

Simulador de resistencia del cemento, incluyendo propiedades mecánicas en el diseño para reducir costo de perforación

Gino Di Lullo y Norberto Briggiler
BJ Services Company

Abstract

Para obtener resultados satisfactorios con una cementación primaria (tanto el anclaje y soporte de cañería como la apropiada aislación de zonas) es necesario que el cemento desarrolle adecuadas propiedades mecánicas. A este 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 tracción y flexión y las propiedades elásticas tienen mayor relevancia en la competencia del anillo de cemento (concepto de cemento “flexible”).

Se presenta un simulador de propiedades mecánicas del cemento que tiene en cuenta las propiedades físicas y el comportamiento químico de cada uno de los componentes de la lechada, y también efectos sinérgicos entre éstos. El simulador permite estudiar el efecto sobre la integridad del anillo de cemento de las operaciones de terminación, reparación, estimulación y la propia producción.

El principal objetivo del simulador es optimizar el diseño de lechadas con la correcta selección de cemento, aditivos y densidad de acuerdo a las condiciones de pozo de modo satisfacer adecuadamente los requerimientos, y al mismo tiempo reducir los costos de cementación y de perforación. El simulador también es una herramienta útil para interpretar resultados o problemas observados identificando sus causas reales.

Introducción.

El objetivo más importante de todo trabajo de cementación primaria es proporcionar una buena aislación entre las zonas productivas y hasta la superficie, y esto debe ser logrado para toda la vida del pozo. En ninguna circunstancia debe ser posible movimiento alguno de fluido, sea gas o líquido, a través del espacio anular cementado. En este espacio anular hay dos posibles vías para movimiento de fluido: las interfaces (cemento/roca y cemento/cañería) y la matriz del cemento.

Normalmente se identifica a la remoción pobre del lodo como la principal causa de problemas de comunicación, si bien puede ocurrir que exista pobre adhesión en las interfaces aunque 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 el problema.

La adhesión del cemento también puede ser afectada por propiedades de la lechada tales como filtrado y agua libre. Pero la adherencia del cemento a la formación y a la cañería está afectada principalmente por la contracción del cemento y cambios en los esfuerzos inducidos por variaciones de presión y temperatura en el pozo, especialmente dentro de la cañería pero también en la formación.

En términos generales, dos tipos de lechadas se usan actualmente para cementar pozos, a menos que haya otros requerimientos por la hidrostática. El primer tipo es una lechada “neta” o “de cola” con densidades desde 15.5 ppg (1860 kg/m³) hasta 16.5 ppg (1980 kg/m³), dependiendo del tipo de cemento y de la BHST (temperatura estática de fondo de pozo), que se usa para anclar la cañería y continuar rápidamente la perforación. Se emplean aditivos según los requerimientos, para mejorar la reología y otras propiedades que mejoran la aislación de las zonas.

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 la cañería. Ambas lechadas, tanto la de anclaje como la de relleno, se emplean para reducir el costo total de un pozo. Varias reglas de dedo se han creado en las últimas décadas y se usan actualmente para simplificar el diseño de lechadas; desafortunadamente algunas

de esas reglas están basadas en tecnología vieja y consideraciones de costo del pasado, las que hoy no tienen vigencia.

Un buen ejemplo es la resistencia a la compresión (RC), su relación con la densidad de la lechada y con otras propiedades mecánicas del cemento fraguado. No está claro por qué se continúa sobre-presionando la formación, induciendo daño o arriesgando con lechadas que son de 2 a 8 ppg más pesadas que el lodo empleado para perforar el pozo sin mayor problema.

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 fuere 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. También hay otros factores tales como el acoplamiento efectivo, y canales de gas, agua o lodo que afectan la velocidad de onda compresional y su atenuación. 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 1); a título informativo notar que el módulo de Young confinado y no-confinado no varía en más de 50% para el mismo cemento. La correlación entre atenuación y resistencia a la compresión es muy pobre y, por el contrario, existe una correlación mucho más apropiada entre atenuación de onda compresional e impedancia acústica pero no es usada debido a la falta de sensibilidad de valores disponibles por los usuarios.

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 md – 1E-6μm²). Sin embargo, el acoplamiento acústico y el sello hidráulico en la formación y la cañería 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 tracción (RT), pero el agregado de otros materiales (aditivos) a la lechada puede afectar sustancialmente los resultados.

Anclaje y soporte de la cañería

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 la cañería 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 caño y ciclos de presión y temperatura.

