28	276,90
90	708,33	304,80
95	900,00	359,70
100	-----	402,00
105	-----	512,30
110	-----	590,30
115	-----	774,00
120	-----	1026,60

En la figura 21 se observa un desarrollo similar de la fuerza de gel estática a la gráfica anterior, figura 20. En la primera etapa correspondiente a los treinta y ocho minutos aproximadamente no se observa un desarrollo considerable de geles. El tiempo de transición de este sistema es de sesenta y seis minutos aproximadamente.

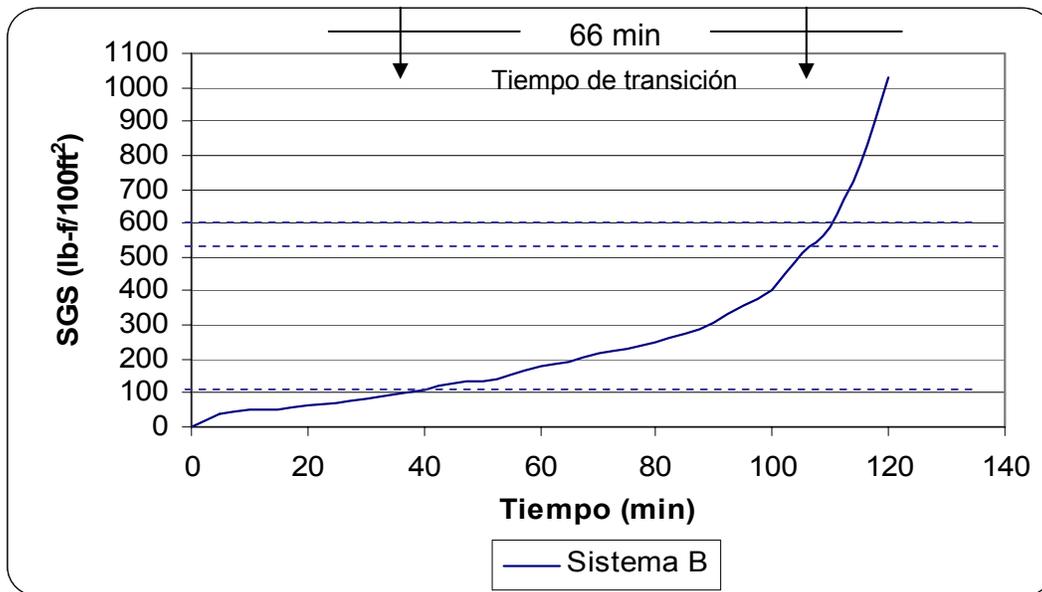


Figura 21. Comportamiento del desarrollo de la fuerza de gel estática del sistema B.

En la figura 22 se muestran las dos curvas de fuerza de gel estática para las lechadas de cemento antimigratorias. Como se puede observar ambos sistemas presentan aproximadamente el mismo Tiempo de Cero Gel, sin embargo el tiempo de transición para el sistema B es un poco mayor que el tiempo alcanzado por el Sistema A. Igualmente se puede decir que ambos sistemas presentan un crecimiento o desarrollo similar en la formación de geles.

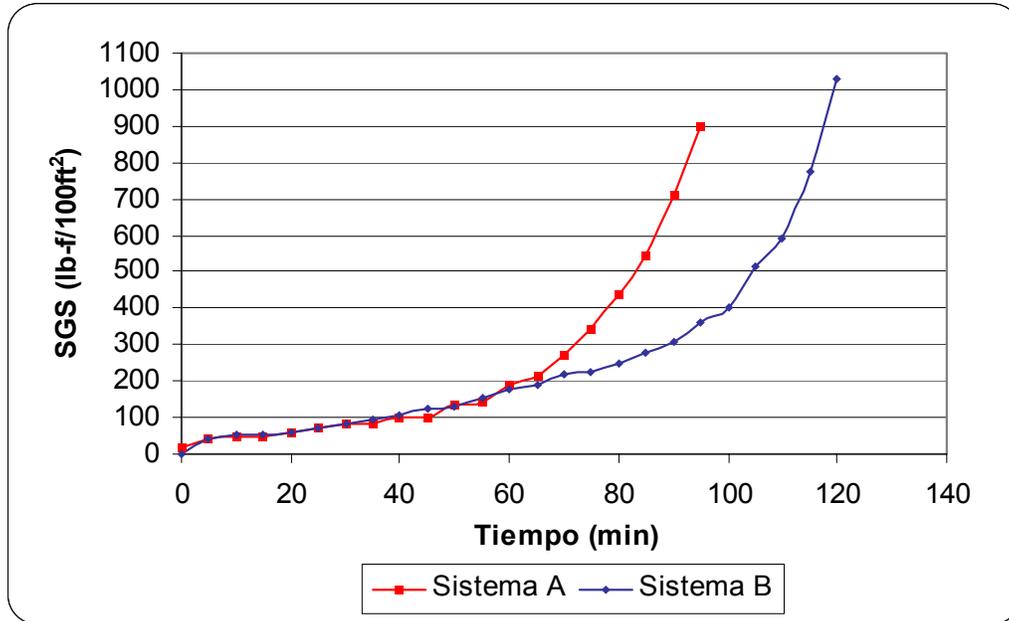


Figura 22. Desarrollo de la fuerza de gel estática de los sistemas A y B.

Los resultados que se muestran a continuación se realizaron empleando una metodología alternativa, el viscosímetro rotacional descrito en la sección 5.1.1. Esta metodología se propuso debido a problemas mecánicos y electrónicos que se presentaron con el MiniMACS (ver sección 5.2.4). Debido a esto no fue posible medir el desarrollo de geles de los Blancos de los sistemas A y B. Por este motivo, se realizaron medidas con el equipo mencionado tanto para los sistemas A y B como para sus respectivos Blancos.

La diferencia fundamental entre las dos metodologías empleadas es que la tasa de corte en el viscosímetro es 178 veces mayor que en el MiniMACS. Esto trae como consecuencia que en el viscosímetro el rompimiento de gel sea mayor, alterando la fuerza de gel estática de las lechadas de cemento evaluadas. Esto origina, por supuesto, que los 500lb-f/100ft² se alcancen en un tiempo mayor. Cabe preguntarse cuál es la tasa de corte que evita el rompimiento del gel que permita obtener el valor apropiado de fuerza de gel estática.

En la tabla 14 se muestran los valores obtenidos de esfuerzo de corte a una tasa de corte de 1rpm para los sistemas A y B. Esta prueba nos permitió establecer un vínculo entre los sistemas evaluados en el MiniMACS y en el viscosímetro rotacional.

Tabla 14. Esfuerzo de corte para los sistemas A y B @ 1rpm.

Tiempo (min)	Esfuerzo de Corte(lb-f/100ft²)	
	Sistema A	Sistema B
0	3,20	19,17
5	5,33	20,24
20	10,65	29,82
30	19,17	37,28
40	31,95	56,45
50	43,67	69,23
60	53,25	74,55
70	55,38	95,85
80	63,90	105,44
90	85,20	122,48
100	95,85	159,75
110	149,10	213,00
120	208,00	255,60
125	310,00	257,73
130	-----	266,25
140	-----	271,58
150	-----	319,50

En la figura 23 se muestra la representación gráfica de los valores presentados en tabla 14.

Se observa que ambos sistemas presentan un desarrollo de gel similar en todo el período de estudio, sin embargo tanto el Tiempo de Cero Gel como el tiempo transición son diferentes en cada caso. Para el sistema A se observa un Tiempo de Cero Gel de 100 minutos aproximadamente mientras que para el sistema B es de 70 minutos aproximadamente. Con respecto al tiempo de transición, se observa que para el sistema A es de 35 minutos aproximadamente y para el sistema B es de 90 minutos aproximadamente.

Si bien es cierto que existe una mayor diferencia con respecto a los tiempos antes mencionados y los que se presentaron en la figura 22, también se puede apreciar claramente que las tendencias de los sistemas A y B son iguales cuando se les evalúa con ambas metodologías. Se puede observar claramente que el sistema A alcanza $500\text{lb-f}/100\text{ft}^2$ en un tiempo menor que el sistema B. Basándonos en esto, se establecieron igualmente comparaciones entre los Blancos de los sistemas A y B, como se muestra en la figura 24, aplicando la misma metodología.

