

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO



**USO DE CEMENTOS LIVIANOS – FLEXIBLES Y
SIMULADOR MATEMATICO CM VISION
EN CEMENTACION DE POZOS**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE PETROLEO**

PRESENTADO POR:

JORGE LUCAS TAPIA AVENDAÑO

PROMOCION 2000 – 0

LIMA – PERU

2005

**USO DE CEMENTOS LIVIANOS – FLEXIBLES Y
SIMULADOR MATEMATICO CM VISION
EN CEMENTACION DE POZOS**

CONTENIDO GENERAL

TEMARIO

I. DEDICATORIA

1.0 INTRODUCCION

2.0 DEFINICIONES BASICAS

- 2.1 OBJETIVOS DE UNA CEMENTACION PRIMARIA
- 2.2 MEZCLAS CONVENCIONALES DE CEMENTACION
- 2.3 PROPIEDADES MECANICAS DEL CEMENTO
- 2.4 ESFUERZOS SOMETIDOS SOBRE EL ANILLO DE CEMENTO
- 2.5 PROBLEMAS Y CONSECUENCIAS DE UN MAL CEMENTO

3.0 LECHADAS LIVIANAS Y FLEXIBLES

- 3.1 DEFINICION
 - 3.1.1 ADITIVOS ESPECIALES
 - 3.1.2 USOS Y VENTAJAS
- 3.2 DISEÑO DE MEZCLAS
 - 3.2.1 ANCLAJE Y SOPORTE
 - 3.2.2 AISLACION DE ZONAS EN LAS INTERFACES
 - 3.2.3 AISLACION DE ZONAS EN LA MATRIZ

4.0 SIMULADOR MATEMATICO CM VISION

- 4.1 DEFINICION
- 4.2 USO DE SIMULADOR

5.0 APLICACIONES RECIENTES DE MEZCLAS LIVIANAS

- 5.1 YACIMIENTOS DE GAS
- 5.2 YACIMIENTOS DE BAJA PRESION DE FORMACION
- 5.3 YACIMIENTOS DE ALTA PRESION
- 5.4 INTRODUCCION DE MEZCLAS LIVIANAS EN SELVA NORTE - PERU

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.0 BIBLIOGRAFIA

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Doris y Jorge, familiares y amigos quienes siempre estuvieron cerca brindando todo el apoyo necesario para el logro de esta primera meta.

1. INTRODUCCION

El constante desarrollo de la tecnología en la industria hace que las técnicas utilizadas en el pasado puedan ser reemplazados constantemente por otras que ofrecen mayor calidad y mejores resultados.

En los últimos años el uso de mezclas livianas y flexibles en la cementación de pozos ha crecido considerablemente debido principalmente a su mejor calidad en comparación con las mezclas de cemento utilizadas tradicionalmente así como también a su menor costo en muchos casos.

El presente trabajo tiene como finalidad dar a conocer las ventajas del uso de mezclas de cementos livianas y flexibles, para lo cual hace referencia de publicaciones SPE, aplicaciones exitosos a nivel mundial y finalmente el primer trabajo realizado en Perú (Lote 1AB).

2. DEFINICIONES BASICAS

2.1 OBJETIVOS DE UNA CEMENTACION PRIMARIA

El objetivo más importante de todo trabajo de cementación primaria es proporcionar un buen aislamiento entre las zonas productivas y hasta superficie, lo que debe permanecer durante toda la vida del pozo. En ninguna circunstancia debe ser posible movimiento alguno de fluido (gas y/o líquido), a través del espacio anular cementado. En el espacio anular hay dos posibles vías para el movimiento de fluidos: las interfaces (cemento/roca y/o cemento/cañería) y a través de la matriz del cemento.

Aunque se identifica a la pobre remoción del lodo como una de las causas principales de problemas de comunicación, puede ocurrir que exista pobre adhesión en las interfaces, aún cuando el revoque del lodo y películas oleosas se hayan eliminado completamente. La remoción del lodo no está incluida en el alcance de este trabajo y se supone que la totalidad de las técnicas apropiadas son aplicadas en cada pozo para eliminar dicho problema.

La adhesión del cemento puede estar afectada por propiedades de la lechada tales como filtrado y agua libre, pero principalmente se encuentra afectada por la compresión del cemento y cambios en los esfuerzos ejercidos sobre el cemento debido a variaciones de presión y temperatura en el pozo, especialmente dentro del casing así como en la formación.

2.2 MEZCLAS CONVENCIONALES DE CEMENTACION

En términos generales, dos tipos de lechadas se usan actualmente para la cementación de pozos, a menos que hayan otros requerimientos por la

hidrostática. El primer tipo es una lechada “neta” o “de cola” con densidades desde 15.5 lb/gal (1860 kg/m³) hasta 16.5 lb/gal (1980 kg/m³), dependiendo del tipo de cemento y de la BHST (temperatura estática de fondo de pozo), que se usa para anclar el casing y continuar lo antes posible la perforación. Se emplean aditivos según los requerimientos, para mejorar la reología y otras propiedades que mejoran el aislamiento de las zonas productoras.

El segundo tipo es una lechada de relleno que tiene menos densidad y propiedades más pobres, la que, una vez fraguada, desarrollará baja resistencia y alta porosidad que sin embargo alcanzan para proteger y soportar el casing. Ambas lechadas, tanto la de anclaje como la de relleno, se emplean para reducir el costo total de un pozo.

Sin embargo existen casos en el cual la presión de las formaciones a cementar se encuentra por debajo de lo normal, donde cementar con mezclas convencionales implica gran riesgo de fractura durante el bombeo. Una solución común es la cementación en etapas múltiples, que tiene como principal objetivo la colocación de cemento en el anular, pero esto no indica necesariamente lograr un buen aislamiento de las zonas productoras.

2.3 PROPIEDADES MECANICAS DEL CEMENTO

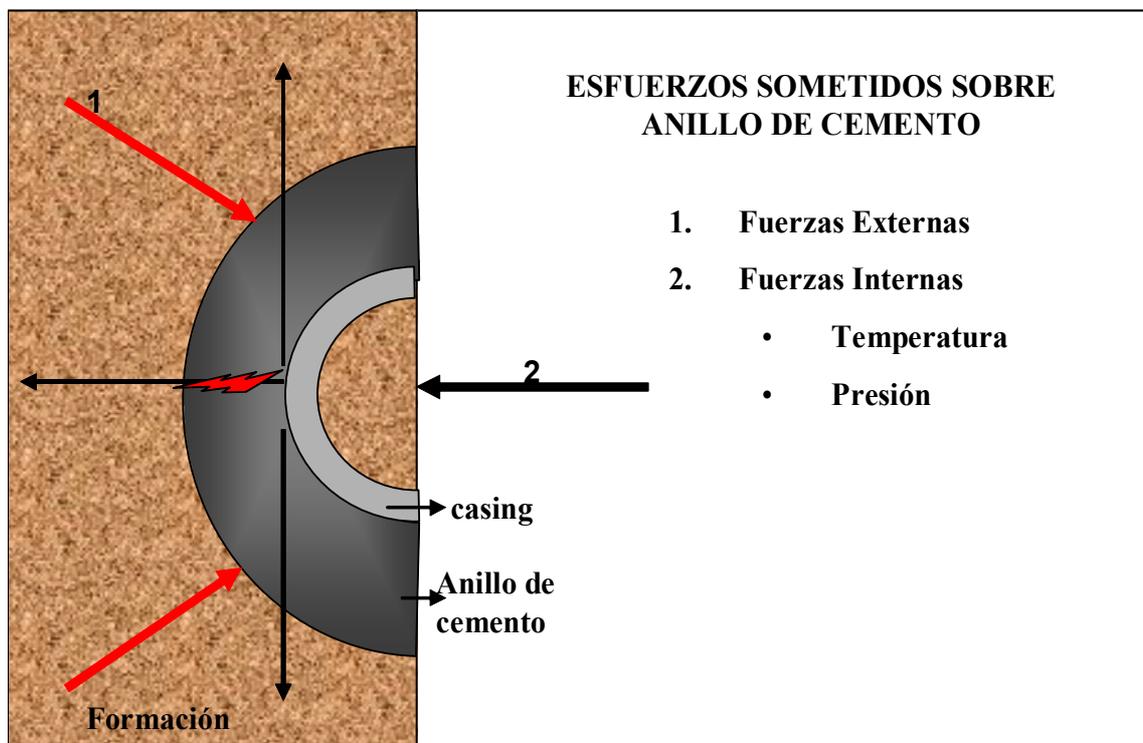
Para obtener resultados satisfactorios en una cementación primaria (tanto el anclaje y soporte de cañería así como el apropiado aislamiento de zonas) es necesario que el cemento desarrolle adecuadas propiedades mecánicas. Al respecto, la práctica de décadas ha exagerado la importancia de la resistencia a la compresión y olvidado que otras propiedades como las resistencias a la tensión y

flexión y las propiedades elásticas tienen mayor relevancia en la competencia del anillo de cemento (concepto de cemento “flexible”).

2.4 ESFUERZOS SOMETIDOS SOBRE EL ANILLO DE CEMENTO

Una vez fraguado el cemento, este sufrirá diversos esfuerzos durante la vida del pozo tales como (figura 2-1):

Fig. 2-1



2.4.1 FUERZAS EXTERNAS

Es el esfuerzo ocasionado por el medio o formaciones que rodean al anillo de cemento, Estas se pueden deber a formaciones plásticas, movimientos tectónicos, presurización de yacimientos, depletación de reservorios. Este esfuerzo se manifiesta en forma radial y afecta principalmente el esfuerzo de compresión del cemento.

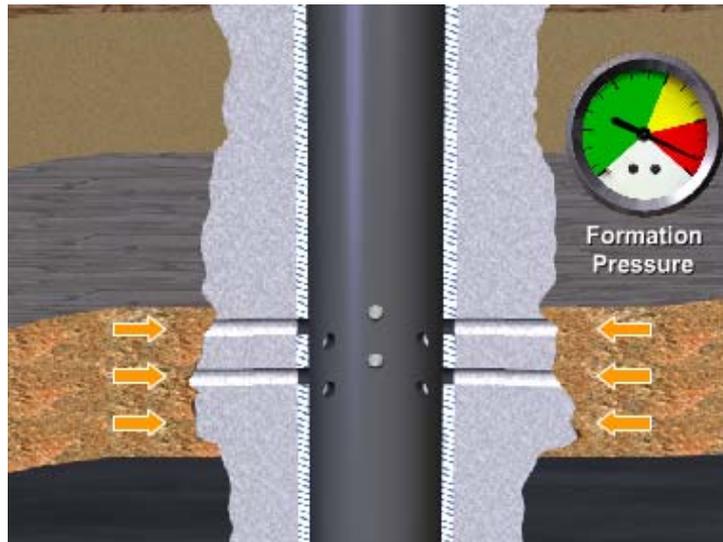


Fig. 2-2 Incremento de presión de formación tiende a comprimir el anillo de cemento

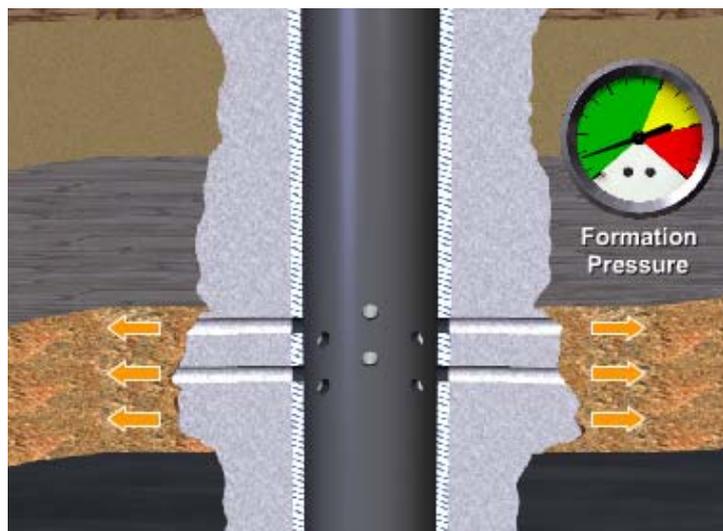


Fig. 2-3 Disminución de presión en formación tiende a expandir el anillo de cemento

2.4.2 FUERZAS INTERNAS

Son los esfuerzos que tienen su origen dentro del pozo y estos se pueden deber a variaciones de presión y/o temperatura dentro del pozo.

INCREMENTO DE PRESION EN EL POZO

Se da cuando se presuriza el casing por diversos motivos tales como pruebas de integridad de casing, inyección de fluidos, etc. Este efecto tiende a expandir el casing y por ende el anillo de cemento esforzando al anillo tanto en forma radial como en forma tangencial. Sus características son:

- Esfuerzo en eje radial es de compresión
- Esfuerzo en eje tangencial es de tensión
- Los esfuerzos de tensión y compresión son directamente proporcionales a la presión interna del casing.
- Esfuerzo de tensión es mayor en la interfase casing/cemento.
- **Problema Potencial: Rotura del anillo de cemento (Fig. 2-4)**
- Esfuerzo de tensión y compresión son iguales en la interfase roca-cemento.
- Frente a formaciones suaves, se requerirá cementos con mayor resistencia a la tensión, debido a que el anillo tiende a expandirse en mayor magnitud.