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

$$F = 0.969 \text{ RT} \cdot D \cdot H,$$

donde:

- F : fuerza o carga para destruir la adhesión del cemento, lb
- RT : resistencia a la tracción, psi
- D : diámetro exterior de la cañería, in
- H : altura de la columna de cemento, ft

En la peor situación, la fuerza o carga para romper el cemento es el peso de la cañería más el peso de la sarta de perforación completa cuando se asienta o rota el zapato. La tabla 1 muestra que sólo se necesitan 15 psi (100 kPa) de resistencia a la tracción para continuar la perforación empleando la citada fórmula. En la evaluación se usó la cañería 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.

Para lechadas de cemento “netas”, la resistencia a la tracción 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 tracción:compresión y, dependiendo de la composición de la lechada, esa razón puede llegar a ser tan alta como 1:2. 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 2 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 ppg – 1590 kg/m³) en idénticas condiciones de fondo de pozo. Las composiciones de las lechadas se muestran en la tabla 2. 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 la cañería 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 ppg (1500 kg/m³) o, dependiendo de la presión hidrostática requerida para control, será suficiente que sea 0.5 a 1 ppg (60 a 120 kg/m³) más pesada que el lodo de perforación. La tabla 3 contiene las lechadas y sus propiedades de resistencia para fines de comparación.

Aislación de zonas en las interfaces

La aislación de zonas 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 contracción 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 contracción del cemento: contracción global o exterior y contracción química o interior.

La contracción 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 contracción global. En realidad, estas sales pueden incluso inducir la expansión del cemento en condiciones de no-confinamiento pero se debe ser cuidadoso puesto que su empleo puede aumentar el costo final de la lechada.

Bajo confinamiento, el cemento llega a ser dúctil y se deforma fácilmente bajo presión. Cada vez que hay una contracción de la cañería 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 resistencias a la flexión (RF) y a la tracción, 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 y 10). 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.

Aislación de zonas en la matriz del cemento.

Hay dos posibilidades de flujo a través de la matriz del cemento: (1) alta permeabilidad del cemento que puede relacionarse a una contracción 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 (referencias 8 y 10).

La contracción 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 contracción 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 sínicas (CBL) y, posiblemente, afectar la aislación 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 (referencia 5 y 6). 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 la cañería o bien formaciones plásticas (domos salinos, referencia 11). Pero también se pueden producir debido a fuerzas compresionales en casos extremos tales como la entrecolumna cementada entre una cañería blanda y una dura, o bien el anular entre cañería blanda y formación dura. 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 la aislación 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 tracción y a la flexión, referencia 9) 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 tracción (referencia 8). Además, cuando se requieran propiedades de control de filtrado en la lechada, se deberían utilizar aditivos vinílicos o látex en lugar de HEC o derivados poliamínicos.

Simulador matemático

Si bien las resistencias a la flexión y a la tracción 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 destruir 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** 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 2 y 4). La primer 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:

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

donde:

- $F(ft \& t)$: término que describe propiedades físicas de los materiales empleados, como función de tiempo y temperatura
- $Q(ft \& t)_{1a N}$: término que representa el comportamiento químico de todos y cada uno de los componentes, también función de tiempo y temperatura.
- $S(ft \& t)_{1a N}$: 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 aislación de zonas.

$$RC = \{F_1(ft \& t) + Q_1(ft \& t)_{1a N} + S_1(ft \& t)_{1a N}\} e^{\{F_2(ft \& t) + Q_2(ft \& t)_{1a N} + S_2(ft \& t)_{1a N}\}}$$

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. La figura 3 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 muestra carta obtenida en la DMA para la lechada nro.5 (indicada en la tabla 3) mientras que la figura 5 reproduce la simulación realizada para la misma.

Las resistencias a la flexión y a la tracción 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.

$$RF, RT = RC_{48 \text{ horas}} \{ Q_3 (ft \& t)_{1 \text{ a } N} + S_3 (ft \& t)_{1 \text{ a } N} \}$$

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

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) de la cañería, el cemento y la formación.

El cálculo sigue el procedimiento delineado por Thiercelin et al. (referencia 11). Se realizaron las siguientes suposiciones para simplificar la solución:

1. La cañería, el cemento y la formación poseen propiedades elásticas, lineales e isotrópicas.
2. Isotropía en los componentes horizontales del campo de esfuerzos lejano.
3. Solución de deformación plana (es decir, no hay cambio en la altura de cemento)
4. 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 la cañería 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 la cañería 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 la cañería 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 de la cañería, 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 de la cañería) son funciones de los diámetros interior y

exterior de la cañería. 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 12 y 13. Ambas estimaciones usan las resistencias a la flexión y a la tracción 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.