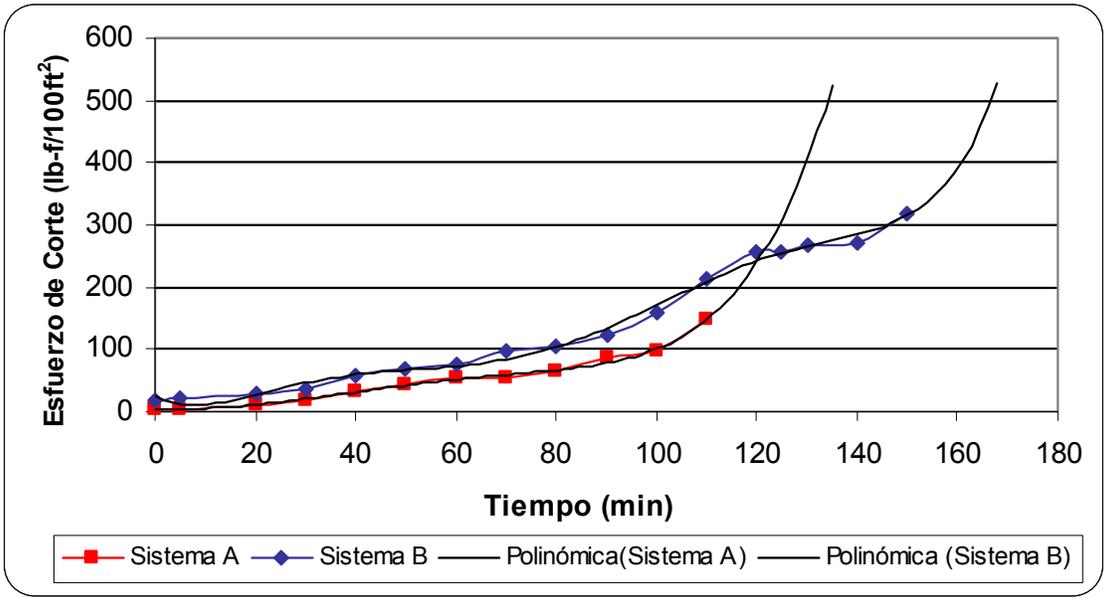


Figura 23. Esfuerzo de corte para los sistemas A y B.

En la tabla 15 se muestran los valores obtenidos de esfuerzo de corte a una tasa de corte de 1rpm para los Blancos de los sistemas A y B, empleando el viscosímetro rotacional, descrito en la sección 5.1.1.

Tabla 15. Esfuerzo de Corte para los Blancos de los sistemas A y B.

Esfuerzo de Corte (lb-f/100ft²)		
Tiempo (min)	Blanco del sistema A	Blanco del sistema B
0	0	0
5	4,3	24,5
20	4,3	22,4
30	4,3	28,8
45	5,3	53,3
55	5,3	53,3
65	5,3	53,3
75	6,4	53,3
85	5,3	53,3
95	5,3	85,2
110	5,3	122,5
115	5,3	127,8
125	4,3	106,5
130	4,3	106,5
135	4,3	106,5
150	3,2	106,5
160	3,2	106,5
170	3,2	106,5
180	3,2	106,5
240	19,2	319,5
280	117,2	-----
290	149,1	-----
300	287,6	-----
330	319,5	-----

En la figura 24 se muestra la representación gráfica de los valores presentados en tabla 15.

En ésta gráfica se observa que ambos Blancos presentan un desarrollo más lento de los geles que los respectivos sistemas A y B en todo el período de estudio. Para el Blanco del sistema A se observa un Tiempo de Cero Gel de 270 minutos aproximadamente mientras que para el Blanco del sistema B es de 142 minutos aproximadamente. Con respecto al tiempo de transición, se observa que para el Blanco del sistema A es de 110 minutos aproximadamente y para el Blanco del sistema B es de 150 minutos aproximadamente. Con esto podemos decir, que tanto el tiempo de Cero Gel como el tiempo de transición son significativamente mayores que los presentados por sus respectivos sistemas antimigratorios (ver figura 23). La importancia de ésto radica principalmente en la diferencia en el tiempo de transición, ya que éste es el período en que los geles comienzan a formarse realmente y algunos investigadores han demostrado la importancia que tiene que la lechada de cemento presente un período de transición corto [28]. Esta diferencia entre los sistemas antimigratorios y sus respectivos Blancos pudiera implicar que ambos aditivos antimigratorios (poliacrilamida sulfonada y poliestireno-butadieno) actúan modificando el tiempo de transición de las lechadas de cemento evaluadas.

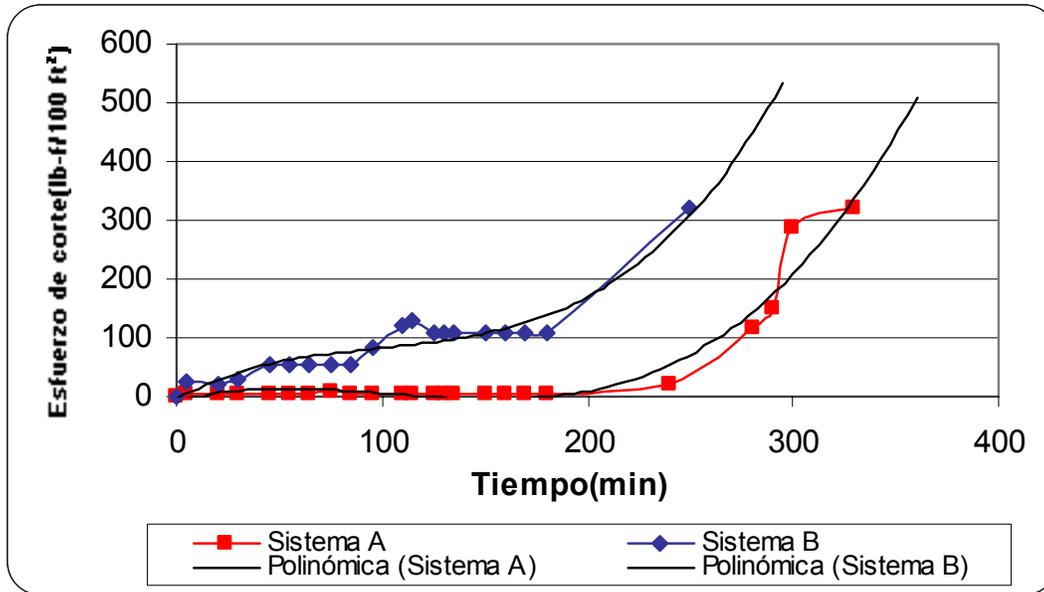


Figura 24. Esfuerzo de corte para los Blancos de los sistemas A y B.

6.3 EVALUACION DEL CONTROL DE LA MIGRACION DE GAS A LAS LECHADAS DE CEMENTO ESTUDIADAS

En las tablas 16 y 17 se muestran los valores de presión hidrostática teórico, tanto en el pozo como en la celda así como de caída de presión para los sistemas A y B, calculados a partir de los valores de fuerza de gel estática. Se debe acotar que al valor de presión hidrostática aplicado a la celda se le sumó 10% más de su valor para compensar las pérdidas de presión por efectos del pistón (diseño del equipo). Estos valores fueron calculados a partir de las ecuaciones 10 a 17 presentadas en la sección 4.3.2 y tomando como referencia los datos presentados en la sección 5.2.2, los cuales se presentan en el apéndice C. Con esto se pudo verificar el control de la migración de gas para cada uno de los sistemas estudiados aplicando un diferencial de presión de 500 psi.

Tabla 16. Valores de presión hidrostática y caída de presión para el sistema A @ 250°F.

Tiempo (min)	SGS(lb-f/100 ft²)	Presión hidrostática pozo(psi)	Caída de presión	Presión hidrostática celda(psi)+10%
0	0,00	7500	500	880
5	40,68	7459	459	835
10	47,43	7452	452	828
15	48,58	7451	451	826
20	58,63	7441	441	815
25	70,43	7429	429	802
30	79,88	7420	420	792
35	81,18	7418	418	790
40	102,23	7397	397	767
45	100,58	7399	399	769
50	133,38	7366	366	733
55	144,58	7355	355	720
60	189,28	7310	310	671
65	211,98	7287	287	646
70	272,58	7226	226	579
75	342,23	7156	156	502
80	438,00	7060	60	396
85	541,00	6957	-43	283
90	708,33	6789	-211	98
95	900,00	6596	-404	-114

Tabla 17. Valores de presión hidrostática y caída de presión para el sistema B @ 250°F.

Tiempo (min)	SGS(lb-f/100 ft ²)	Presión hidrostática pozo(psi)	Caída de presión	Presión hidrostática celda(psi) +10%
0	0	7500	500	880
5	41	7459	459	835
10	51	7449	449	824
15	52	7448	448	823
20	61	7439	439	813
25	73	7427	427	799
30	84	7416	416	787
35	96	7404	404	774
40	108	7392	392	761
45	126	7373	373	741
50	133	7366	366	733
55	153	7346	346	711
60	177	7322	322	685
65	189	7310	310	671
70	220	7279	279	637
75	227	7272	272	629
80	250	7249	249	604
85	277	7222	222	574
90	305	7194	194	543
95	360	7139	139	482
100	402	7096	96	436
105	512	6986	-14	315
110	590	6908	-92	228
115	774	6723	-277	25
120	1027	6469	-531	-254

En las figuras 25 y 27 se muestran las gráficas experimentales que arroja el FMA. Es importante señalar que las gráficas se reportaron en horas y no en minutos, ya que el simulador reporta el valor de todas las variables en intervalos de 10 segundos.