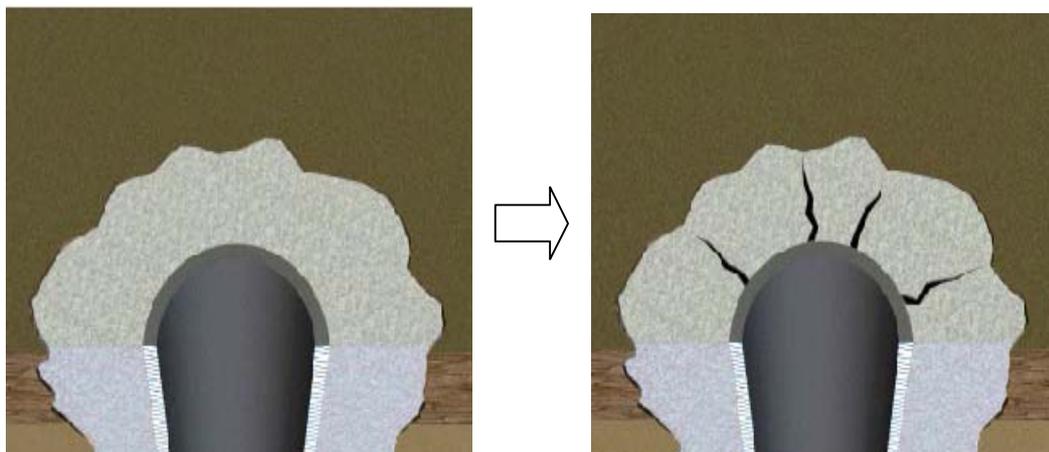


Fig. 2-4 Muestra falla de cemento por Tensión debido a incremento de presión

DISMINUCION DE PRESION EN EL POZO

Normalmente se da cuando el pozo es productor de gas habiendo sido inicialmente completado con cualquier fluido de mayor densidad, o cuando el yacimiento empieza declinar por lo que la presión declina dentro del pozo. El efecto causado es principalmente la contracción del casing al igual que el anillo del cemento. Características:

- Esfuerzo en eje radial: Tensión
- Esfuerzo en eje tangencial: Compresión
- El esfuerzo de tensión es mayor en la interfase casing/cemento
- **Problema Potencial: perdida de adhesión y sello entre el cemento y las interfaces del casing y formación. (Fig. 2-5)**
- Frente a formaciones será necesario cementos con alta resistencia a la tensión.

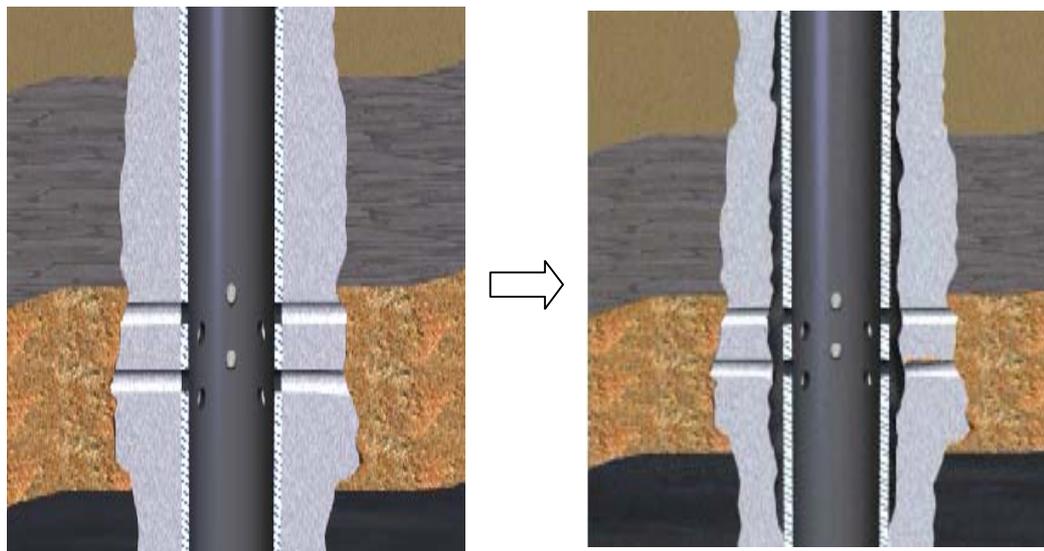


Fig. 2-5 Falla de cemento por Tensión debido a disminución de Presión

INCREMENTO DE TEMPERATURA

En pozos inyectores de vapor o fluidos de alta temperatura para mejorar la producción. Características:

- Esfuerzo en eje radial : compresión
- Esfuerzo en eje tangencial es compresión cerca de la interfase casing/cemento; y Tensión cerca de la interfase cemento/roca
- Problema potencial: rotura del anillo de cemento

2.5 PROBLEMAS Y CONSECUENCIAS DE UN MAL CEMENTO

PROBLEMAS DEBIDO A FALLA DE CEMENTO

Los problemas que causan una falla del aislamiento son bastantes críticos, los cuales pueden inclusive hacer abandonar un pozo.

- Migración de fluidos incontrolados a través de anular. Cuando se comunican dos reservorios a través del anular.
- Producción de fluidos de intervalos no deseados, como pueden ser agua o gas.
- Inviabilidad de trabajos de estimulación y proyectos de recuperación secundaria. Esto debido a que el reservorio a estimularse no se encuentra totalmente aislado por lo que el fluido inyectado puede comunicarse con otras formaciones no objetivas.

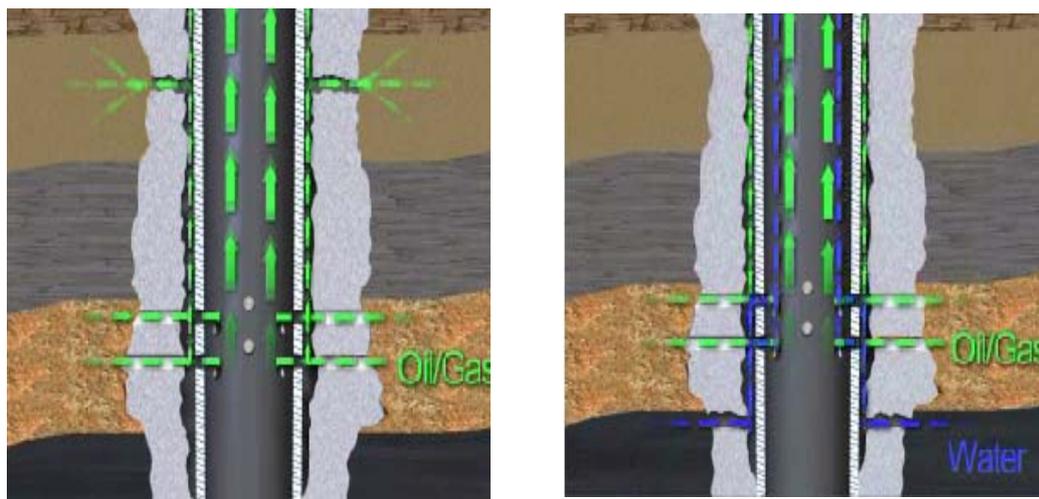


Fig. 2-6 Falla de cementación y formación de canales en el anular

Izquierda. Canalización de los fluidos a través del anular.

Derecha: Producción de fluidos indeseables (agua)

CONSECUENCIAS DE UN AISLAMIENTO NO EFECTIVO

- Pozo no alcanza verdadero potencial productivo.
- Disminución de reservas.
- Perdida de fluidos debido a comunicación con reservorios de baja presión
- Costo adicional de reparación no siempre efectivo
- Riesgos de seguridad debido a flujos no controlados.

3 LECHADAS LIVIANAS Y FLEXIBLES

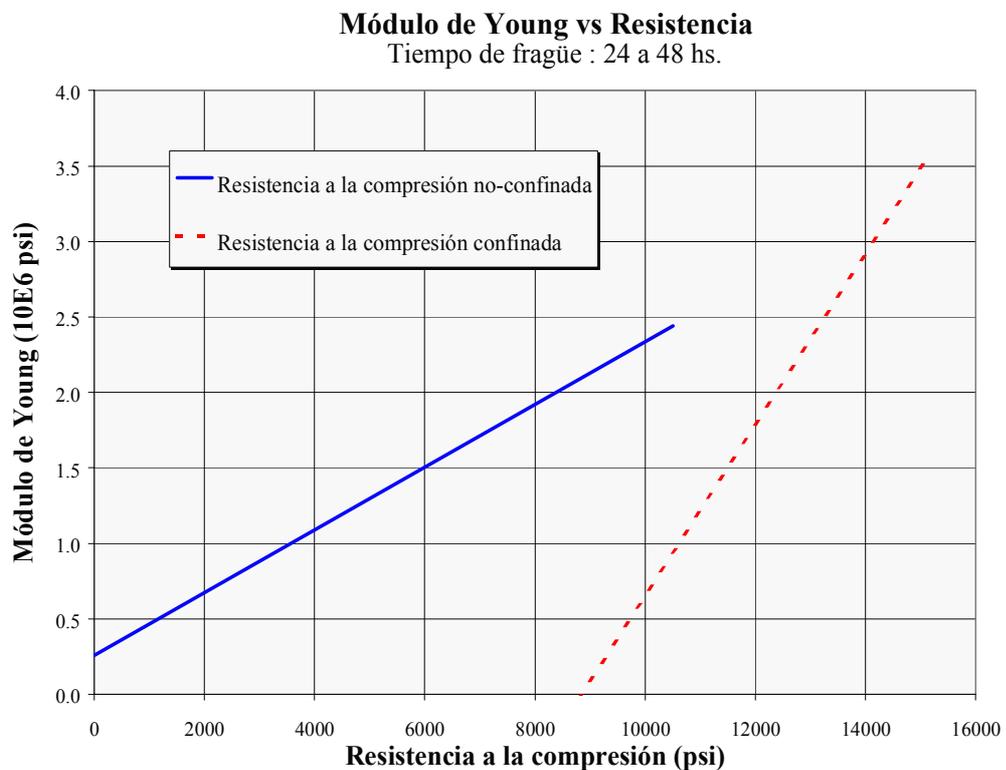
3.1 DEFINICION

Lechadas livianas y flexibles son mezclas de cemento de baja densidad que una vez fraguados, cumplen con los requerimientos necesarios (resistencia a la compresión, flexión y tensión) para la continuación de la perforación así como el aislamiento de zonas productoras de hidrocarburos durante la vida productora del pozo.

En realidad, sometidos a confinamiento, con el tiempo todos los cementos van a alcanzar una resistencia más o menos equivalente a la de la formación a su alrededor, independientemente del diseño inicial de la lechada (referencia 1). Desafortunadamente, se desarrolló una correlación entre la atenuación de onda sónica compresional (CBL) y la resistencia a la compresión, lo que indujo a pensar que cuanto mayor fuese la resistencia a la compresión, mejor resultaría la adhesión del cemento. El CBL mide en realidad el acoplamiento en las interfaces, el volumen llenado por el cemento y la porosidad del cemento fraguado. Es obvio que la porosidad está relacionada con el contenido de sólidos pero no necesariamente con el contenido de cemento (Debido que la gravedad específica del cemento es 3.14, el uso de partículas de menor gravedad y tamaño en la mezcla reducirán la porosidad y densidad de la misma). Sin embargo la velocidad de onda compresional y su atenuación también esta afectado por otros factores tales como acoplamiento efectivo, canales de gas, agua o lodo. En el campo se suele tratar de resolver una pobre adhesión del cemento aumentando la densidad de lechada (reduciendo la porosidad del cemento) en vez de resolver directamente el problema.

Además, la citada correlación fue basada en medidas de resistencia a la compresión sin confinamiento lo que no refleja las condiciones de fondo de pozo, donde los cementos son dúctiles en vez de frágiles y las resistencias a la compresión resultan entre 2 y 9 veces mayores (ver Figura 3-1); a título informativo notar que el módulo de Young confinado y no-confinado no varía en mas de 50% para el mismo cemento.

Fig. 3-1



Las lechadas de cemento “netas” (sin aditivos) mezcladas según las especificaciones API producirán generalmente cementos frágiles, de alta resistencia (en general módulos de Young mayores que 1.3E6 psi (9.0E6 kPa) y

relaciones de Poisson menores que 0.20) y cementos de baja permeabilidad (menor que $0.001 \text{ md} - 1\text{E-}6\mu\text{m}^2$). Sin embargo, el acoplamiento acústico y el sello hidráulico en la formación y el casing no están para nada relacionados con la resistencia a la compresión. La adhesión del cemento no se logra mediante una reacción química sino por interacción de naturaleza física y, en consecuencia, está más relacionada con la ductilidad del cemento y la rugosidad del casing. Sin embargo, la adhesión del cemento está vinculada de cierta manera con la resistencia a la compresión a través de su relación con la resistencia a la tensión (RT).

Las mezclas livianas debidamente aditivadas producirán mezclas flexibles, dúctiles y de alta resistencia a la compresión suficiente para garantizar un buen sello hidráulico durante la vida productiva del pozo.

3.1.1 ADITIVOS ESPECIALES.

Reducen la densidad y mejoran la flexibilidad y ductilidad de la mezcla de cemento debido a su menor gravedad específica y menor tamaño con respecto a las partículas de cemento, sin afectar en mayor medida la resistencia a la compresión. Entre ellos tenemos:

- Perlita expandida
- Gilsonita
- Finos de Carbón
- Micro esferas
- Microfibras minerales

PERLITA EXPANDIDA

Son partículas volcánicas que han sido expandidas a altas temperaturas (Fusión). La gravedad específica de la perlita expandida es de 0.53, lo cual permite la preparación de mezclas livianas competentes de hasta 12 lb/gal. En muchos casos, el uso de Bentonita (2 – 4% BWOC) previene la segregación de las partículas de perlita en la mezcla.

Las partículas de perlita expandida contienen poros que sometidos a alta presión hidrostática colapsan. Por tanto la gravedad específica de la perlita se incrementa hasta (0.94 a 3000 psi). Esto implica que la densidad final de la mezcla es mayor en fondo del pozo, por lo que en superficie se debe preparar mezclas de cemento-perlita de menor peso. Tabla 3-1 muestra la diferencia de densidades observadas a 3000 psi y condiciones atmosféricas.