Empleo del simulador

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 6. Todas las lechadas de la tabla 2 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 a aislación de zonas, 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 de la cañería 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. 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 una fracturación ácida, de modo que durante el trabajo habrá aumento de presión y disminución de temperatura por efecto de enfriamiento (ver tabla 5). 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 ppg (1560 kg/m³), pero contiene micro-fibras 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 la aislación 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 6), sólo las lechadas de 15.6 ppg (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 ppg (1680 kg/m³) y empleando un aditivo reductor de filtrado base PVA (poli-alcohol vinílico) en lugar del celulósico (CMHEC, carboximetil-hidroxiethyl-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 de la cañería luego de un excelente trabajo sin problemas, o simplemente para optimizar las lechadas y reducir el costo de cementar o perforar un pozo.

Historias de casos

Caso 1: Malasia. La cementación de la cañería 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 (referencia 9): 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 ppg – 1890 kg/m³) precedida por una lechada de cabeza liviana (12.6 ppg – 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 ppg – 1670 kg/m³) con propiedades de control de gas obtenidas con dos aditivos: un extendedor 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 de la cañería (resistencia a la tracción), amén de buena resistencia a la flexión, propiedad de particular importancia en la curva del pozo desviado para que resista los ulteriores 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.

Caso 2: Brasil. Un yacimiento somero (aproximadamente 770 m TVD) tiene baja presión y las pérdidas de circulación son un problema potencial. Para la cementación de la cañería de producción de 5 ½” se consideró la aplicación de una lechada de densidad reducida (14.5 ppg – 1740 kg/m³) con propiedades mecánicas similares a la de uno convencional con cemento Clase G de 15.8 ppg (1890 kg/m³).

El simulador permitió estudiar el efecto en la 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 tracción 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.

Caso 3: Tailandia. La lechada para cementar cañería guía tradicionalmente empleada en el golfo de Tailandia es de 15.9 ppg (1910 kg/m³). Una aplicación muy especial (cementación conjunta de dos casings concéntricos) requiere levantar cemento desde 320 mbmr (230 m bajo el lecho del mar) hasta 5 m por encima del nivel del mar. La BHST es de 110°F (43°C) y la BHCT es 95°F (35°C).

El empleo del simulador de resistencias mostró que era posible lograr una lechada alternativa de menor densidad para maximizar la posibilidad de lograr retorno de cemento hasta encima del nivel del mar, manteniendo valores más que suficientes para anclaje y soporte de las cañerías y la continuación de la perforación.

El nuevo diseño ajustado con pruebas de laboratorio es de 14.5 ppg (1740 kg/m³) y usa como base cemento clase G con 40 % de sílice en polvo, al igual que el diseño tradicional. Incluye un extendedor químico usual (silicato de sodio) y una sal de aluminio para acelerar el desarrollo de resistencia temprana de cemento. De esta manera se obtuvo una solución técnica superior: disminuir la posibilidad de perder retorno de cemento sobre el nivel del mar y desarrollo más rápido de resistencia temprana, al par de que el costo de lechada se redujo en un 6 %.

A la fecha se han cementado 15 pozos de estas características con todo éxito.

Caso 4: Venezuela. En el área Norte de Monagas en Venezuela, la lechada tradicionalmente empleada para cementar el liner de 7" era de 15.6 ppg (1870 kg/m³), a base de cemento clase H, 35 % de sílice y 8 % de micro-sílice, esta última para controlar 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 ppg (1820 kg/m³) lo que significa 0.7 ppg (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 fracturación 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.

Conclusiones

1. Durante largo tiempo se ha exagerado 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 de la cañería o bien para obtener una apropiada aislación de zonas. 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.

2. En cambio, propiedades como la resistencia a la tracción, 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.

3. Se ha desarrollado un simulador para la predicción de las propiedades mecánicas del cemento (resistencias a la compresión, tracción 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.

4. El simulador también permite estudiar el efecto sobre la integridad del anillo de cemento de los severos cambios de temperatura y/o presión a que se ve sometido el pozo durante su vida útil, como consecuencia de las operaciones de terminación, reparación y la propia producción. El análisis se completa con la estimación de la adhesividad (amplitud de curva de CBL), la altura de aislación efectiva que provee el cemento y los costos de la lechada.

5. El empleo del simulador permite un análisis previo a los ensayos de laboratorio que se traduce en formulaciones finales más apropiadas a los requerimientos reales del trabajo, aprovechando las características distintivas de los materiales empleados (especialmente aditivos) para optimizar el diseño con un significativo impacto directo en la reducción de costos de cementación e impacto indirecto en la disminución de costos de perforación (reduciendo el tiempo de espera de fragüe).