En las figuras 25 y 27 se muestra experimentalmente la disminución de la caída de presión para los sistemas A y B hasta el punto donde la presión hidrostática se iguala con la presión de la formación o punto de potencial invasión de gas. Con esto se comprueba que para el diferencial de presión aplicado no se presenta migración de gas. Como se observa en las figuras 26 y 28 el volumen de migración de gas durante todo el período de estudio alcanza un máximo de 0.4 Atm-ml aproximadamente en ambos casos. Esto indica que estos sistemas si controlan la migración de gas, ya que valor corresponde sólo a pequeños cambios de volumen por filtrado y además no es un flujo constante de gas que conlleve a que ocurra la migración de gas.

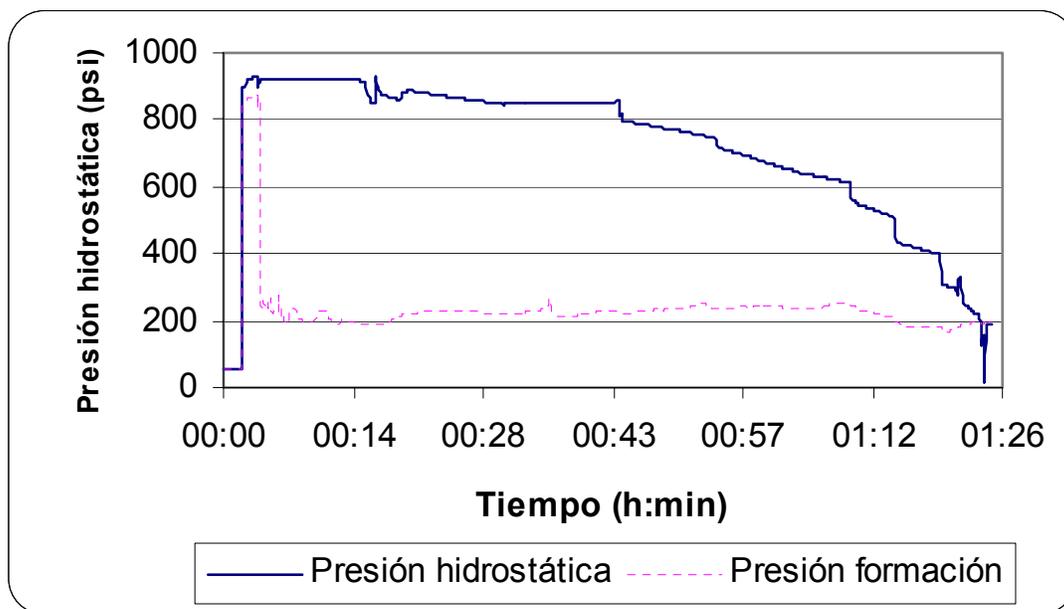


Figura 25. Caída de presión hidrostática para el sistema A.

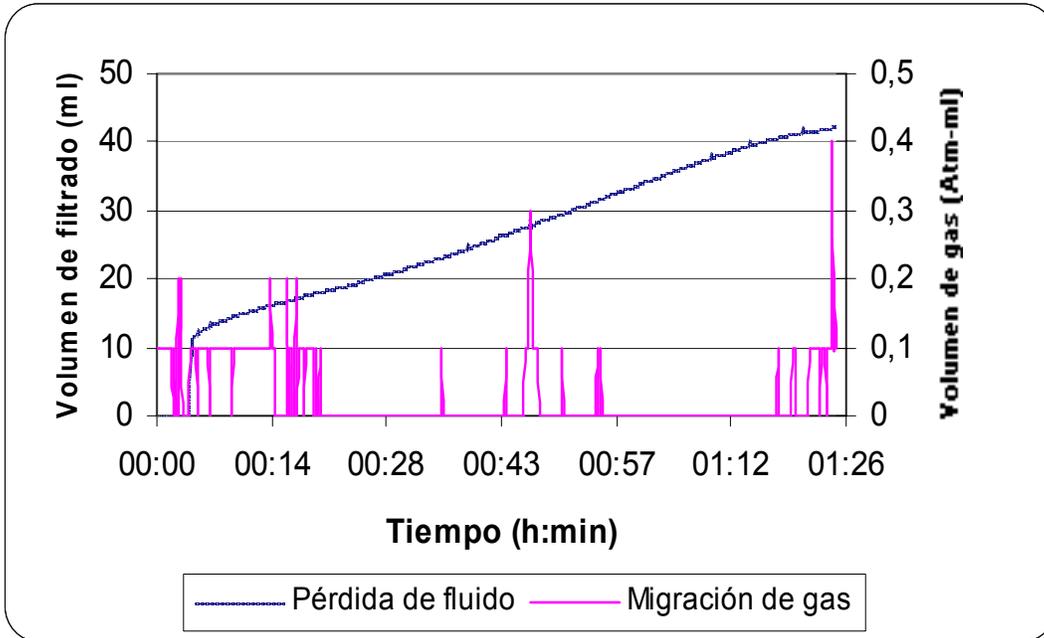


Figura 26. Pérdida de fluido y migración de gas para el sistema A.

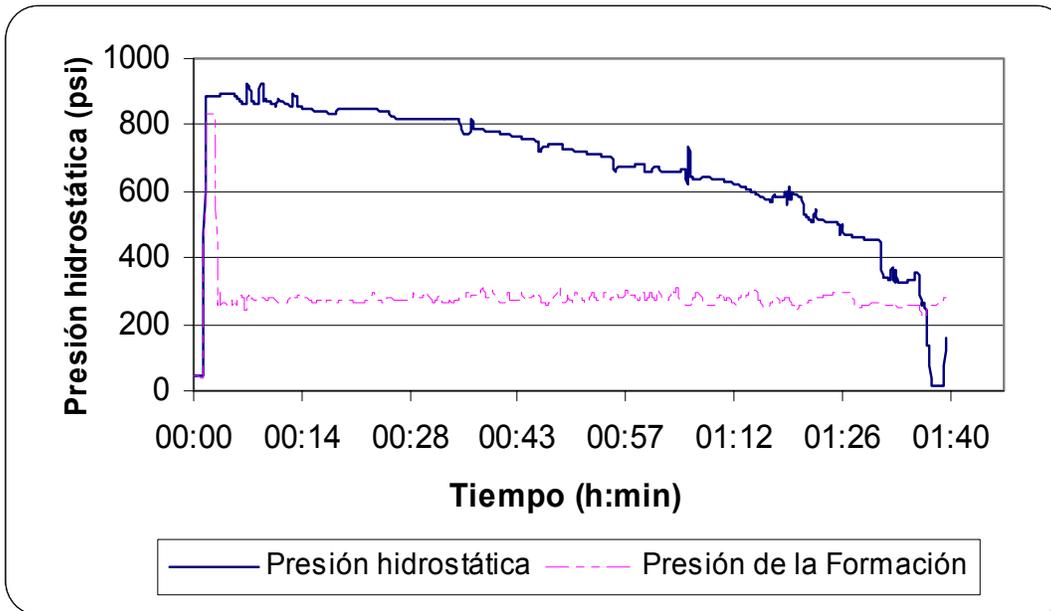


Figura 27. Caída de presión hidrostática para el sistema B.

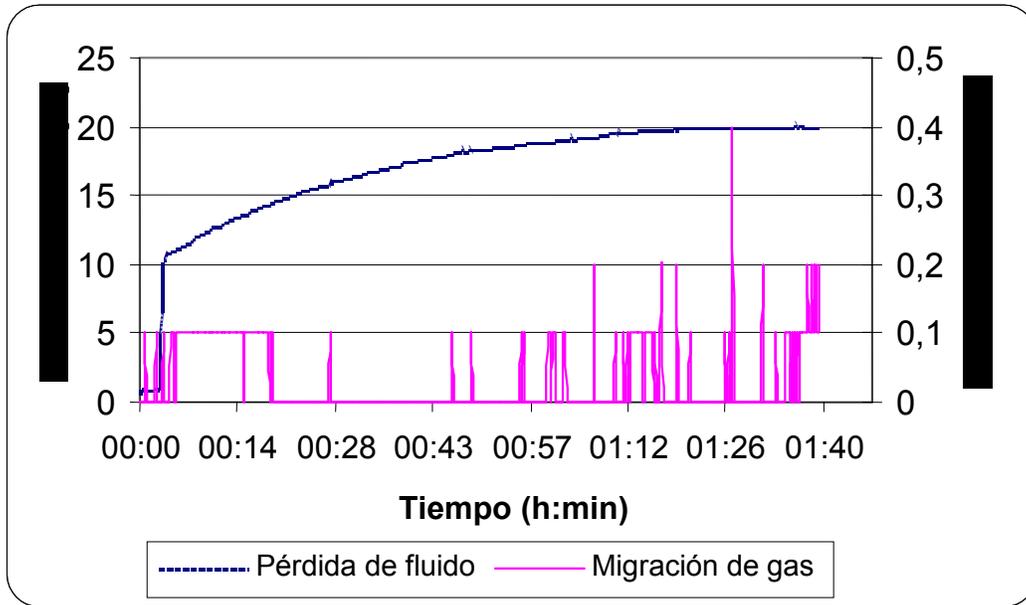


Figura 28. Pérdida de fluido y migración de gas para el sistema B.