TABLA 3-1

PROPIEDADES DE LA MEZCLA A DIFERENTES PRESIONES							
RELACION PERLITA / CEMENTO (Volumen Sx:ft ³)	Bentonita (%)	Agua de mezcla (gln/sx)	CONDICIONES ATMOSFERICA		3000 psi		Resistencia a la compresión (24 hrs, 100 °F, 3000 psi)
			Densidad de mezcla (lb/gln)	Rendimi ento (ft ³ /sx)	Densidad de mezcla (lb/gln)	Rendimi ento (ft ³ /sx)	
			1 : 0.5	2	6.5	13.80	
	2	7.0	13.58	1.58	14.57	1.47	2800
	2	7.5	13.36	1.65	14.29	1.54	
	2	8.0	13.16	1.72	14.02	1.61	2200
	2	8.5	12.98	1.78	13.75	1.67	
1 : 1	2	9.0	12.26	2.00	13.71	1.79	1950
	2	9.5	12.15	2.07	13.55	1.86	
	2	10.0	12.02	2.14	13.37	1.93	1500
	2	10.5	11.91	2.20	13.20	1.99	
	2	11.0	11.81	2.27	13.04	2.06	1050
1 : 1.5	2	10.5	11.50	2.36	13.31	2.04	
	2	11.0	11.41	2.43	13.16	2.11	1125
	2	11.5	11.31	2.49	13.00	2.17	
	2	12.0	11.23	2.56	12.86	2.24	1050
	2	12.5	11.17	2.63	12.71	2.31	890
	4	11.5	11.38	2.50	13.04	2.18	1170
	4	12.0	11.29	2.57	12.91	2.25	1000
	4	12.5	11.21	2.64	12.77	2.32	860
	4	13.0	11.15	2.70	12.65	2.38	740
	4	13.5	11.09	2.77	12.53	2.45	650
	4	14.0	11.03	2.84	12.43	2.52	600
1 : 2	2	12.0	10.92	2.72	12.98	2.29	1300
	2	12.5	10.86	2.78	12.82	2.35	
	2	13.0	10.80	2.85	12.71	2.42	1025
	2	13.5	10.75	2.92	12.60	2.49	
	2	14.0	10.69	2.98	12.49	2.55	775
	2	14.5	10.63	3.04	12.39	2.61	
	4	13.0	10.85	2.86	12.76	2.43	1000
	4	13.5	10.79	2.93	12.64	2.50	870
	4	14.0	10.73	2.99	12.53	2.56	760
	4	14.5	10.69	3.06	12.43	2.63	670
	4	15.0	10.65	3.13	12.33	2.70	590
	4	15.5	10.60	3.19	12.22	2.76	520

GILSONITA

Son partículas provenientes del mineral asfaltita, de gravedad específica de 1.07 y requerimiento de agua de 2 gal/ft³ lo que hace posible la preparación de mezclas livianas de alta resistencia a la compresión. Es posible el uso de hasta 50 lbs de gilsonita por saco de cemento Pórtland (94 lbs), para obtener mezclas de hasta 12 lb/ft³; sin embargo el uso de bentonita siempre será necesario para reducir problemas durante el mezclado.

Las partículas de Gilsonita son sólidos angulares, de amplio rango de tamaño (hasta 0.6 cm.) y son usadas también para prevenir la pérdida de circulación, debido a que su punto de fusión se encuentra por encima de 260 °F, el uso de dicho producto esta limitado a pozos donde BHST es menor que 260°F.

FINOS DE CARBON

Como agente alivianador, el comportamiento del carbón es similar a la gilsonita. Su gravedad específica de 1.3 y temperatura de fusión de 1000°F, permite usarlo en pozos profundos de alta BHST. Sin embargo siempre requerirá el uso de la bentonita para la estabilización de la mezcla.

MICRO-ESFERAS HUECAS

El uso de mezclas extendidas con micro esferas es una técnica que se esta desarrollando en los últimos años. Las micro esferas son pequeñas esferas llenas de gas con una gravedad específica que varia entre 0.4 y 0.7; lo cual permite la preparación de mezclas de muy bajas densidades (8.5 lb/gal) y alta resistencia a la compresión en relación con otras mezclas livianas. La resistencia

a la compresión de las mezclas livianas con micro-esferas es por lo general 50-60% mayor que las que obtiene con Bentonita o Metasilicato de Sodio como aditivos alivianadores.

Existen 2 tipos de micro esferas que actualmente se usan en cementación: cerámica y vidrio que se diferencian principalmente en la resistencia a la compresión.

La aplicación original de las micro esferas se dio en las cementaciones primarias de casings de superficie y conductoras, donde las cavernas y zonas de baja presión son bastantes comunes. Sin embargo, en los últimos años el uso de las micro-esferas se han extendido hacia los aislamientos de zonas productoras y/o de interés de baja presión donde mezclas convencionales implican cementaciones en múltiples etapas. Inicialmente, el uso de las micro-esferas estuvo limitado a pozos poco profundos, debido al colapso que estas sufren frente a altas presiones hidráulicas. Con el desarrollo de las micro-esferas de vidrio que son capaces de aguantar presiones de hasta 10,000 psi el uso de las micro-esferas se extiende incluso a pozos muy profundos.

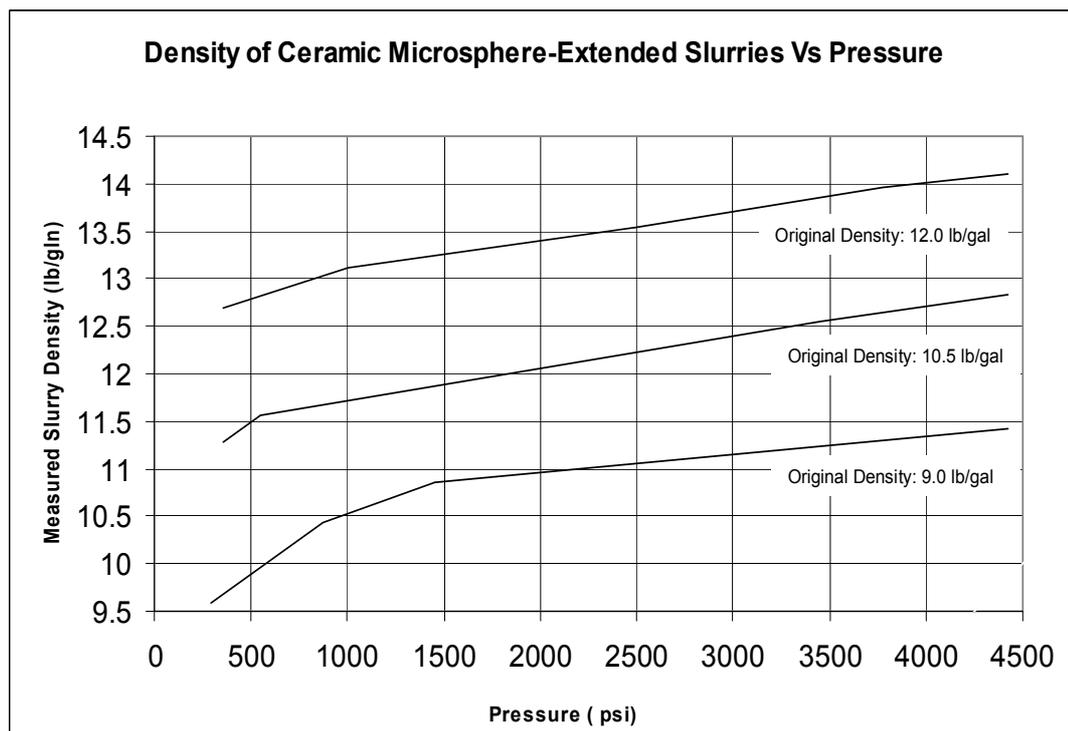
Mezclas de cemento con micro-esferas requieren especial cuidado en su diseño y mezclado, el procedimiento es descrito brevemente:

Existen varios tipos de micro esferas que se pueden utilizar para reducir la densidad de las mezclas, los cuales son clasificados de acuerdo a la máxima presión hidrostática que pueden soportar. El tamaño promedio de las micro esferas es similar a las partículas del cemento y pueden variar desde 20 – 200 μm con espesor de paredes desde 0.5 – 2 μm . La mayoría de las micro-esferas de cerámica aguantan presiones de 5000 psi; sin embargo existen micro

esferas de vidrio que pueden soportar hasta 10,000 psi, mucho más costosa que las de cerámica por lo que su uso es muchas veces limitado.

La composición de las micro-esferas de cerámica esta basada en la puzolana derivada de cenizas volcánicas y aluminosilicatos. Como se mencionó anteriormente, las micro-esferas son susceptibles a romperse y colapsar cuando son expuestas a altas presiones hidrostáticas, dando como resultado que la densidad de la mezcla se incremente. Este incremento de densidad puede ser calculado tal como se muestra en la Fig. 3-2, lo que debe ser tomado en cuenta cuando se realice los diseños de las mezclas a utilizarse.

Fig. 3-2

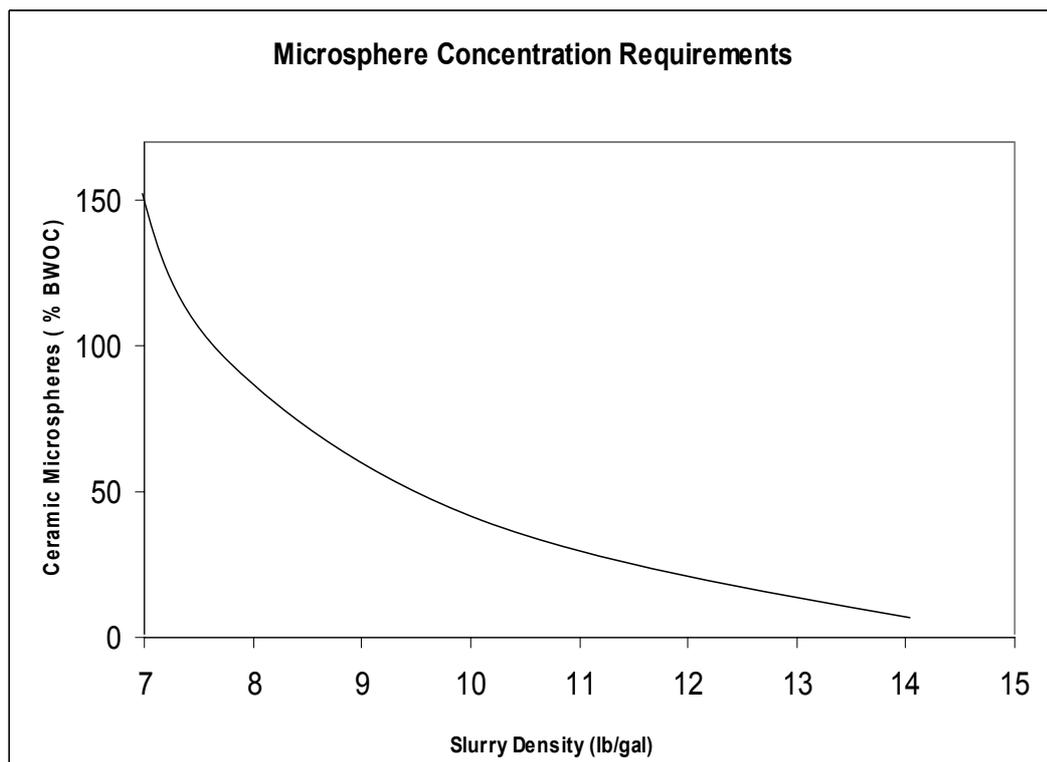


Es importante asegurar que las micro-esferas deben ser pre-mezcladas en seco con el cemento y nunca pre-mezclarse en agua debido a que su gravedad

específica es menor que el agua. Variaciones en la relación de micro esferas y cemento darán como resultado densidades erráticas durante el mezclado.

Las micro-esferas son compatibles con todos los tipos de cemento. Las Figs. 3-3, 3-4 y 3-5 ilustran la cantidad de micro esferas requeridas para alcanzar densidades entre 8.5 y 15 lb/gal, requerimientos de agua y rendimientos de las mezclas respectivamente. La relación entre la densidad de las mezclas de cemento – micro-esferas y la resistencia a la compresión es ilustrada en la tabla 3-2.