En las figuras 29 y 31 se muestra la representación gráfica de la evaluación del control de migración de gas en los Blancos de los sistemas A y B usando un diferencial de presión de 500psi. Como se explicó en secciones anteriores, se mantuvo la presión hidrostática constante por un período mayor al de los sistemas antimigratorios ya que pareciera, según resultados obtenidos en la sección 6.2, que estos sistemas alcanzan $500\text{lb-f}/100\text{ft}^2$ en un tiempo mayor.

En las figuras 30 y 32 se observa como en el momento en que se disminuyó la presión hidrostática comenzó a aumentar en forma continua el volumen de gas que migraba a través de las muestras, lo cual implica que esta formulación no puede ser empleada para pozos con estas condiciones ya que no controlan la entrada de gas.

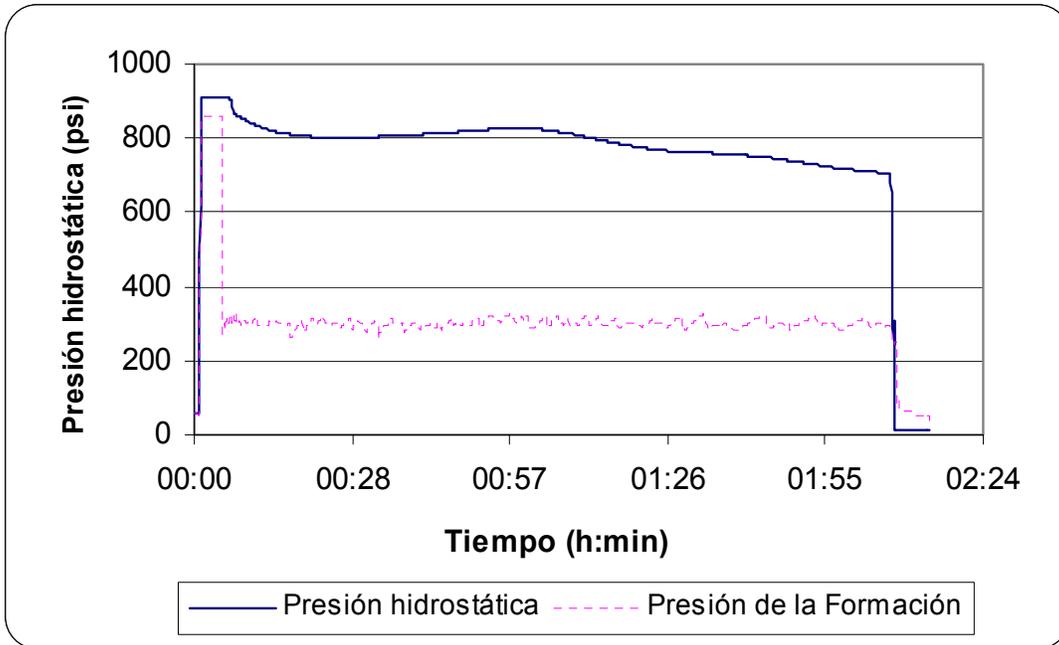


Figura 29. Caída de presión hidrostática para el Blanco del sistema A.

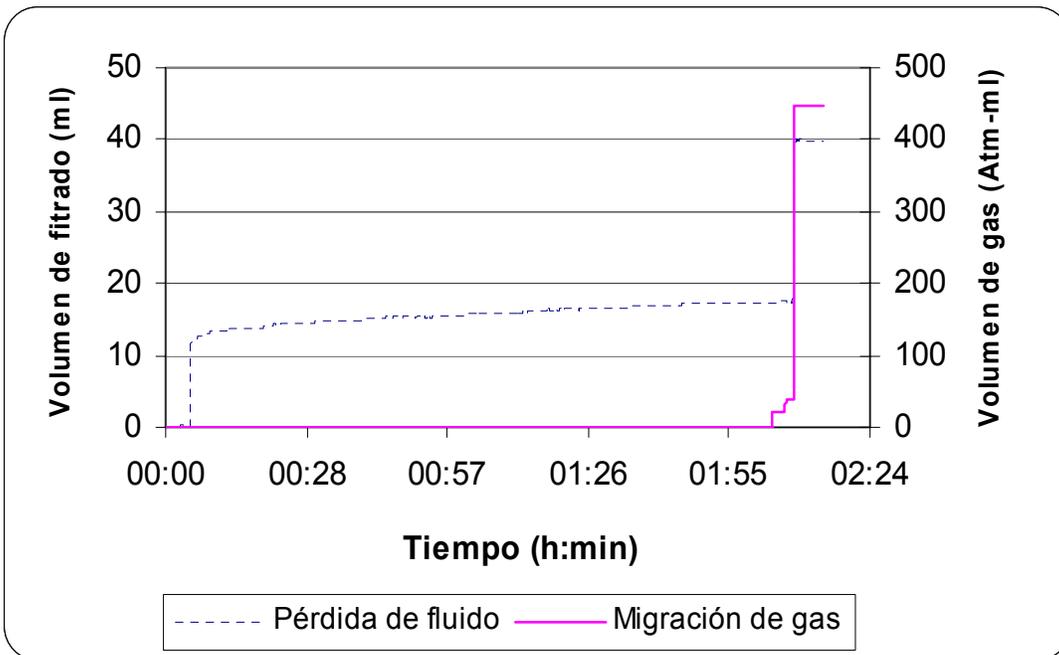


Figura 30. Pérdida de fluido y migración de gas para el Blanco del sistema A.

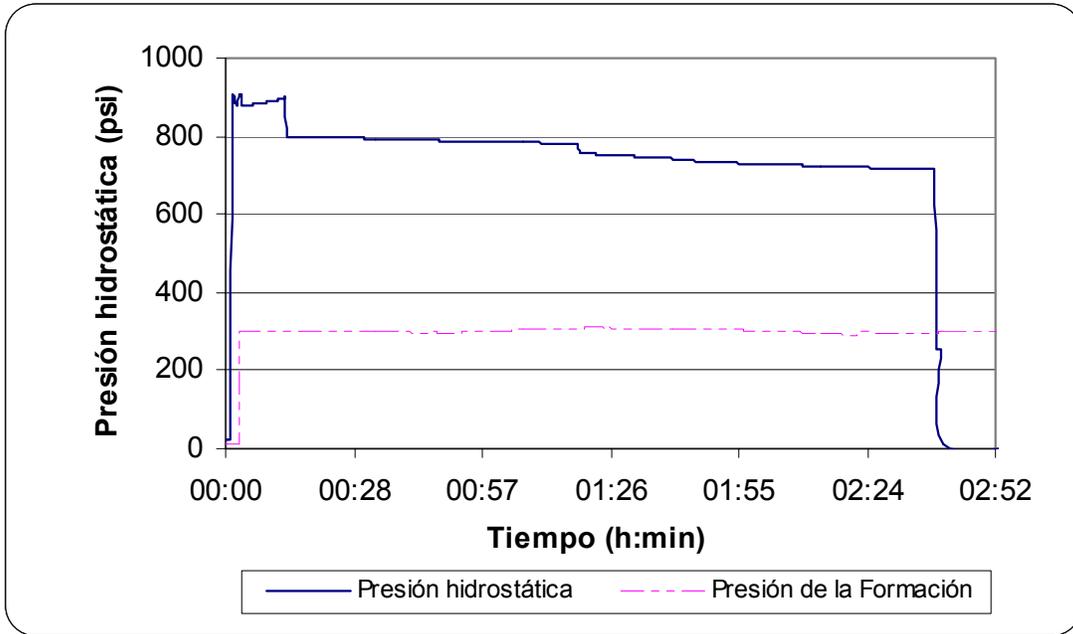


Figura 31. Caída de presión hidrostática para el Blanco del sistema B.

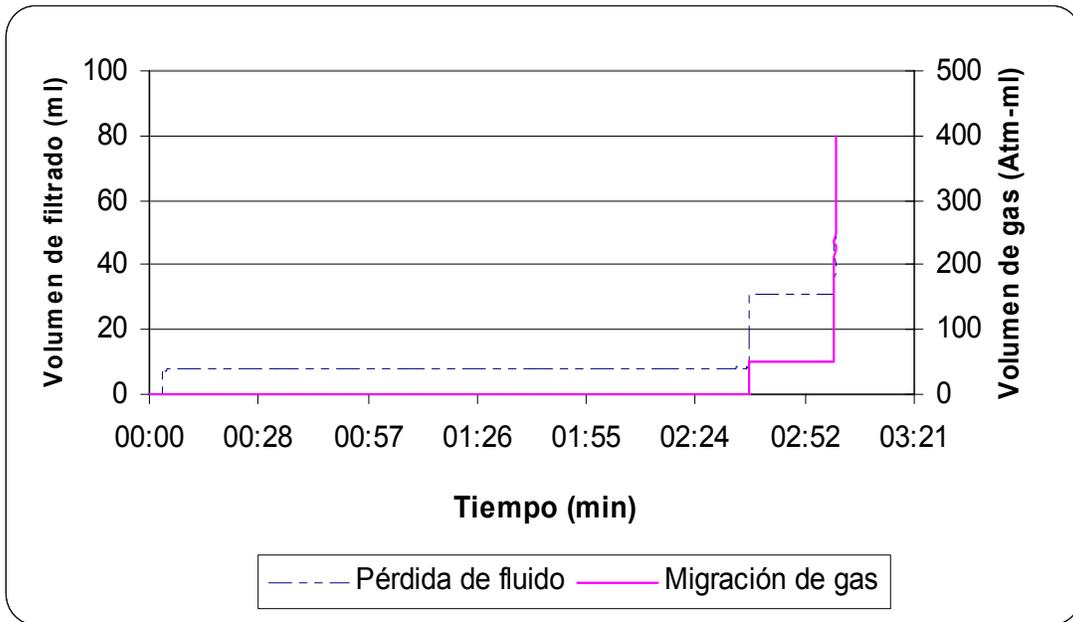


Figura 32. Pérdida de fluido y migración de gas para el Blanco del sistema B.

El estudio de los cuatro sistemas evaluados por medio de ésta técnica permitió comprobar que los sistemas A y B controlan migración de gas. Por otro lado, sus respectivos Blancos no la lograron controlar. Esto evidencia el hecho que los polímeros usados como aditivos, poliestireno-butadieno(Sistema A) y poliacrilamida sulfonada (Sistema B) le confieren propiedades antimigratorias a estos sistemas cementantes. Debe hacerse notar que la forma en que se desarrollen los geles en el proceso de fraguado del cemento es determinante en su desempeño para evitar posibles problemas de migración de gas. Mientras los sistemas A y B alcanzan de una forma relativamente rápida el valor de 500lb-f/100ft² sus respectivos Blancos lo hacen significativamente más lento Esto parece sustentar que uno de los factores que influye en el fenómeno estudiado es el posible desarrollo de geles débiles, que por un lado contribuyen a la pérdida de presión hidrostática y por el otro no son lo suficientemente fuertes para formar una barrera sólida capaz de evitar la entrada de gas. Esto pareciera presentarse en sistemas que tardan en alcanzar valores altos de fuerza de gel estática, es decir que presentan tiempos de transición muy largos[28]. Pareciera entonces, que no sólo es suficiente el estudio físico de la lechada de cemento, la cual es una limitante de los equipos empleados en la presente investigación, sino que están involucrados parámetros químicos que van a ser determinantes en la calidad del gel formado.

Se puede decir, que el estado de transición líquido-sólido caracterizado por el gel del cemento es el responsable de las propiedades antimigratorias de las lechadas de cemento, tal como se indica en la siguiente ecuación:

Lechada de cemento \Rightarrow Gel Antimigratorio \Rightarrow Cemento fraguado

Por lo antes expuesto se podría considerar que el desarrollo de la fuerza de gel estática de una lechada de cemento es un parámetro significativo en el control de la migración de gas. Razón por la cual se debería explorar otros métodos para evaluar dicha propiedad a nivel físico-químico y comparar las tendencias

obtenidas, a fin de establecer una característica de gelación específica que ayude en la prevención de la invasión de gas. Aunque de los resultados obtenidos en la presente investigación pareciera que la tendencia adecuada para prevenir migración de gas es que la formación de geles transcurra durante tiempos de transición cortos. Se puede estimar que para lechadas antimigratorias este tiempo no debería ser mayor de 90 minutos aproximadamente.

A pesar que el Blanco del sistema B presentaba un control de filtrado mayor que el sistema B se observó migración de gas. Entonces pareciera que éste no es el único factor involucrado en el control de gas. Aunque las soluciones propuestas en los primeros estudios que se realizaron para controlar migración de gas se basaron en el control de filtrado. Esto se basa en que la pérdida de filtrado origina que la columna de cemento pierda altura y por lo tanto pierda presión hidrostática, eventualmente permitiendo la entrada de gas (ver figura 33). Adicionalmente la migración de gas parece estar influenciada por la formación de geles de cemento y aunque en muchos casos se logra controlar la situación controlando el filtrado, a las condiciones evaluadas en el presente estudio no se observó relación entre éste y el control de gas.

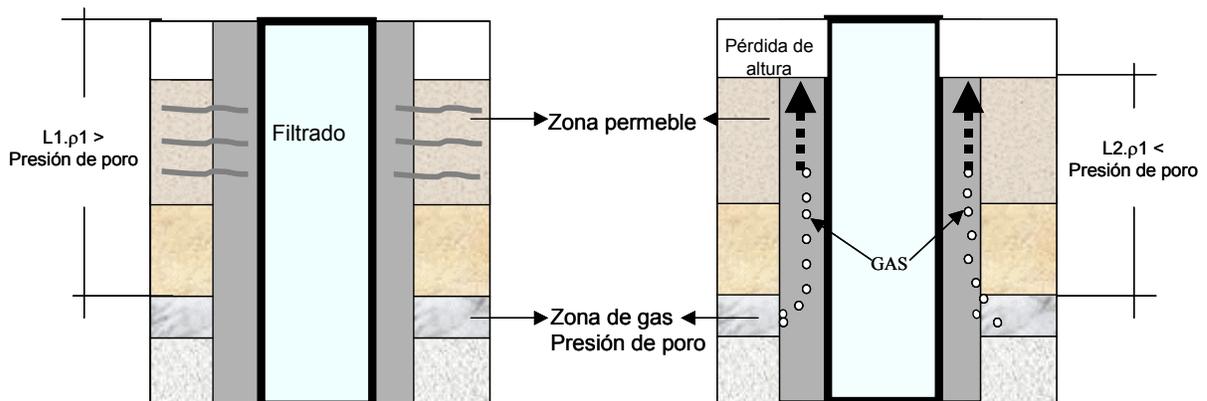


Figura 33. Pérdida de filtrado puede conducir a la migración de gas.

En cuanto a las otras propiedades, pareciera que no existe relación alguna entre el tiempo de espesamiento y el tiempo para desarrollar una específica fuerza de gel estática, ya que la primera es una relación empírica que permite identificar en que momento del proceso de hidratación del cemento, éste deja de ser bombeable. En cambio el gel del cemento es un estado intermedio entre el estado líquido y sólido (fraguado) que presenta características viscoelásticas [36]. De igual manera pareciera que la baja permeabilidad del cemento (la cual no se pudo obtener por ser muy baja) no beneficia a los Blancos de los sistemas A y B. Por esta razón, pudiera decirse que una baja permeabilidad no altera la capacidad de la lechada de cemento para controlar migración de gas [23].

7. CONCLUSIONES

- 1.- Se evaluaron materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas, verificando su capacidad de control de gas.
- 2.- Se evidenció que el MiniMACS es un sistema inestable mecánica y electrónicamente que dificulta las medidas del desarrollo de la fuerza de gel estática en las lechadas de cemento.
- 3.- Las medidas de esfuerzo de corte a una tasa de corte de 1rpm parecen ofrecer una alternativa interesante para distinguir entre sistemas con y sin propiedades antimigratorias.
- 4.- El tiempo para alcanzar $500\text{lb-f}/100\text{ft}^2$ es mayor cuando se emplea el viscosímetro rotacional que cuando se emplea el MiniMACS.
- 5.- Los aditivos antimigratorios empleados, estireno-butadieno y poliacrilamida sulfonada actúan modificando el tiempo de transición de las lechadas de cemento.
- 6.- Los sistemas A y B controlan migración de gas mientras que sus respectivos Blancos no la controlan.
- 7.- El desarrollo de la fuerza de gel estática de una lechada de cemento es un parámetro significativo en el control de la migración de gas.
- 8.- La tendencia adecuada para prevenir migración de gas es que la formación de geles presente tiempos de transición cortos.

9.- A las condiciones evaluadas en el presente estudio no se observó relación entre la pérdida de filtrado y el control de gas, aunque es reconocida su importancia en la literatura en el control de la misma.

10.- No existe relación alguna entre el tiempo de espesamiento y el tiempo para desarrollar una específica fuerza de gel estática.

8. RECOMENDACIONES

- 1.- Evaluar otros sistemas cementante empleados para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas, a fin de verificar la capacidad de control de gas de otros aditivos antimigratorios.
- 2.- Sustentar el uso de medidas reológicas como alternativa práctica para medir propiedades antimigratorias en sistemas cementantes usados en construcción de pozos. En este sentido debe procurarse emplear viscosímetros que puedan ajustárseles bajas tasas de corte.
- 3.- Emplear como alternativa para medir SGS en las lechadas de cemento técnicas ultrasónicas, las cuales evitarían inconvenientes mecánicos y perturbaciones en la medida.
- 4.- Estudiar a través de métodos disponibles en la industria, como reología oscilatoria, la parte físicoquímica de los geles desarrollados por el cemento.
- 5.- Estudiar el efecto del control de migración de gas a valores de sobrebalance mayores y menores de 500psi, para determinar el efecto que éste tiene sobre el control de la migración de gas.
- 6.- Estudiar el efecto de la temperatura sobre la formación de geles de cemento, lo cual permitirá predecir el comportamiento de los materiales cementantes a distintas condiciones de pozo y diseñar lechadas de cemento con el contenido mínimo de aditivos para el control de gas a la temperatura en cuestión.