Fig. 3-3



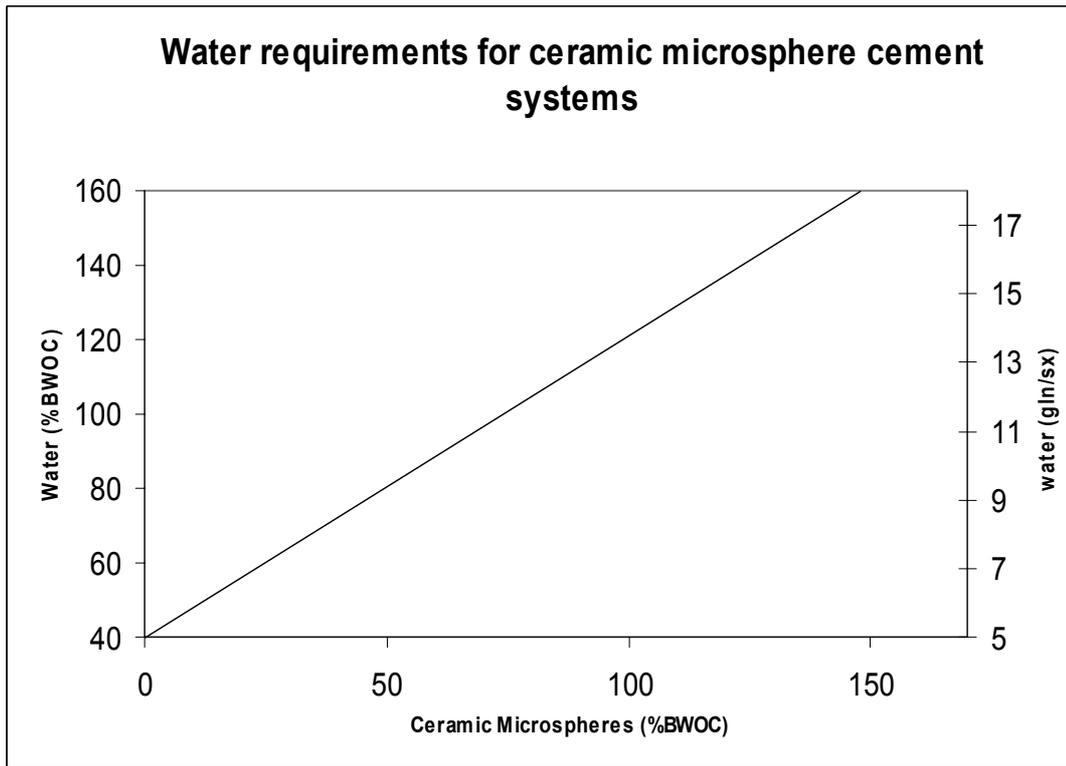


Fig. 3-4

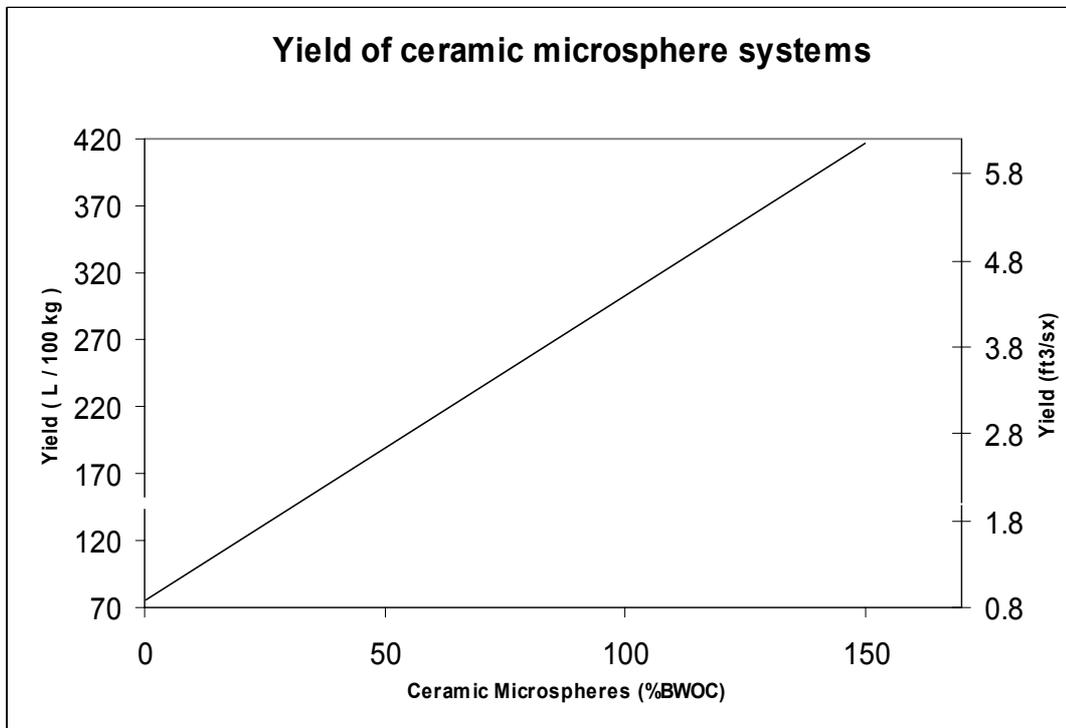


Fig. 3-5

Curing Pressure (psi)	Compressive Strength Data (psi)										
	Slurry Mixing Densities (lb/gal)										
	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5				
0	55	100	160	250	270	-	420				
800	115	115	125	250	250	450	470				
2000	-	-	175	315	355	420	480				
3000	215	-	250	295	295	435	640				

All slurries were cured 24 hr at 80°F

TABLA 3-2

3.1.2 VENTAJAS DEL USO DE MEZCLAS LIVIANAS Y FLEXIBLES

El uso de las mezclas de cemento flexibles y de baja densidad en la cementación de pozos petroleros presentan las siguientes ventajas:

- Cementación en etapa única de formaciones de baja presión, donde el uso de mezclas convencionales implicaría pérdidas de circulación durante el bombeo y por tanto sería necesario la cementación en múltiples etapas.
- El uso de mezclas flexibles y dúctiles mejoran el comportamiento del cemento durante la vida productiva del pozo. Es decir presenta mejor respuesta frente a diversos efectos que ocurren durante la vida productiva del pozo, estos pueden ser.
 - Disminución de presión dentro del pozo debido a la depletación de la formación y/o pozos de gas, lo que ocasiona que el casing se comprima induciendo micro-canales entre casing y cemento.
 - Sobre presión del cemento y enfriamiento del mismo debido a trabajos de fracturamiento y acidificación, lo que induce a que el anillo de cemento se expanda radialmente, luego del trabajo este debe volver a su estado inicial manteniendo la adherencia. Para un buen sello en el espacio anular, el cemento debe ser lo suficientemente flexible para comportarse de forma similar a como lo hacen los elementos elásticos en un packer.
 - Baleo o punzonamiento; En cementos frágiles las operaciones de baleo ocasionan la formación de pequeños microcanales que pueden comunicar zonas indeseables.

- Mezclas de baja densidad minimiza el daño a la formación inducido por la diferencia de presiones entre la columna hidrostática y la presión de reservorio. Esto es mucho más importante en formaciones de baja permeabilidad donde el daño producido durante la perforación y completación del pozo influye considerablemente en la producción final del pozo. Mezclas de baja densidad implican un mayor rendimiento del cemento, por tanto en la mayoría de casos se observa una reducción en los costos de materiales. Sin embargo hay que tener en cuenta que el uso de mezclas livianas y flexibles proveen incluso un cemento de mejor calidad por lo que si el precio fuese mayor este no debe ser impedimento para su uso.

3.2 DISEÑO DE MEZCLAS DE CEMENTACION

El procedimiento que se sigue para diseñar el tipo de mezclas de cemento a requerirse en un pozo depende de factores tales como:

- Gradiente de Temperatura,
- Propiedades del lodo.
- Profundidades críticas (gas, pérdida de circulación, etc.).
- Desviaciones del pozo.
- Calibre del hueco.
- Compatibilidad del lodo con los materiales de cementación.
- Topes formacionales finales y determinación de las zonas potencialmente productivas.

A partir de datos de densidad de lodo obtenidos durante la perforación y las gradientes de fractura de las formaciones productivas podemos construir una grafica que nos muestra el rango de densidades de la mezcla de cemento necesario para cementar el pozo. (graf 5-1, 5-2).

Posteriormente se determina las composiciones y volúmenes de las mezclas de cemento a usarse dependiendo del tipo de casing a cementarse.

Como se dijo anteriormente el diseño de la mezcla a usarse dependerá en gran medida del tipo de casing y las zonas a cementarse. Por tanto esto lo podemos clasificar como:

3.2.1 ANCLAJE Y SOPORTE DE CASING

Durante la construcción del pozo existe la necesidad de acelerar el fragüe del cemento y la adhesión a las interfaces, de modo que el equipo de perforación no permanezca inactivo por largo tiempo “en espera de fragüe” dado que esto aumenta el costo del pozo. Esto es obviamente más importante costa afuera y en pozos profundos donde el costo del equipo puede ser un orden de magnitud mayor.

Sobre el casing y el cemento se ejercen elevadas cargas axiales por los métodos de vinculación y suspensión y, más tarde, por la misma perforación y otras operaciones. Esto es especialmente crítico si el pozo está muy desviado, es horizontal o bien terminado con un sistema multilateral, casos en que el recubrimiento de cemento estará sujeto a destrucción y pérdida de adhesión debido a impactos en el casing y ciclos de presión y temperatura.

El soporte del casing puede medirse en el laboratorio con el ensayo de corte de la adhesión (“shear bond test”) y/o el ensayo de resistencia a la tensión, y calculado con la siguiente fórmula aproximada (referencia 1):

$$F = 9.69 \times RT \times D \times H$$

Donde:

F : fuerza o carga para destruir la adhesión del cemento, lb

RT : resistencia a la tensión, psi

D : diámetro exterior del casing, in

H : altura de la columna de cemento, ft

En la peor situación, la fuerza o carga para romper el cemento es el peso del casing más el peso de la sarta de perforación completa cuando se asienta

o rota el zapato. La tabla 3-3 muestra que sólo se necesitan 15 psi (100 kPa) de resistencia a la tensión para continuar la perforación empleando la citada fórmula. En la evaluación se usó el casing más pesada para cada tamaño en profundidades considerables y sólo un 5% de llenado de anular con lechada de cola y sin soporte adicional suministrado por la lechada de relleno.

Propiedades mecánicas necesarias para continuar la perforación								
Diámetro de casing (in)	Longitud de casing (ft)	Peso de casing (lf/ft)	Altura cemento de cola (ft)	Peso de la casing (lb)	Peso de la sarta de perforac. (sondeo) (lb)	Peso total (casing y sondeo) (lb)	Resist. a la tensión para soporte casing (psi)	Resist. a la tensión para soporte casing y sondeo (psi)
20	1000	133	50	133000	15500	148500	14	15
13 3/8	7000	72	350	504000	108500	612500	11	14
9 5/8	15000	54	750	802500	232500	1035000	11	15
7	22000	32	1100	704000	341000	1045000	9	14

TABLA 3-3

Experimentalmente se ha observado que para lechadas de cemento “netas”, la resistencia a la tensión puede ser estimada conservadoramente dividiendo por 10 la resistencia a la compresión. Así, en el escenario arriba descrito, sólo se necesitan 150 psi (1030 kPa) de resistencia a la compresión, lo que es menos de la tercera parte del criterio usualmente aplicado en la industria (500 psi – 3450 kPa). Sin embargo, para lechadas livianas o extendidas, no es válida la razón 1:10 tensión:compresión y, dependiendo de la composición de la lechada, esa razón puede llegar a ser tan alta como 1:2 (Referencia 8). Además, tanto el tiempo de espesamiento como el desarrollo de resistencia pueden ser acelerados en la misma proporción con aditivos apropiados.

En realidad, más del 95 % de las lechadas usadas actualmente desarrollarán más de 150 psi (1030 kPa) en un tiempo luego del fragüe inferior al tiempo de espesamiento API, o en menos de 5 horas. La figura 3-7 es un gráfico de DMA (“Dynamic Modulus Analyser”, ensayo de resistencia no destructivo) comparando el desarrollo de resistencia a la compresión de tres cementos (lechadas de 13.3 lb/gal – 1590 kg/m³) en idénticas condiciones de fondo de pozo. Las composiciones de las lechadas se muestran en la tabla 3-4. Se nota como se puede ahorrar dinero en horas de equipo usando una lechada liviana y sin esperar por 500 psi (3450 kPa). En consecuencia, para anclar y soportar el casing se puede reducir el costo y simplificar la operación usando una única lechada liviana. Un diseño apropiado puede tener una densidad mínima cercana a 12.5 lb/gal (1500 kg/m³) o, dependiendo de la presión hidrostática requerida para control, será suficiente que sea 0.5 a 1 lb/gal (60 a 120 kg/m³) más pesada que el

lodo de perforación. La tabla 3-5 contiene las lechadas y sus propiedades de resistencia para fines de comparación.

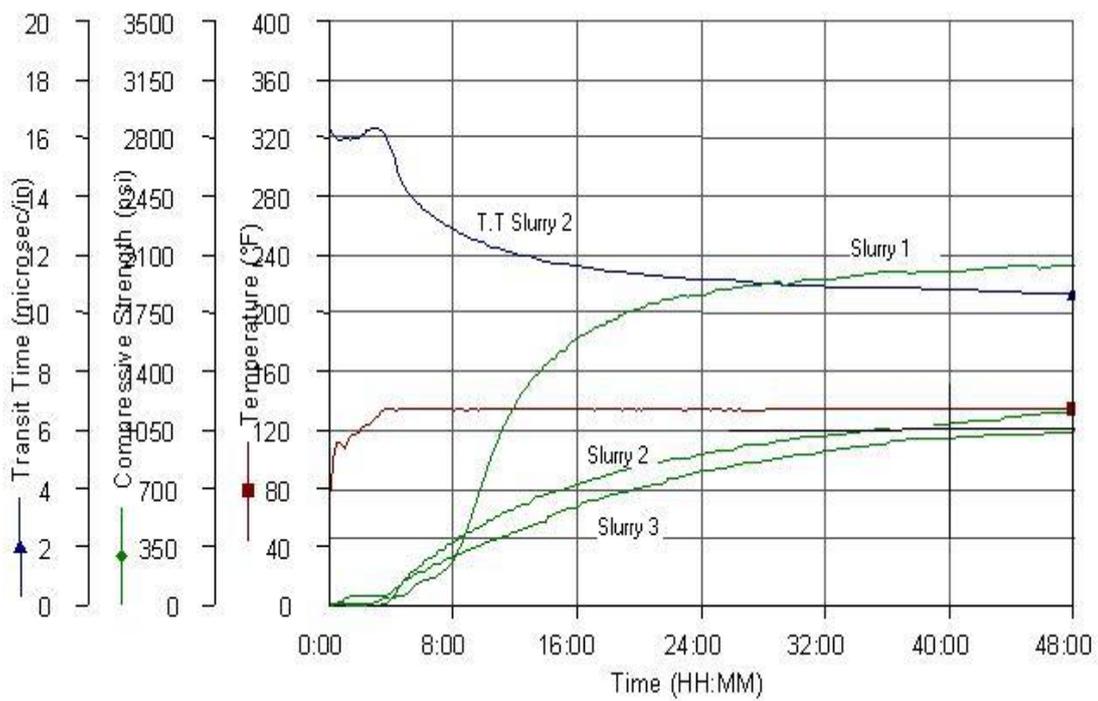


Figura 3-7: Desarrollo de resistencia de tres lechadas livianas de igual densidad pero con diferente composición

TABLA 3-4: Descripción de lechadas de cemento											
Lech. nro.	Cto. API Clase	ADITIVOS							Dens. lech. lb/gal	Tiempo espes. h:m	BHST °F
		Aditivo multi-propósito	Bentonita sódica (extend.)	Silicato de sodio (extend.)	Aluminato de sodio (extend.)	Control filtrado CMHEC	Dispersante NSSC				
1	A	15%	-	0.4%	-	-	0.45%	0.25%	13.3	4:26	135
2	A	-	-	0.36 gps	0.15 gps	-	0.45%	-	13.3	4:16	135
3	A	-	6%	-	-	-	-	-	13.3	3:44	135
4	A	-	-	-	-	-	0.2%	0.2%	15.6	3:30	135
5	A	50%	-	-	-	-	0.15%	0.15%	15.6	3:15	135

TABLA 3-5: Resultados de laboratorio y predicciones con el simulador																
Lech. nro.	Valores experimentales						Predicciones del simulador									
	TE h:m	RC 24 h. psi	RC 48 h. psi	RC 48 h. psi	RF 48 h. Psi	RT 48 h. psi	KOT Min	RC 24 h. psi	RC 48 h. psi	RC 48 h. psi	RF 48 h. psi	RT 48 h. psi	CBL mV	Alt. ft	Mód. Young Mpsi	Rel. de Poisson adim
1	4:26	1710	1950	365	365	166	4:51	1523	1626	1626	440	195	6.4	59.0	0.49	0.21
2	4:16	900	1150	296	296	128	4:29	910	1119	1119	291	123	8.8	67.6	0.44	0.18
3	3:44	800	1060	313	313	170	2:54	875	1094	1094	289	121	8.8	74.7	0.43	0.19
4	3:30	2450	3250	776	776	355	3:32	2338	2960	2960	770	326	3.8	9.4	0.95	0.18
5	3:15	1650	2050	581	581	275	3:23	1739	2076	2076	659	260	3.4	8.2	0.74	0.24

3.2.2 AISLAMIENTO DE ZONAS EN INTERFACES

Aislar las zonas de interés productivo depende principalmente de la adhesión hidráulica del cemento a las interfaces y de la permeabilidad e integridad del anillo de cemento. Para un buen sello en el espacio anular, el cemento debe ser lo suficientemente flexible para comportarse de forma similar a como lo hacen los elementos elásticos en un packer. Durante el proceso de fragüe el cemento sufrirá una compresión volumétrica (referencias 2 y 3) que puede llegar al 6 %, y que afecta tanto la adhesión hidráulica como la permeabilidad del anillo de cemento. Se han identificado dos diferentes tipos de compresión del cemento: compresión global o exterior y compresión química o interior.