9. BIBLIOGRAFIA

1. NEWMAN, Ken. **“Cement pulsation improves gas well cementing”**. World oil.2001.
2. ECONOMIDES, M; WATTER, L y DUNN-NORMAN, S. **“ Petroleum well construction”**.John wiley & sons, Inglaterra,1988.
3. API **“Recommended Practice Testing Well Cements 10B”**. Décima segunda edición, Diciembre 1997.
4. NELSON, E. **“Well Cementing”**. Schlumberger Dowell. Sugar Land, Texas, 1990.
5. BARBERII, E. **“ La industria venezolana de los hidrocarburos”**. Ediciones del CEPET, Caracas 1989.
6. MOORE, W. **“Fundamentals of rotary drilling: the rotary drilling system, a professional and practical training guide to its equipment, procedures and technology”**. Dallas, 1981.
7. Mavliútov. **“Tecnología de perforación de pozos profundos”**. Editoria Mir Moscú. URSS, 1986.
8. HYNE, J. **“Non technical guide to petroleum geology, exploration, drilling and production”**. Tulsa, 1995.
9. www.monografias.com
10. RABIA, H. **“Oilwell drilling engineering”**. Graham & Trotman, 1985.
11. Rodríguez, C. **“ Evaluación de la compresibilidad y erosionabilidad de revoques de fluidos de perforación previa a la cementación”**. Trabajo Especial de Grado Presentado ante la UCV para optar al título de Ingeniero Químico, Caracas-Venezuela, Marzo 2001.
12. Smith, Dwight. **“Cementing”**. Monographs volume 4 SPE. Segunda edición. Usa, 1990.
13. OTT, W.K. **“Cements and Cementing Practices”**. Curso diseñado por IHRDC, Boston, 1990.
14. Halliburton Services. **“Displacement mechanics studies”**. Recopilación de Papers. *Halliburton Cement*. Enero 1987.

15. Sauer, C. W. **“Mud displacement during cementing: a state of the art”**. *Journal of Petroleum Technology*. Septiembre 1987.
16. Mc Lean, R. H.; Manry, C. W. Y Whitaker, W. **“Displacement mechanics in primary cementing”**. *Journal of Petroleum Technology*, Febrero 1967.
17. Haut, R. C. Y R. J. Crook. **“Primary Cementing: the mud removal”**. *Paper SPE 8253*, Las Vegas, Septiembre 1979.
18. Clark, C. R. Y Carter, I. G. **“Mud displacement with cement slurries”**. *Journal of Petroleum technology*, Julio 1973.
19. Smith, T. R.; Ravi, K. M. **“Investigation of drilling fluid propreties to maximize cement displacement efficiency”**. Paper SPE 22775, Dallas, Octubre 1991.
20. Wester Atlas International. **“Cement Evaluation guidelines”**. Houston, TX. 1990.
21. BEIRUTE, R y CHEUNG, P. **“ A method for selection of cement recipes to control fluid invasion after cementing”**. Paper 19552. Noviembre, 1990.
22. SABINS,F; EDWARDS,T; STRINGER,K. **“Westport's Gas Migration Model”**. 2000.
23. SABINS Fred y WIGGINS Michael. **“ Estudio paramétrico de la invasión de gas dentro del anular cementado ”**. Paper SPE 28472, 1994.
24. SABINS, F y SUTTON D. **“Interrelationship between critical cement propierties and volume changes during cement setting”**. Paper 20451. 1990
25. SABINS, F; BEIRUTE R y otros. **“Physical Models and Methods for Testing fluid migration”**. 1999
26. SABINS, F y SUTTON D. **“The relationship of thickening time, gel strength, and compressive strengths of oilwell cements”**. Paper 11205.1982.
27. DRECK, P y PARCEVAUX, P. **“ A single technique solves gas migration problems across a wide of condition”**. Paper 17629. Noviembre 1988.
28. BACKE, K et al. **“Characterising curing cement slurries by permeability, tensile, strength and shrinkage”**. Paper 38267. Junio, 1997.
29. MOON, Jeff y WANG, Steven. **“Acoustic Method for determining the static gel strength of slurries “**. Paper SPE 55650. Mayo, 1999.

30. BANNISTER, C y LAWSON, V. **“Role of cement fluid loss in wellbore completion”**. Las Vegas, 1985.
31. SUTTON D. y SABINS, F. **“New Evaluation for Annular Gas Flow Potential”**. Diciembre, 1984
32. PROHASKA, M y otros. **“Modeling early-time gas migration through cement slurries”**. Paper 27878. 1994.
33. HALLIBURTON. **“ Manual del Mini Multiple Analyzer Cement Slurry (MINIMASC)”**. Duncan, 1997.
34. CHANDLER **“ Manual del Free Migration Analyzer (FMA) “**. Tulsa, 2001.
35. HEWLETT, P.C. **“Lead's Chemistry of cement and concrete”**. New York, 1988.
36. GLASS, E.J. **“Polymers in aqueous media”**. American Chemical Society, Washington. Octubre, 1989.