La compresión global afecta la adhesión en las interfaces y variará dependiendo de la composición de la lechada. El incremento del contenido de sólidos y el agregado de sales de magnesio y/o de aluminio reduce, previene y aun elimina la compresión global. En realidad, estas sales pueden incluso inducir la expansión del cemento en condiciones de no-confinamiento.

Bajo confinamiento, el cemento llega a ser dúctil y se deforma fácilmente bajo presión. Cada vez que hay una compresión del casing debido a reducciones de presión o temperatura en el interior del pozo, el cemento se va a expandir elásticamente hasta que llega a ser plástico y se rompe la adhesión hidráulica (formación de microanillo). El despegue del cemento se puede resolver sencillamente mejorando la elasticidad del cemento o su resistencia a la flexión (RF) y a la tensión, aún empleando lechadas más livianas que las alternativas convencionales. Eso se puede lograr con el agregado de materiales como látex, polialcohol vinílico y fibras minerales semi-inertes (referencias 3, 4).

La resistencia a la flexión puede ser medida en el laboratorio, o bien estimada para lechadas “netas” empleando una razón 0.25:1 resistencia a la flexión:resistencia a la compresión. Sin embargo, el empleo de lechadas livianas y/o el agregado de aditivos (principalmente fibras minerales) cambia drásticamente esta razón hasta 1.25:1 a favor de la resistencia a la flexión y produce cemento flexible (referencia 8).

3.2.3 AISLAMIENTO DE ZONAS EN LA MATRIZ

Hay dos posibilidades de flujo a través de la matriz del cemento: (1) alta permeabilidad del cemento que puede relacionarse a una compresión interna del cemento y elevada porosidad debidas a un pobre diseño de lechada, y (2) falla del anillo de cemento debido a su agrietamiento cuando es sometido a cambios de presión y temperatura.

La compresión interna está relacionada con reducción de volumen absoluto (resultando en aumento de porosidad) que se produce cuando el agua y el cemento se combinan para formar hidratos. Este proceso comienza inmediatamente después de la mezcla de la lechada y continúa hasta que el endurecimiento del cemento se completa, años después. La compresión química es baja durante el período de hidratación, muy alta durante el fragüe y el endurecimiento inicial, y muy baja de allí en adelante hasta el endurecimiento final.

En el corto plazo, durante el proceso de fragüe, fluidos de alta movilidad (gas) pueden invadir la matriz del cemento y percolar hacia arriba en el espacio anular produciendo canales que van a afectar seriamente la respuesta

de ondas sónicas (CBL) y, posiblemente, afectar el aislamiento de zonas. Lechadas con baja agua libre y bajo filtrado, fragüe en ángulo recto (corto tiempo de transición entre líquido y sólido) y el empleo de aditivos para control de gas pueden reducir y prevenir este problema. El agregado de partículas semi-inertes muy pequeñas (en un rango que va desde el tamaño de las partículas de cemento hasta 10 veces menor) también ayuda en el control de movimiento de fluidos a través de la matriz.

En el largo plazo, se puede producir el agrietamiento radial del anillo de cemento en cualquier momento durante la vida del pozo. El agrietamiento radial se debe normalmente a fuerzas tangenciales y de flexión más que a fuerzas de compresión. Estas fuerzas comienzan en las interfaces del anillo cuando se expande el casing o bien formaciones plásticas. Bajo cargas muy elevadas (gran variación de presión o temperatura), las fuerzas compresivas pueden destruir el anillo de cemento compactando la porosidad matricial.

En consecuencia, para mejorar el aislamiento de zonas, además de mantener tan bajas como sea posible la porosidad y permeabilidad del cemento fraguado, se necesita aumentar la ductilidad (resistencias a la tensión y a la flexión, (referencia 6) del cemento fraguado, pero no mediante el empleo de alta densidad de lechada (para reducir porosidad) puesto que así se aumentaría la resistencia a la compresión y se induciría fragilidad. Las mejoras en permeabilidad y en ductilidad se pueden lograr con lechadas livianas y el agregado de materiales semi-inertes (más livianos que el cemento) tales como micro-fibras minerales que reducen la porosidad del cemento y mejoran sus propiedades frente a la flexión y la tensión (referencia 5).

4 SIMULADOR MATEMATICO CM VISION

4.1 DEFINICION

Si bien las resistencias a la flexión y a la tensión son consideradas en la industria de la construcción y el equipamiento para su ensayo no es muy costoso, habitualmente no se las emplea en aplicaciones para la industria del petróleo. Con el objeto de eliminar el paradigma de la resistencia a la compresión y difundir el concepto de “cemento flexible” en el diseño de lechadas, se ha desarrollado un simulador de resistencia de cemento CMVISION (referencia 8) que también evalúa el desempeño del cemento basado en su respuesta mecánica a esfuerzos cíclicos con el propósito de diseño preliminar de lechadas.

El simulador es una combinación de dos ecuaciones polinomiales programadas empleando lógica difusa para tener en cuenta efectos sinérgicos o esporádicos efectos desfavorables. El simulador produce una carta similar a la de un DMA (ensayo no destructivo) que muestra la evolución de la resistencia del cemento. Esta evolución sigue una curva característica con forma de “S” (figuras 4-2 y 4-3). La primera parte aplanada de la curva continúa hasta que se alcanza un máximo en la temperatura asociada a la hidratación, es decir más o menos equivalente al ensayo de tiempo de espesamiento pero bajo condiciones estáticas y hasta la BHST en vez de la BHCT (temperatura de circulación en fondo de pozo). El final de la curva aplanada se ha denominado “Kick Off Time” (KOT), es equivalente a alcanzar 5 psi (35 kPa) de resistencia a la compresión en una carta DMA y más o menos similar al tiempo de espesamiento de la lechada. La ecuación contiene varios términos que relacionan las interacciones químicas de cada componente con las propiedades físicas de la lechada, como función del

tiempo y la evolución de la temperatura. También hay un término adicional para algunos aditivos que responden sinérgicamente cuando se combinan:

$$KOT = \text{Constante} + F(\text{ft} \& \text{t}) + Q(\text{ft} \& \text{t}) \text{ 1 a N} + S(\text{ft} \& \text{t}) \text{ 1 a N}$$

donde:

F (ft & t)	Término que describe propiedades físicas de los materiales empleados, como función de tiempo y temperatura
Q (ft & t) 1 a N	Término que representa el comportamiento químico de todos y cada uno de los componentes, también función de tiempo y temperatura.
S (ft & t) 1 a N	Término que da cuenta de la eventual existencia de sinergia entre componentes

La segunda parte de la curva en “S” (pendiente elevada) representa el endurecimiento temprano y la tercera parte (pendiente aplanada) muestra el endurecimiento final. En el simulador, ambas partes son calculadas empleando una sola ecuación exponencial. La resistencia final se calcula en el “polinomio base” y la evolución de resistencia se calcula en el “polinomio exponente”. Nuevamente, esta expresión contiene varios términos que relacionan las interacciones químicas de cada componente con las propiedades físicas de la lechada, como función del tiempo y la evolución de la temperatura, con un término adicional para tener en cuenta efectos sinérgicos. El valor de “resistencia final” se calcula para 48 horas atendiendo a que, transcurrido ese tiempo, más del 90 % de la resistencia total ya se ha desarrollado en cementos de

uso petrolero. Además, es usual que este período corresponda al tiempo en que se corren los perfiles de cemento para evaluar el aislamiento de zonas.

$$\{F2(ft \& t) + Q2(ft \& t) 1 a N + S2 (ft \& t) 1 a N\}$$

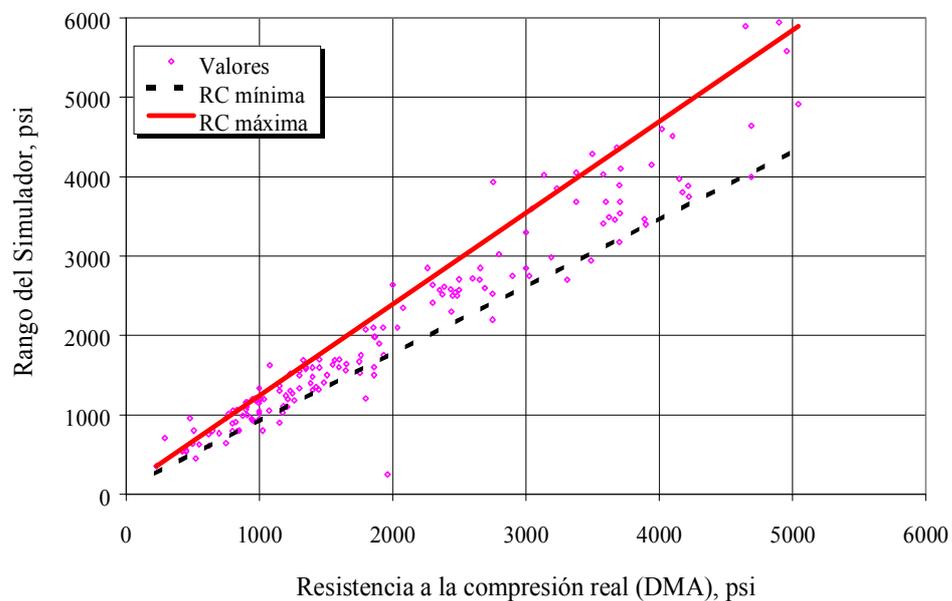
$$RC = \{F1(ft \& t) + Q1(ft \& t) 1 a N + S1(ft \& t) 1 a N\}e \wedge$$

Donde cada uno de los términos tiene significados similares a los indicados arriba (expresión para KOT).

Tanto para el KOT como para la resistencia a la compresión se calcula un rango, basados en resultados obtenidos con cementos de diversas partes del mundo. De este modo, el gráfico final de evolución de resistencia a la compresión se presenta como una banda en vez de una curva.

Fig. 5-1

RC real vs RC mínima y máxima del simulador



La figura 5-1 representa la comparación entre las medidas de resistencia con DMA versus las predicciones del simulador. La exactitud del simulador está dentro del límite de error aceptado para este tipo de ensayo según

definición de la ASTM o mejor que el 75 %. A modo de comparación, la figura 4-2 muestra carta obtenida en la DMA para la lechada nro.5 (indicada en la tabla 3) mientras que la figura 4-3 reproduce la simulación realizada para la misma.