10. APENDICES

A. Viscosímetro Rotacional

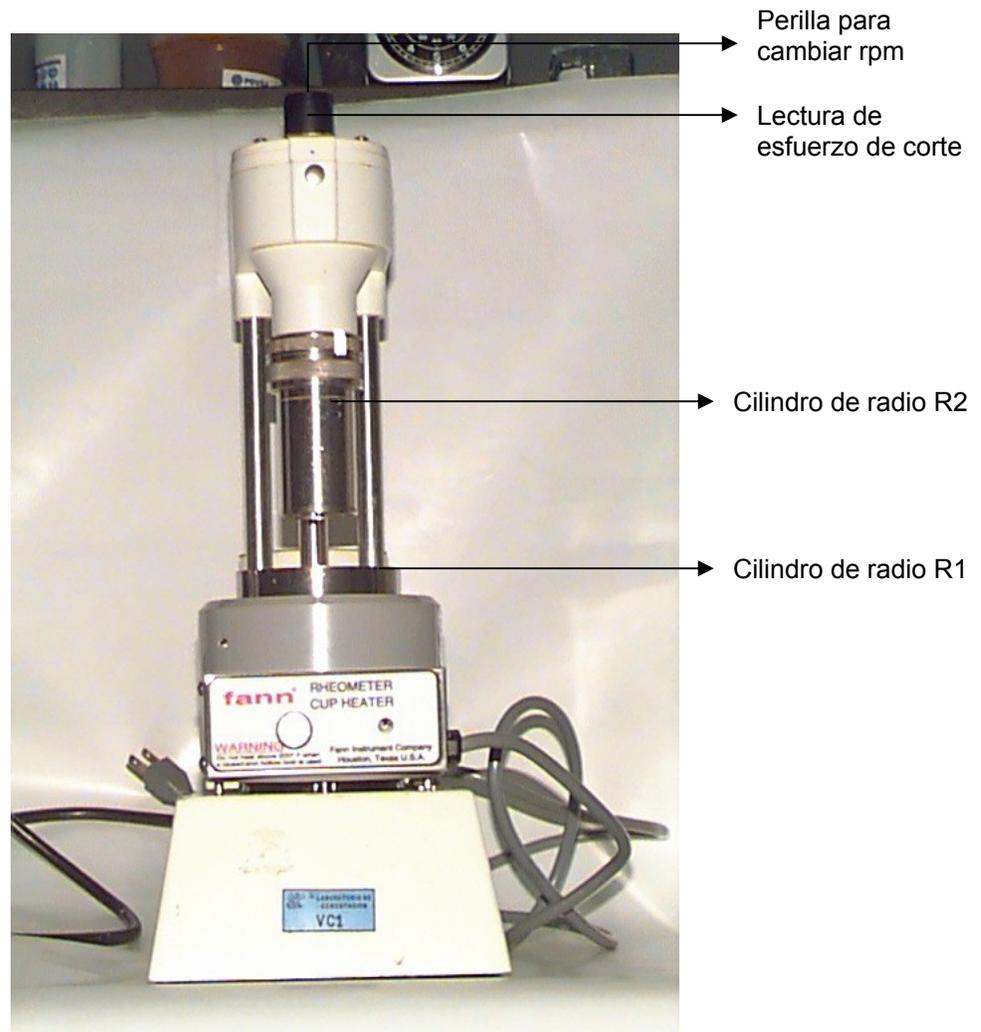


Figura A. Viscosímetro rotacional

B. MiniMACS

B.1 Esquema del MiniMACS

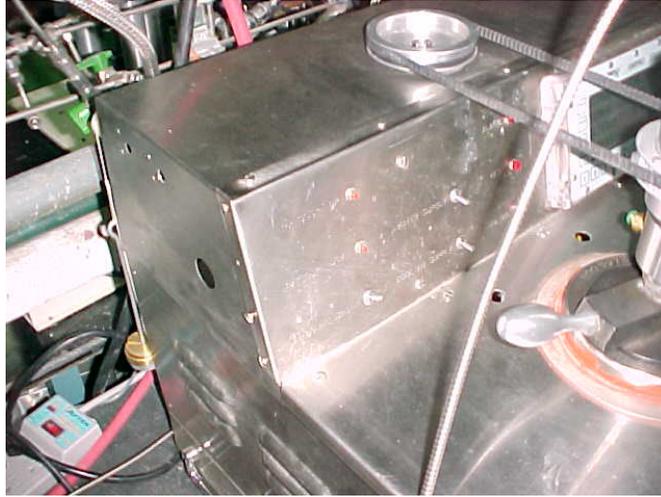


Figura B.1.a Vista lateral del equipo

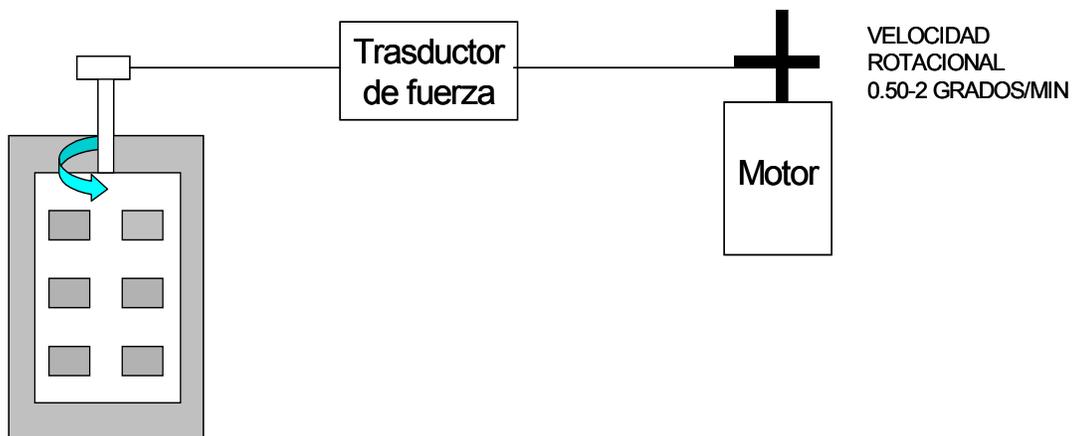
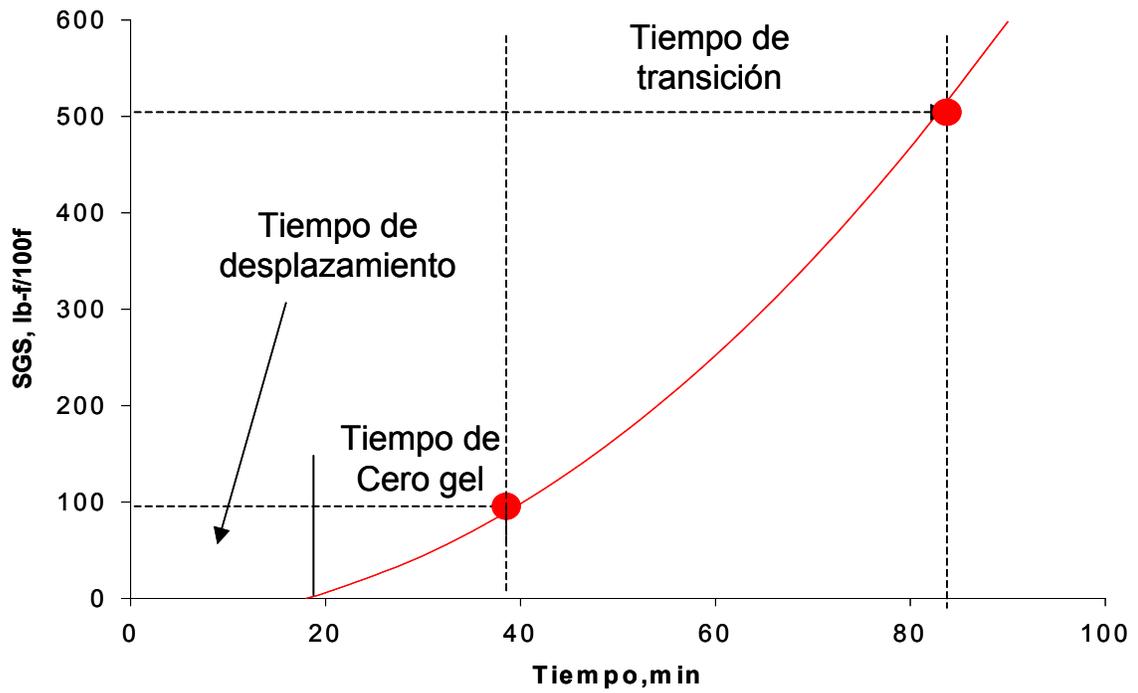


Figura B.1.b Esquema del MiniMACS

B.2 Prueba de Fuerza de gel estática

1. Calibrar el equipo.
2. Armar la celda del equipo.
3. Colocar la lechada de cemento a acondicionarse en el consistómetro atmosférico a 80 °F durante treinta minutos.
4. Programar las condiciones de trabajo en el equipo.
5. Abrir el programa en la computadora y asignarle un nombre a la prueba.
6. Verter la lechada de cemento en la celda hasta llenarla completamente.
7. Cerrar la celda y colocarla dentro de la cámara del equipo.
8. Cerrar la cámara del equipo y colocar la termocupla un poco floja.
9. Abrir el paso del agua al equipo.
10. Apretar la tuerca de la termocupla cuando el agua comience a salir por el orificio donde se encuentra la termocupla.
11. Abrir el paso de gas.
12. Colocar en el panel de control el menú star y presionar OK.
13. Presionar run en la computadora.
14. Presionar stop cuando la pantalla del equipo muestra un valor de fuerza de gel igual o superior a 500 SGS.
15. Liberar la presión confinada en el equipo.
16. Abrir el agua de enfriamiento.
17. Desmontar la celda.

B.3 *Tipica gráfica del desarrollo de la fuerza de gel estática.*



C. Analizador de Migración de Fluido (FMA)

C.1 Esquema de la celda de migración de gas

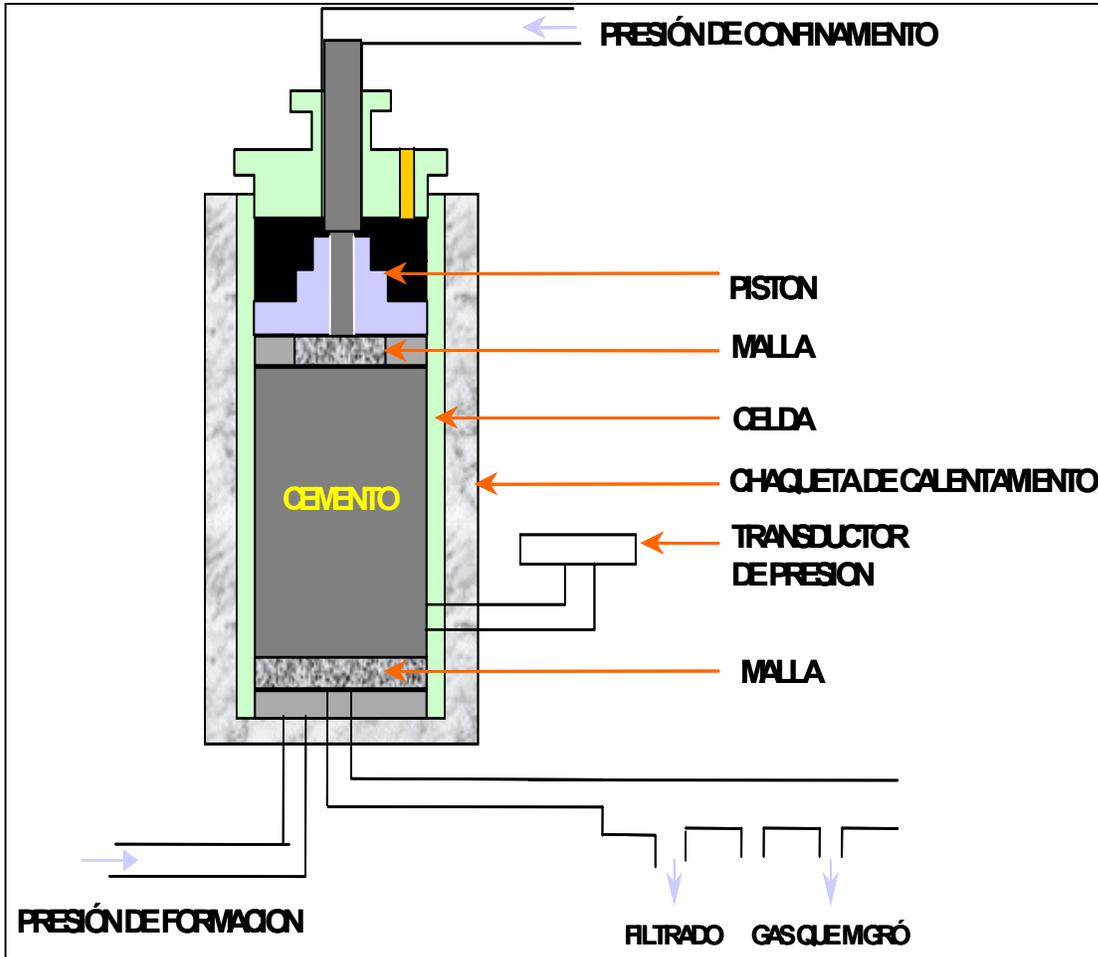


Figura C.1 Celda de migración de gas

C.2 Prueba de control de migración de gas.