Figura 4-2: Carta de RC ensayada para lechada nro. 5 (DMA)

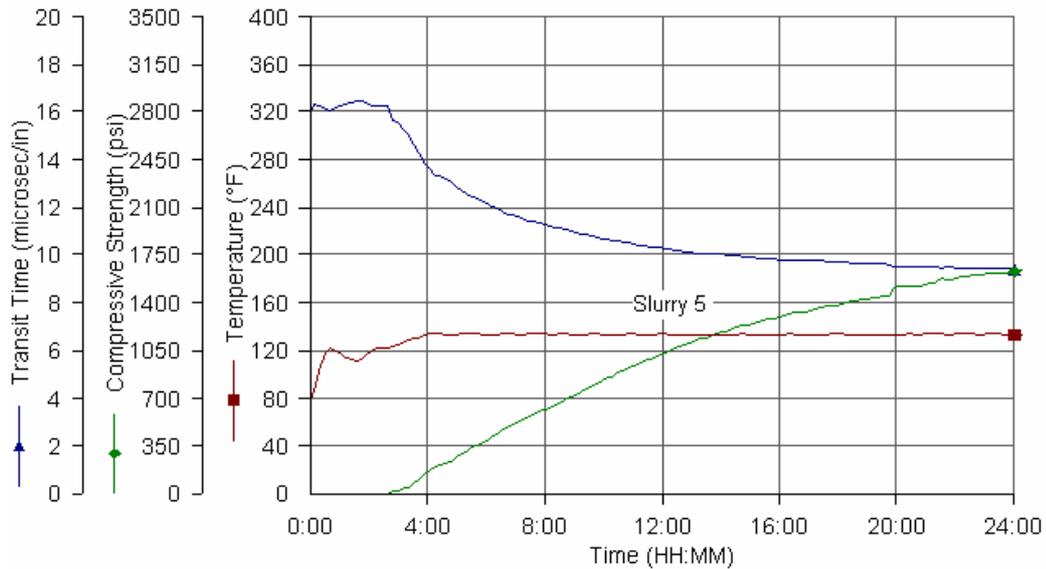
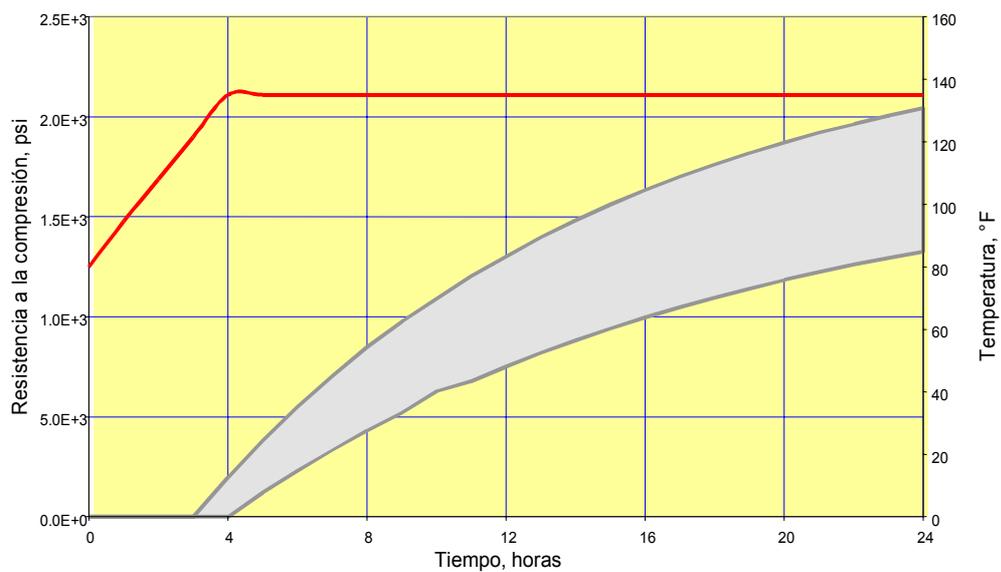


Figura 4-3: Predicción de RC para lechada nro. 5 (simulador)



BHST "F	160	OK	EAR	T-40L, gps, Gal	OK	Well - Hole Data	In	Results:
Cement 'G' - S.G.	3.14	OK		BJ-2001,gps,Gal	OK	Casing Int. Diameter	6.18	Slurry Yield cuft/sx
S.G. Mix Water	8.34	OK	Price	BA-10, %, Lbs	1.00	Casing O. Diameter	7.00	Slurry Cost \$/cuft
Density PPG	13.5	OK	per Unit	BA-58L,gps,Gal		Open Hole Diameter	9.00	
W-10, %, Lbs		OK		BA-86L, gps, Gal		Well - Data		Est. C..Strength 8 H, PSI
MPA-1, % Lbs		OK		FL-63, %, Lbs		Consolidated Sandstone		Est. C.Strength 12 H, PSI
BA-58, % Lbs		OK		FL-45 L,gps, Gal		Csg. Grade: C-95, N-80	29.00	Est. C.Strength 24 H, PSI
Kolite, % Lbs		OK		FL-63L, gps, Gal		Gas Gradient, psi/1000ft	0.50	Est. C.Strength 48 H, PSI
S-8, % Lbs		OK		FL-52, %, Lbs		Cem. Young's Mod., Mpsi		Cem. Young's Mod., Mpsi
MPA-3, % Lbs		OK		FL-54, %, Lbs		Cem. Poisson's Ratio		Cem. Poisson's Ratio
LW-6, % Lbs	5.0	OK		CD-33L, gps, Gal		Temp.Gradient, °F/100 ft	1.40	BHCT °F
LW-7-0.38, % lbs		OK		CD-32, %, Lbs		Well Test Data	PSI	Est. Flexural Strength, PSI
Diacel D, %,lbs		OK		CD-33, %, Lbs	0.20	Max. Wellbore delta Press.	2,950	Est.Tensile Strength, PSI
A-3L, gps, Gal		OK		R-3, %, Lbs		Max. Reservoir delta Press.		Est. Req. Tensile Str., PSI
A-2, %, Lbs		OK		R-15L, gps, Gal		Max. Wellbore delta Temp.°F	-50	Est. Req. Comp. Str., PSI
A-7 L, gps, Gal		OK		R-21L, gps, Gal		Calibration Test Data		Est. Isolation Height Req.,f
A-7, % bwoc, Lbs		OK		FP-6L, gps, Gal	0.020	Strength Calibration, psi, 24 H		Est. CBL Amplitude, mV
AEF-100L, gps, Ga		OK		Cement, Lbs/sack	94	API Thickening. Time, min		Est.Kick-Off Time, min
Slurry Mix as per API								
Free water higher than API								

Fig. 4-4 . Muestra la tabla de ingreso de valores y resultados calculados por el simulador CM VISION

Las resistencias a la flexión y a la tensión se calculan sobre la base del valor estimado para resistencia a la compresión a las 48 horas. Sin embargo, se incluyen varios términos en la ecuación polinomial que tienen en cuenta respuestas individuales y efectos sinérgicos para aditivos específicos.

$$RF, RT = RC_{48 \text{ horas}} \{ Q3 (ft \& t) 1 a N + S3 (ft \& t) 1 a N \}$$

La tabla 3-5 contiene la comparación entre los valores medidos y los valores predichos por el simulador para las cinco lechadas descritas en la tabla 3-4.

Las propiedades elásticas del cemento (módulo de Young y relación de Poisson) pueden ser ingresadas o también estimadas por el simulador. Ambas estimaciones se hacen con correlaciones empíricas: la relación de Poisson se correlaciona con la resistencia a la flexión y el módulo de Young se correlaciona con la resistencia a la compresión según una expresión como:

$$\text{Módulo de Young, } 10E6 \text{ psi} = 2.063E-04 RC + 2.18E-1$$

El simulador también calcula los cambios en las componentes radial y tangencial del esfuerzo sobre un anillo de cemento debidos a cambios en la presión y/o temperatura en el pozo, y de esfuerzos in-situ en la formación. Los esfuerzos inducidos se determinan resolviendo la ecuación diferencial que gobierna la componente radial del campo de desplazamiento de esfuerzos en cañería, cemento y formación. La solución del campo de desplazamiento tiene 6

constantes que se determina con 6 condiciones de contorno que imponen continuidad a la componente radial del esfuerzo y desplazamiento en la superficie interior del casing, los límites cañería-cemento, y cemento-formación, y el campo lejano. Como resultado, las 6 constantes son función de los diámetros interior y exterior de casing, diámetro del agujero del pozo y las constantes elásticas (módulo de Young y relación de Poisson) del casing, el cemento y la formación.

El cálculo sigue el procedimiento delineado por Thiercelin et al. Se realizaron las siguientes suposiciones para simplificar la solución:

- El casing, el cemento y la formación poseen propiedades elásticas, lineales e isotrópicas.
- Isotropía en los componentes horizontales del campo de esfuerzos lejano.
- Solución de deformación plana (es decir, no hay cambio en la altura de cemento)
- No hay θ -dependencia (en el sistema de coordenadas cilíndrico) de los esfuerzos o campos de desplazamiento.

Si bien los componentes radial y tangencial de esfuerzo se calculan tanto en el casing como en el cemento y la formación como función de la distancia del eje del pozo, solamente se emplean los valores máximos en las interfaces para determinar la falla del anillo de cemento.

El simulador considera cambios en los componentes de esfuerzos sobre el cemento debidos a cambios de temperatura en el pozo. Se realizaron suposiciones simplificadoras para permitir una solución cerrada del componente radial del campo de desplazamiento. Se supone que el casing se calienta

uniformemente y se expande sobre el cemento antes de que éste tenga tiempo de absorber calor (o cambio de temperatura). Así, se desprecian gradientes de temperatura y se emplea el cambio de temperatura para calcular los esfuerzos máximos; los resultados ofrecen una buena concordancia con soluciones numéricas más exactas. También se desprecia el límite cemento-formación (lo cual es equivalente a suponer que cemento y formación tienen constantes elásticas idénticas) puesto que los efectos térmicos son prácticamente instantáneos en la interfaces cañería-cemento antes que el calor alcance a disiparse en el anillo de cemento.

La solución del campo de desplazamiento en el casing y el cemento tiene cuatro constantes. Éstas se determinan a partir de cuatro condiciones de contorno que imponen continuidad a los componentes radiales de esfuerzos y desplazamiento en la superficie interior del casing, la interfaces cañería- cemento y el campo lejano. Para éste último se supone que el cambio en esfuerzo horizontal es nulo. Como resultado, las cuatro constantes (constantes elásticas para cañería y cemento, y coeficiente de expansión térmica del casing) son funciones de los diámetros interior y exterior del casing. Los componentes radial y tangencial del esfuerzo son determinados como función de la coordenada radial, sin embargo, sólo se usan los valores promedio en el cemento para calcular la falla del anillo. Este criterio parece suministrar un mejor acuerdo con los máximos esfuerzos inducidos que se derivan de soluciones numéricas más exactas del problema termo-elástico acoplado.

El simulador estima también tanto la adhesividad como la altura de aislación. La amplitud de un CBL se calcula para una herramienta de dos

receptores. La altura de aislación de zona requerida para una situación específica se calcula en base a la presión de gas y la capacidad de flujo de la formación, según un criterio similar a los descritos en referencias 5 y 6. Ambas estimaciones usan las resistencias a la flexión y a la tensión del cemento fraguado, en vez de emplear solamente la resistencia a la compresión.

Finalmente, el costo de las lechadas es incluido como parte de los resultados para facilitar la optimización de los diseños.

4.2 USO DEL SIMULADOR CM VISION

Para ilustrar el empleo del simulador, se ha seleccionado un pozo somero donde las dos últimas cañerías cementadas son una intermedia de 9 5/8" y un liner de 7", de acuerdo al diagrama en la figura 4-6. Todas las lechadas de la tabla 3-4 fueron consideradas sucesivamente como lechada única a utilizar en la cementación del liner, estimando el impacto de futuras operaciones en el pozo.

En lo referente al aislamiento, todas las lechadas pasan satisfactoriamente la prueba: la altura de aislación mínima que requiere cada una es menor que la distancia a las zonas permeables adyacentes o por encima de la zona de interés. El peor de los casos corresponde a la lechada extendida con bentonita que requiere 75 ft (23 m) según se muestra en la tabla 3. Este valor es tres veces más pequeño que el espesor de la lutita que actúa como barrera.

Luego de cementar el liner, normalmente se prueba admisión en el embudo (altura del colgador). La aplicación de presión a través del casing o de tubería sentada en la intermedia de 9 5/8" provocará la expansión del liner de 7". En este caso no hay cambio de temperatura. Los resultados del simulador se

muestran en la tabla 4-1. Se aprecia que todos los cementos considerados van a resultar dañados frente a la arenisca no consolidada. Sin embargo, como el anillo resiste enfrente de las barreras (con cualesquiera de los cementos probados) es factible probar el embudo con 2500 psi (17200 kPa) sin afectar los objetivos de la cementación.

La zona gasífera del pozo será estimulada con un fracturamiento ácido, de modo que durante el trabajo habrá aumento de presión y disminución de temperatura por efecto de enfriamiento (ver tabla 4-2). Si el trabajo se realiza a través de cañería o a través de tubería con empacador sentado en el tope del liner, las únicas lechadas que pueden usarse son las número 1 y 5. Se debe notar que la lechada nro.1 tiene una densidad de 13 lb/gal (1560 kg/m³), pero contiene microfibras que proporcionan las resistencias necesarias. La lechada “neta” (nro. 4, densidad normal) y la lechadas liviana convencional nro. 2 van a sufrir falla del anillo de cemento en la zona adyacente, destruyendo el aislamiento de zona. Se observa también que la lechada con bentonita es la única que falla por compresión.

Finalmente, el pozo comenzará a producir gas, creando una caída de presión dentro del casing y aumento de temperatura en las zonas superiores. En este escenario (ver tabla 4-3), sólo las lechadas de 15.6 lb/gal (1870 kg/m³) podrían ser empleadas, puesto que las lechadas extendidas fallan en las zonas adyacentes. Como alternativa económica efectiva, se verificó en el simulador el comportamiento de la lechada nro. 1, pero aumentando la densidad a 14.0 lb/gal (1680 kg/m³) y empleando un aditivo reductor de filtrado base PVA (poli-alcohol vinílico) en lugar del celulósico (CMHEC, carboximetil-hidroxietyl-

celulosa). Con esta modificación, la lechada pasó satisfactoriamente las tres simulaciones realizadas.

Se puede apreciar que el simulador no sólo está destinado al diseño preliminar, sino también es una herramienta para revisar aplicaciones, por ejemplo donde parecería que el cemento “desaparece por arte de magia” detrás del casing luego de un excelente trabajo sin problemas, o simplemente para optimizar las lechadas y reducir el costo de cementar o perforar un pozo.

TABLA 4-1: Prueba de presión en el colgador de liner							
Evaluación frente a formación	Delta de presión Psi	Delta de temperatura °F	Integridad del anillo de cemento				
			Lechada nro. 1	Nro. 2	nro. 3	nro. 4	Lechada nro. 5
Lutita superior	2500	0	OK	OK	OK	OK	OK
Arenisca no consolidada	2500	0	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión
Limolita	2500	0	OK	OK	OK	OK	OK
Arenisca	2500	0	OK	OK	OK	OK	OK
Lutita inferior	2500	0	OK	OK	OK	OK	OK
Caliza	2500	0	OK	OK	OK	OK	OK

TABLA 4-2: Fracturación ácida de la zona gasífera

Evaluación frente a formación	Delta de presión Psi	Delta de Temp. °F	Integridad del anillo de cemento				
			Lechada nro. 1	Lechada nro. 2	Lechada nro. 3	Lechada nro. 4	Lechada nro. 5
Lutita superior	2600	-35	OK	OK	OK	OK	OK
Arenisca no consolidada	2650	4-37	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión
Limonita	2725	-39	OK	Falla a la tensión	OK	Falla a la tensión	OK
Arenisca	2800	-42	OK	OK	OK	Falla a la tensión	OK
Lutita inferior	2900	-45	OK	Falla a la tensión	OK	Falla a la tensión	OK
Caliza	2950	-50	OK	OK	Falla a la compresión	OK	OK

TABLA 4-3: Pozo en producción de gas							
Evaluación frente a formación	Delta de presión psi	Delta de Temp. °F	Integridad del anillo de cemento				
			Lechada nro. 1	Nro. 2	Lechada nro. 3	Lechada nro. 4	Lechada nro. 5
Lutita superior	-550	15	Falla a la tensión	Falla a la tensión	OK	OK	OK
Arenisca no consolidada	-575	10	OK	OK	OK	OK	OK
Limolita	-600	7	OK	Falla a la tensión	Falla a la tensión	OK	OK
Arenisca	-625	5	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	OK	OK
Lutita inferior	-650	5	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	OK	OK
Caliza	-675	0	Falla a la tensión	Falla a la tensión	Falla a la tensión	OK	OK

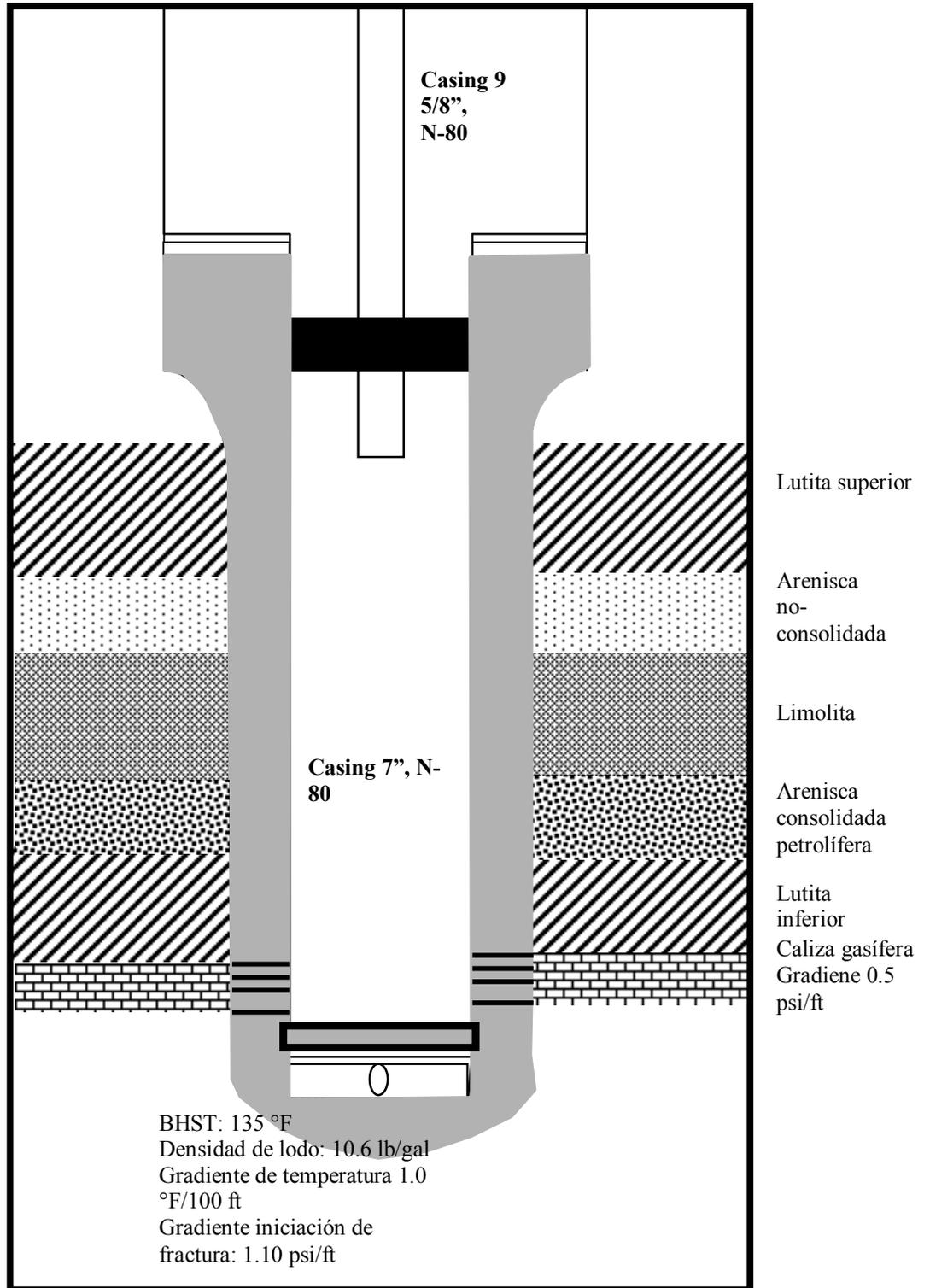


Figura 4-6 : Diagrama de pozo para ejemplo de uso del simulador

5 APLICACIONES RECIENTES EN CAMPO

5.1 YACIMIENTOS DE GAS

La cementación del casing guía de pozos dirigidos en el sudeste de la cuenca Malaya, en aguas de la península de Malasia, ha presentado serias dificultades por la combinación de dos factores: la presencia de gas en areniscas poco profundas (600-700 m TVD) y de areniscas cercanas débiles con frecuentes pérdidas de circulación con bajas densidades equivalentes, lo que impide el empleo de lechadas de alta densidad con control de gas. Existe el antecedente histórico de blowout en el yacimiento.

La solución convencional de utilizar una lechada de cola de alta densidad (15.8 lb/gal – 1890 kg/m³) precedida por una lechada de cabeza liviana (12.6 lb/gal – 1510 kg/m³) demanda para este caso el empleo de muy grandes concentraciones de aditivos en la lechada liviana para que controle la migración de gas. Esto se traduce en un costo tan alto que puede ser prohibitivo. Además, es usual que se resienta la calidad de cementación lograda en la transición entre las dos lechadas, lo que puede ser un eslabón débil por las inevitables limitaciones operativas asociadas al cambio de lechadas y salto de densidad.

El abandono del paradigma de la necesidad de tener una elevada resistencia a la compresión en el zapato (o sea el paradigma de emplear una lechada de cola de densidad “normal”), permitió enfocar el diseño al desarrollo de una lechada única de densidad reducida (14.0 lb/gal – 1670 kg/m³) con propiedades de control de gas obtenidas con dos aditivos: un alivianador multifuncional con control de filtrado y un relleno liviano con propiedades de

adsorción de gas a base de micro-plaquetas minerales. La densidad es lo suficientemente baja para prevenir pérdidas de circulación.

El estudio preliminar, con el simulador de resistencia a la compresión del cemento, permitió verificar que la lechada única de densidad intermedia ofrecería propiedades satisfactorias para soporte y anclaje del casing (resistencia a la tensión), amén de buena resistencia a la flexión, propiedad de particular importancia en la curva del pozo desviado para que resista los posteriores esfuerzos sobre el anillo de cemento ocasionados.

El nuevo diseño obtenido ofrece otras ventajas significativas, cual es el caso de permeabilidad (0.05 md a 0.09 md) un orden de magnitud inferior que las lechadas livianas convencionales (0.5 md a 0.9 md), lo que resulta de especial importancia para prevenir la migración de gas a largo plazo, por ejemplo acumulación de presión en el anular). Finalmente, pero no lo menos importante, la nueva alternativa es de costo sensiblemente inferior además requerir una ejecución más sencilla (y por tanto más confiable) del trabajo.

Se han realizado decenas de trabajos exitosos a la fecha, continuando la perforación entre 16 y 24 horas después de finalizado el desplazamiento, encontrando cemento competente en todos los casos y reduciendo el tiempo de espera de fragüe en la mayoría de ellos. Esto era esperado tanto por los resultados del simulador como por las verificaciones en laboratorio de desarrollo temprano de resistencia.

5.2 YACIMIENTOS DE BAJA PRESION DE FORMACION

Un yacimiento somero (aproximadamente 770 m TVD) tiene baja presión y las pérdidas de circulación son un problema potencial. Para la cementación del casing de producción de 5 ½” se consideró la aplicación de una lechada de densidad reducida (14.5 lb/gal – 1740 kg/m³) con propiedades mecánicas similares a la de uno convencional con cemento Clase G de 15.8 lb/gal (1890 kg/m³).

El simulador permitió estudiar el efecto en las propiedades mecánicas relevantes de una novedosa combinación de cemento clase A y un aditivo multipropósito (micro-fibras minerales) con efecto tanto en la mejora de resistencia a la tensión como en la aceleración de su desarrollo temprano. De este modo, se obtuvo el punto de partida para un diseño de menor densidad y otras propiedades satisfactorias (filtrado, tiempo de espesamiento, agua libre, etc. amén de las mecánicas), comparables a las de una formulación convencional con cemento clase G. El nuevo enfoque de diseño no sólo ofrece una importante reducción del potencial de pérdidas de circulación sino que representa una disminución del 22 % en el costo de la lechada.

Las primeras aplicaciones han resultado 100 % exitosas, con buen registro CBL y a menor costo.

5.3 YACIMIENTOS DE ALTA PRESION

En el área Norte de Monagas en Venezuela, la lechada tradicionalmente empleada para cementar el liner de 7” era de 15.6 lb/gal (1870 kg/m³), a base de cemento clase H, 35 % de sílice y 8 % de micro-sílice, esta última para

controlar la migración de gas ya que los pozos producen crudos volátiles. La composición incluía también controlador de filtrado, dispersante y retardador. Desde el punto de vista convencional, la lechada poseía excelentes propiedades, por ejemplo filtrado inferior a 40 cm³/30 min, agua libre 0 % y resistencia a la compresión superior a 3400 psi (23400 kPa) en 48 horas. Aún así, la amplitud del CBL era siempre entre 8 y 20 mV frente a las arenas productoras, lo cual dejaba dudas sobre la efectividad de la aislación, si bien las cementaciones forzadas raramente admitían fluido.

Analizando el problema con el simulador se llegó a la conclusión de que lo observado se debía principalmente a la falla de adherencia entre cemento y casing, además del posible agrietamiento del anillo de cemento, causados por esfuerzos tangenciales derivados de disminución de temperatura (-55 °F [-31 °C]) y de presión (-600 psi [-4100 kPa]) cuando se cambiaba el lodo por un fluido de terminación.

Como alternativa se diseñó una nueva lechada con el objetivo de producir un cemento más dúctil, substituyendo la micro-sílice (que induce rigidez en el cemento) por fibras minerales de la misma granulometría. La densidad de la nueva lechada es de 15.2 lb/gal (1820 kg/m³) lo que significa 0.7 lb/gal (80 kg/m³) más pesada que el lodo. La resistencia a la compresión del nuevo cemento, 2900 psi (20000 kPa) en 48 hs. es inferior, pero la resistencia a la flexión es de 880 psi (6100 kPa) en 48 hs. lo que representa un valor 15 % superior al de la lechada original con micro-sílice. El resto de los aditivos fueron ajustados para obtener otras propiedades de lechada similares a la original. El estudio incluyó también simulaciones de cementación forzada, estimulación

ácida y fracturamiento hidráulica, y producción de pozo a presión de reservorio original y tras una depletación del 50 %, verificando la integridad del cemento durante la vida útil del pozo según el programa de terminación y experiencia de campo.

Desde la introducción de la nueva lechada, los 9 pozos cementados mostraron una amplitud de CBL inferior a 8 mV, valor consistente con la previsión de 6 mV realizada en el simulador. Es especialmente importante destacar que el operador se benefició con una reducción de costo superior al 22 % asociada al mayor rendimiento de la lechada.

5.4 INTRODUCCION DE MEZCLAS LIVIANAS EN SELVA NORTE - PERU

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El campo Carmen Este del yacimiento lote 1AB probablemente tiene presiones de formación normal. Sin embargo algunos pozos del yacimiento han mostrado que la formación Vivian tiene presión de formación menor a la presión normal. Respecto a la presión de fractura es de conocimiento general que “el perfil de la presión de formación es similar al perfil de la presión de fractura”.

Durante la perforación del pozo CA 1504D (uno de los primeros pozos perforados en el yacimiento), se observó pérdida total de circulación frente a la formación Vivian cuando se realizaba un viaje de acondicionamiento. Con peso de lodo 10.6 lb/gal y variando el caudal de circulación se pudo estimar la densidad equivalente de reapertura de fractura en nuestro caso es de 11,2 lb/gal para la formación Vivian, lo cual concuerda con lo esperado. (la presión de

fractura de una formación es siempre mayor o igual que la presión necesaria para reabrir la misma, por tanto es de esperar que la densidad equivalente de fractura de Vivian sea mayor a 11.2 lb/gal)

De otro lado la densidad equivalente de circulación (DEC) es de 11 lb/gal aproximadamente. Esto deja un margen muy pequeño de trabajo durante la perforación, asimismo la cementación de los pozos de la zona que se han venido haciendo tradicionalmente con mezclas convencionales (densidades 13.6 lb/gal extendida con Bentonita y 15.6 lb/gal cemento neto) conllevan a una densidad equivalente de circulación final es de 12.5, que es mucho mayor a la densidad estimada de reapertura de fractura 11.2 lb/gal. Por tanto fue necesario replantear el diseño de cementación para lograr un DEC que minimice el riesgo de pérdida de circulación durante el trabajo. Asimismo debido a que Vivian (yacimiento de empuje por agua) es la formación objetivo, se debe de asegurar un buen aislamiento que garantice el sello a las zonas de agua.

En resumen, la pérdida de circulación durante la cementación del yacimiento Carmen Este tiene un grado de sensibilidad mayor convirtiéndose en un problema potencial especialmente para la zona productiva Vivian objetivo del proyecto. La figura 5-1 muestra las presiones en mención.