Para realizar las pruebas en la celda de migración de fluidos (FMA) se siguieron detalladamente los siguientes pasos, después de preparar la lechada de cemento según procedimiento especificado en las Normas API [3] y acondicionarla en el consistómetro atmosférico durante media hora:

Llenado de agua de los reservorios

1. Colocar el switch de encendido en la posición “on”.
2. Aplicar 100 psi manipulando el regulador de contrapresión.
3. Abrir las dos válvulas de contrapresión y luego cerrarlas.
4. Aplicar 100 psi manipulando el regulador de presión de confinamiento.
5. Colocar el switch de agua en la posición “on”.
6. Colocar las dos válvulas que se encuentran a la derecha del equipo en la posición “vent”.
7. Cerrar una de éstas válvulas y esperar hasta que se vea fluyendo agua por el tubito.
8. Abrir la otra válvula y cerrar la que se encontraba abierta hasta que no se vea burbujas de aire sino únicamente agua.
9. Colocar la válvula “cell supply water” en la posición de “fill/vent”.
10. Colocar la válvula “cell base effluent” en la posición de “fill/flush”.
11. Colocar la válvula “cell discharge ” en la posición base.
12. Esperar aproximadamente dos minutos a que se llenen todas las líneas de agua.
13. Cerrar todas las válvulas y por último cerrar la del agua
14. Colocar los frascos sobre las balanzas correspondientes. El frasco lleno con agua debe ir en el medio de las dos balanzas.

Acondicionamiento del equipo

1. Colocar el switch del calentador en la posición “on”.
2. Iniciar el programa en la computadora.
3. Ajustar el controlador de temperatura a la temperatura de operación.
4. Esperar un tiempo prudencial para que comience el calentamiento.
5. Colocar el regulador de contrapresión a 300psi para simular la zona de gas.
6. Abrir la válvula de contrapresión (fondo) y cerrarla posteriormente.
7. Colocar el regulador de contrapresión a 100 psi por encima de la presión de la zona de gas(400psi).
8. Abir la válvula de contrapresión (tope) y cerrarla posteriormente.
9. Aplicar la presión hidrostática inicial simulada (880psi) en el tope del pistón usando el regulador de presión de confinamiento.
10. Girar la válvula que se encuentra al lado derecho del instrumento a la posición de presión de confinamiento. El eje del pistón se moverá hacia abajo y el sensor que se encuentra en el eje hará contacto con la celda.

Realización de la prueba

Parte 1. Pérdida de fluido

1. Asegurarse que los tres frascos se encuentren en su lugar para recibir el efluente. Los frascos 1 y 3 deben estar sobre las balanzas. (ver figura C.2)
2. Ajustar las balanzas en cero.
3. Abrir la válvula de descarga de la celda a la posición base.
4. Girar la válvula de efluente de la celda (fondo) a la posición de muestra. Abrir ésta válvula lentamente. El filtrado se recoge en el frasco 1.
5. Cerrar la válvula de descarga de la celda (fondo)
6. Girar la válvula de efluente de la celda (fondo) a la posición “off”.

Parte 2. Migración de gas.

1. Colocar el regulador de contrapresión en un valor menor que 300. Abrir la válvula de contrapresión (tope) y cerrarla posteriormente.
2. Colocar el regulador de contrapresión a 100 psi por encima de la presión de tope y abrir la válvula de contrapresión (fondo). Cerrar la válvula.
3. Colocar el regulador de inyección de presión (base) a 300psi.
4. Girar la válvula de inyección de la celda (base) a la posición de N₂.
5. Abrir la válvula de descarga de la celda (tope).
6. Abrir la válvula que se encuentra en la base de la celda.
7. Girar la válvula de efluente de la celda a la posición de muestra.
8. Ajustar el regulador de presión de confinamiento para simular la pérdida de cabezal hidrostático. Cuando se ajuste el regulador de presión de confinamiento, usar la presión calculada más un 10%. La presión de la lechada de cemento será aproximadamente 10% menor que la presión de confinamiento. Esto es debido al balance de fuerzas contra el pistón y el hecho que parte del pistón sobre el lado de arriba no está expuesto a la presión de confinamiento. (Debido a la varilla que se encuentra en el tope de las celda).
9. Verificar el control de migración de gas una vez que la presión de confinamiento sea igual a la presión de la formación(300psi). Si hay migración de gas el agua del frasco 2 se desplazará al frasco3.

Culminación de la prueba

1. Apagar el calentador.
2. Colocar el controlador de temperatura en cero.
3. Liberar la presión manipulando los tres reguladores de presión y cerrar todas las válvulas.
4. Esperar hasta que la temperatura esté a 190°F o 87°C.
5. Encender el agua de enfriamiento.
6. Colocar la válvula de “cell supply water” en la posición de fill/vent.
7. Colocar la válvula de “cell base effluent” en la posición de fill/flush.

8. Colocar las dos válvulas que se encuentran a la derecha del equipo en la posición de “vent”.
9. Dejar que el agua circule por toda la línea para que la celda se enfríe.
10. Verificar que no existe presión en las líneas y desmontar la celda.

C.2.1 Equipo de Migración de fluido (FMA)



Figura C.2.a .Celda desarmada



Figura C.2.b. Celda armada

C.3 Determinación de los valores de caída de presión

A continuación se presenta el cálculo tipo para mostrar como se determinaron los valores de caída de presión tanto para el pozo como para la celda, para los sistemas A y B empleando un diferencial de presión de 500psi y un valor de fuerza de gel estática de 100lb/100ft² (para cada valor de SGS se obtuvo un valor de caída de presión). Las ecuaciones que se aplicaron son las mostradas en la bibliografía(ec.10 a ec.17)

1. $P_m = 9747 * 13.6 * 0.052 = 6893 \text{psi}$
2. $P_{C_i} = 6893 + 753 * 15.5 * 0.052 = 7500 \text{psi}$
3. $P_r = 100 * 753 / 300 * (8 - 5.5) = 100.4 \text{psi}$
4. $P_{C_t} = 7500 - 100.4 = 7400 \text{psi}$ (presión hidrostática en el pozo)
5. $P_{d_t} = 7400 - 7000 = 400 \text{psi}$
6. $P_{\text{tope}} = 7400 - 7000 + 300 = 700 \text{psi}$ (presión hidrostática en la celda)

Este es el valor de presión hidrostática que tiene la columna de cemento a la cual hay que agregarle el 10% de su valor, entonces:

7. $P_{\text{tope}} = 700(1 + 0.1) = 770 \text{psi}$

11. GLOSARIO

Adhesión: Fuerza que mantiene juntas a moléculas diferentes.

Aislamiento zonal: Mantener aislada las zonas de alta y baja presión en el anular cementado.

Amplitud: Valor de una onda senoidal desde el cero hasta su máximo.

Anular: Espacio comprendido entre el revestidor y la formación.

Cemento Portland: Cemento compuesto básicamente por clinker y yeso.

Coalescer: Acción de unirse o soltarse dos partes separadas normal o anormalmente.

Cohesión: Fuerza de atracción que mantiene juntas a moléculas de una sustancia.

Compresibilidad: Propiedad que permite al material comprimirse o apretarse de manera que se reduce su volumen.

Copolímero: Sustancia que se forma cuando dos o más sustancias polimerizan al mismo tiempo dando por resultado un producto con propiedades diferentes a los polímeros obtenidos con cada monómero.

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

Fraguar: Hidratación del cemento convirtiéndose del estado líquido al sólido.

Fluido interzonal: Fluido que atraviesa el anular desde una formación de alta presión a una de baja presión o a la superficie.

Lechada de cemento: Mezcla de cemento, agua y aditivos que se bombea al pozo en forma de lechada.

Mecha: Instrumento con extremos cortantes utilizado en la perforación de pozos para penetrar las formaciones de interés.

Microanulos: Fracturas en el concreto por donde puede migrar el fluido.

Pérdida de Circulación: Resultado de las pérdidas de lodo o lechada de cemento hacia la formación a través de grietas o de cualquier medio poroso.

Presión Diferencial: Es la diferencia de presión entre la presión hidrostática de la columna de lodo más la de lechada de cemento y la presión de la formación a una determinada profundidad dentro del pozo. Puede ser positiva, cero o negativa con respecto a la columna hidrostática.

Punto cedente: Fuerza mínima para que el fluido empiece el movimiento.

Revestidor: Tubería en general que se usa en construcción de pozos petroleros.

Ripios: Residuos que se producen durante el proceso de perforación.

Señal acústica: Onda sónica.

Tasa de corte: Es la medida de cambio de velocidad por cambio de distancia.

Tiempo de fraguado: Tiempo en el cual la lechada de cemento alcanza 100 Bc.

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 si se deja en reposo, pero se convierte nuevamente en fluido por agitación mecánica. Este cambio es reversible.

Viscosidad: Resistencia interna al flujo ofrecida por un fluido. Este fenómeno se atribuye a las atracciones entre moléculas. Se obtiene de la curva de esfuerzo de corte vrs. tasa de corte para fluidos Newtonianos.