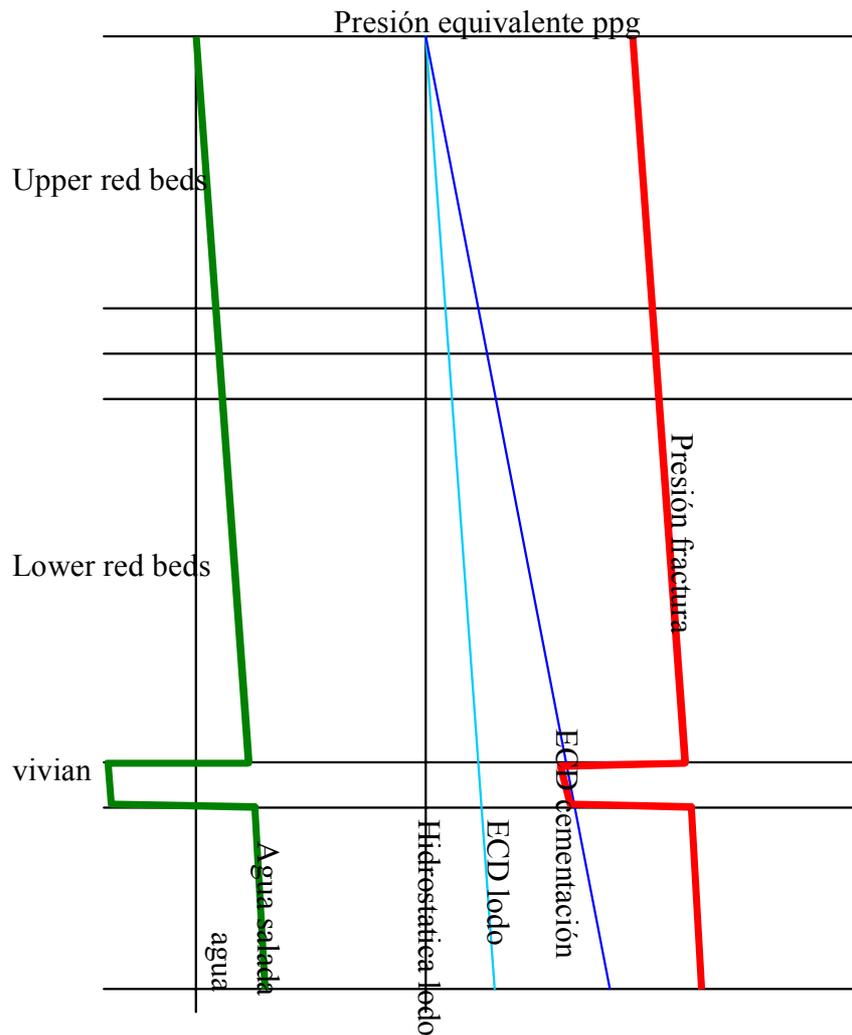


Fig. 5-1

ALTERNATIVAS DE SOLUCION

Existen varias soluciones para disminuir el problema potencial de fracturamiento con diferentes enfoques. El presente enfoque corresponde a la cementación con mezclas livianas y flexibles; lo cual permitirá cementar el pozo en una etapa única con densidad equivalente de circulación final menor a la de fractura.

El objetivo es tener densidades de circulación que se encuentren en zona de menor riesgo (figura 5-2: área punteada).

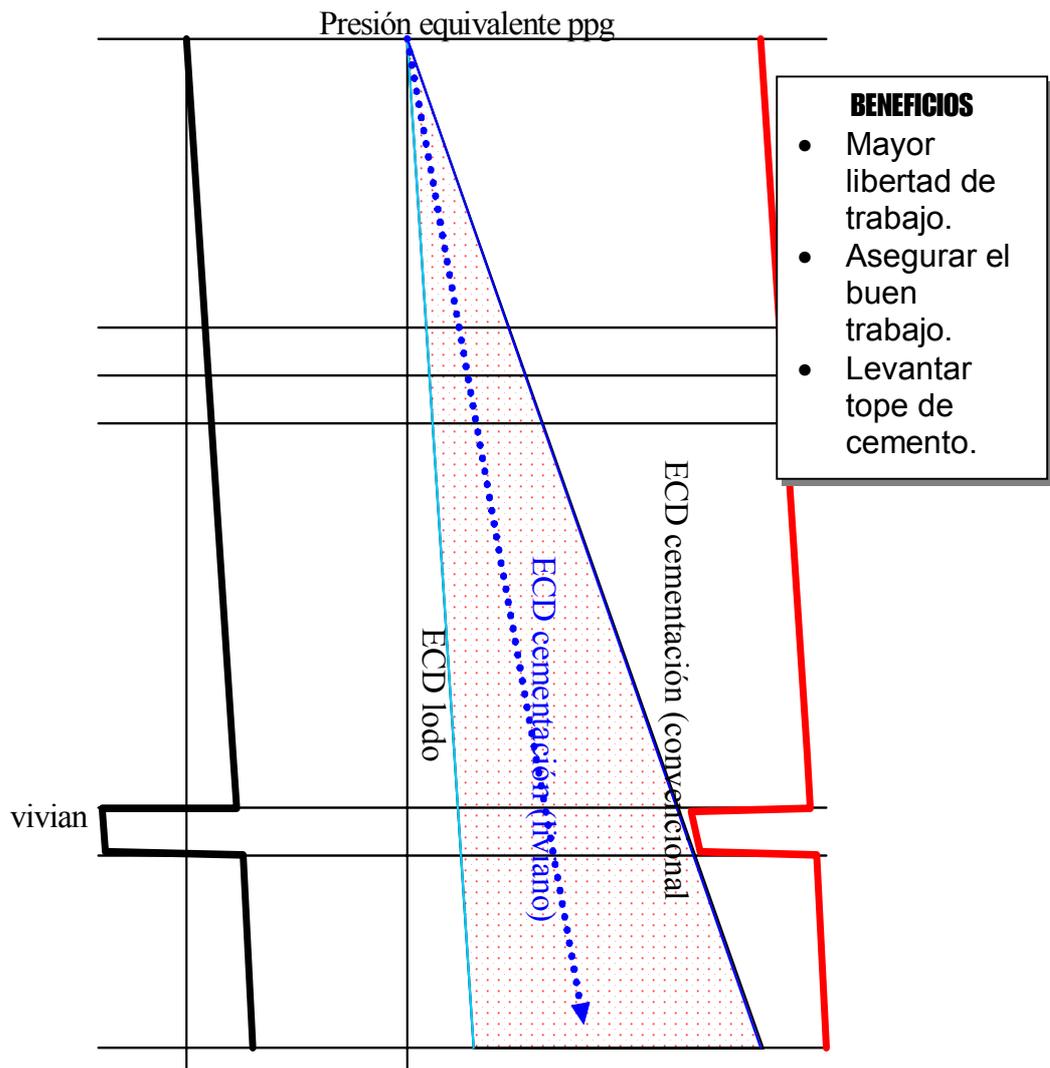


Fig. 5-2

SOLUCION

Debido a la limitante de presiones hidrostáticas, se decidió trabajar con mezclas livianas basadas en micro-esferas de cerámica.

Datos de trabajo:

Liner: 7", 2600ft - 3200'ft, BHST: 260°F

Espaciadores: 150 bbls lodo disperso, 50 bbls espaciador, 50 bbls lavador.

Mezcla de relleno (Lead Slurry): Micro-esferas de cerámica 35% (BOWC), Reductor de filtrado: 0.32 gps, Silica Fluor: 35%(BOWC), Retardador: 0.08 gps
Densidad. 11 lb/gal a condiciones atmosféricas, (11.5 lb/gal @ 5000 psi)

Mezcla principal (Tail Slurry): Silica Fluor 35%, Reductor de filtrado: 0.32 gps, Retardador: 0.08 gps, reductor agua libre: 0.35%.

Densidad: 15.2 lb/gal

Las mezclas fueron determinadas en laboratorio, buscándose las características necesarias tales como filtrado, agua libre, tiempo de bombeabilidad y Resistencia a la compresión; que asegurasen un aislamiento confiable a través de la vida productiva del pozo.

En ambas mezclas se utilizó Silica fluor al 35% para evitar el fenómeno de retrogresión del cemento, lo cual se da temperaturas mayores a 230 °F, temperatura de fondo de pozo (260 °F).

RESULTADOS

El uso de mezclas livianas permitió terminar la cementación con una Densidad Equivalente de Circulación (DEC) de 11.2 lb/gal sin problema alguno de perdida de circulación. Se encontró cemento por encima del tope del liner, lo cual indica presencia de cemento en todo el anular. El registro CBL – VDL corrido a las 72 horas demostró buen aislamiento de las zonas de interés. A la fecha se han completado 4 pozos mas en el yacimiento con mezclas livianas y flexibles obteniéndose resultados alentadores, asimismo se esta estudiando la posibilidad de utilizar las micro-esferas de cerámica en la mezcla principal para reducir su densidad hasta 14 lb/gal.

6 CONCLUSIONES

- Durante largo tiempo se ha enfatizado de sobremanera la importancia de la resistencia a la compresión del cemento en los buenos resultados de un trabajo de cementación, sea para obtener un buen anclaje y soporte del casing o bien para obtener un apropiado aislamiento de zonas productoras. De hecho, se han generalizado prácticas y conceptos, caracterizables como el “paradigma de la alta resistencia a la compresión”, que han oscurecido los factores de efectiva relevancia en los resultados.
- En cambio, propiedades como la resistencia a la tensión, la resistencia a la flexión y las propiedades elásticas del cemento (módulo de Young y relación de Poisson) del cemento tienen directa incidencia en que una cementación cumpla satisfactoriamente sus objetivos, tanto inicialmente como durante toda la vida productiva del pozo. El concepto de cemento flexible es el que debe primar al considerar propiedades mecánicas en el diseño de lechadas.
- El uso de mezclas flexibles y dúctiles mejoran el comportamiento del cemento durante la vida productiva del pozo. Es decir presenta mejor respuesta frente a diversos efectos que ocurren durante la vida productiva del pozo.
- Mezclas de baja densidad minimiza el daño a la formación inducido por la diferencia de presiones entre la columna hidrostática y la presión de reservorio. Esto es mucho más importante en formaciones de baja permeabilidad donde el daño producido durante la perforación y completación del pozo influye considerablemente en la producción final del pozo.
- Mezclas de baja densidad implican un mayor rendimiento del cemento, por tanto en la mayoría de casos se observa una reducción en los costos de

materiales. Sin embargo hay que tener en cuenta que el uso de mezclas livianas y flexibles proveen incluso un cemento de mejor calidad; por lo que si el costo de estas mezclas fuese mayor este no debe ser impedimento para su uso.

- Se ha desarrollado un simulador para la predicción de las propiedades mecánicas del cemento (resistencias a la compresión, tensión y flexión, incluyendo las propiedades elásticas). El simulador tiene en cuenta las condiciones de fragüe (temperatura), las propiedades físicas y el comportamiento químico de cada uno de los componentes de la lechada y también efectos sinérgicos entre éstos.
- El empleo del simulador debe ser tomado como una herramienta de ayuda en el diseño preliminar de la mezcla de cemento, el cual debe ser siempre corroborado en laboratorio y así ajustar las características de la mezcla de cemento requerida.

7 BIBLIOGRAFIA

Referencias

1. George O. Suman, JR. and Richard C. Ellis: "World Oil Cementing Hand Book", 1977
2. J.J. Jutten, P.A. Parcevaux and D.D. Guillot, Schlumberger: "Relationship between Cement Composition, Mechanical Properties and Cement Bond Log Output". SPE 16652, Dallas, TX, September 27, 1987.
3. P.A Parcevaux and P.H. Sault, Schlumberger: "Cement Shrinkage and Elasticity: Anew Approach for a good Zonal Isolation". SPE 13176, Dallas, TX, 1984
4. Dan Mueller, BJ Services: "An Evaluation of well cements for use in High Stress Environments". JPT , 1999
5. K.J. Goodwin, Mobil E&P Services Inc. and R.J. Crook, Halliburton Services: " Cement Sheath Stress Failure" SPE 20453, Diciembre 1992
6. R. Abdul Rahman, Phil Rae, BJ Services: "A Simpler, More Effective Method for Cementing Surface Casings in Shallow Gas Zones: A Case History" SPE 54286, Jakarta, Indonesia, Abril 1999.
7. Erik B. Nelson, David R. Bell, Schlumberger : Well cementing. San Etienne, France.
8. Gino Di Lulo, Phil Rae, BJ Services Company, SPE 62745: "Cements for Long-Term - Design Optimization by Computer Modelling and Prediction", Sept 2000.

Nomenclatura

BHCT	=	temperatura de circulación en fondo de pozo
BHST	=	temperatura estática en fondo de pozo
CMHEC	=	carboximetil-hidroxietyl-celulosa
D	=	diámetro exterior de cañería, psi
DMA	=	“Dynamic Modulus Analyser”, equipo para ensayo no destructivo (sónico) de resistencia del cemento.
F	=	carga para destruir la adhesión del cemento, lb
F, F ₁ , F ₂ (ft & t)	=	términos que describen la influencia de propiedades físicas de los materiales empleados, como función de tiempo y temperatura
H	=	altura de columna de cemento, ft
KOT	=	“Kick-Off Time”, tiempo de comienzo de desarrollo de resistencia de la lechada.
NSSC	=	naftalén-sulfonato de sodio condensado
PVA	=	poli-alcohol vinílico
Q, Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ (ft & t) _{1 a N}	=	términos que representan el comportamiento químico de todos y cada uno de los componentes, función de tiempo y temperatura.
RC	=	Resistencia a la compresión, psi
RF	=	Resistencia a la flexión, psi
RT	=	Resistencia a la tensión, psi
S, S ₁ , S ₂ , S ₃ (ft & t) _{1 a N}	=	términos que dan cuenta de la eventual existencia de sinergia entre componentes, función de tiempo y temperatura
TE	=	tiempo de espesamiento de la lechada de cemento
TVD	=	profundidad vertical

Factores de conversión SI (International System of Units)

ft	x	3.048	E-01	=	m
gps	x	8.878	E+00	=	L/100 kg cemento
in	x	2.54	E+00	=	cm
lb	x	4.536	E-01	=	kg
lbf/ft	x	1.458	E+01	=	N/m
md	x	9.869	E-04	=	μm^2
lb/gal	x	1.198	E+02	=	kg/m^3
psi	x	6.895	E+00	=	kPa