6. Con el uso del simulador y aditivos especiales se abren diversas posibilidades, como la eliminación de lechadas de cola y/o las cementaciones en 2 etapas, simplificando la operación y reduciendo el costo final.

7. Finalmente, el simulador es una herramienta útil para interpretar resultados o problemas observados identificando sus causas reales y cuantificando su importancia, como por ejemplo una supuesta “desaparición” del cemento, problemas de aislación con un CBL originalmente bueno o una amplia variedad de situaciones que deben ser evaluadas a la luz de los mecanismos que actúan efectivamente.

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 tracción, 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

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a la gerencia de BJ Services Company por el permiso de publicar este trabajo. El agradecimiento también se extiende a Phil Rae por su apoyo y a todas las personas que colaboraron en el laboratorio, la ingeniería y las aplicaciones de campo

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. Gino Di Lullo and James Tan, BJ Services: “An Evaluation of Gas Control Additives”. OSEA 92167, Singapore, Diciembre 1992
6. J.C. Hibbeler and Gino Di Lullo - BJ Services and Michael Tay – Shell-Malaysia: “Cost-effective Gas Control: A case Study of Surfactant Cement”. SPE 25323, Singapore, Diciembre 1993
7. K.R. Backe, O.B. Lile, S.K. Lyomov, Harald Elvebakk and Pal Skalle, Norwegian U. OF Science and Technology:” Characterizing Curing-Cement Slurries by Permeability, Tensile Strength and Shrinkage” SPE Drill & Completions 14, Septiembre 1999.
8. K.J. Goodwin, Mobil E&P Services Inc. and R.J. Crook, Halliburton Services: “ Cement Sheath Stress Failure” SPE 20453, Diciembre 1992

9. 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.
10. R.B Carpenter, J.L. Brady and G.G. Blount, Arco Oil & Gas Co.: " Effects of Temperature and Cement Admixes on Bond Strength" SPE 22063, Anchorage, Mayo 1991.
11. M.J. Thiercelin, J.F. Baret, Schlumberger and W.J. Rodrigues, Intevep S.A. "Cement Design Based on Cement Mechanical Response" SPE 38598, San Antonio, TX, Octubre 1997.
12. P. Rae, BJ Services and D. Wilkins, Marathon Oil Company and D. Free Dowell Schlumberger: " A new Approach to the Prediction of Gas Flow After Cementing" SPE 18622, New Orleans, Louisiana, Marzo 1989.
13. Michael J. Economides, Dowell Schlumberger: "Implications of Cementing on Well Performance", Well Cementing Book, Chapter 1, 1987

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
ppg	x	1.198	E+02	=	kg/m^3
psi	x	6.895	E+00	=	kPa

TABLA 1: Propiedades mecánicas necesarias para continuar la perforación

Diámetro de cañería (in)	Longitud de cañería (ft)	Peso de casing (lf/ft)	Altura cemento de cola (ft)	Peso de la cañería (lb)	Peso de la sarta de perforac. (lb)	Peso total (casing y sondeo) (lb)	Resist. a la tracción para soporte casing (psi)	Resist. a la tracción 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 2: Descripción de lechadas de cemento

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

TABLA 4: 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	Lechada nro. 2	Lechada nro. 3	Lechada nro. 4	Lechada nro. 5
Lutita superior	2500	0	OK	OK	OK	OK	OK
Arenisca no consolidada	2500	0	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción
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 5: Fracturación ácida de la zona gasífera							
Evaluación frente a formación	Delta de presión psi	Delta de temperatura °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	-37	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción
Limolita	2725	-39	OK	Falla a la tracción	OK	Falla a la tracción	OK
Arenisca	2800	-42	OK	OK	OK	Falla a la tracción	OK
Lutita inferior	2900	-45	OK	Falla a la tracción	OK	Falla a la tracción	OK
Caliza	2950	-50	OK	OK	Falla a la compresión	OK	OK

TABLA 6: Pozo en producción de gas							
Evaluación frente a formación	Delta de presión psi	Delta de temperatura °F	Integridad del anillo de cemento				
			Lechada nro. 1	Lechada nro. 2	Lechada nro. 3	Lechada nro. 4	Lechada nro. 5
Lutita superior	-550	15	Falla a la tracción	Falla a la tracción	OK	OK	OK
Arenisca no consolidada	-575	10	OK	OK	OK	OK	OK
Limolita	-600	7	OK	Falla a la tracción	Falla a la tracción	OK	OK
Arenisca	-625	5	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	OK	OK
Lutita inferior	-650	5	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	OK	OK
Caliza	-675	0	Falla a la tracción	Falla a la tracción	Falla a la tracción	OK	OK

Figura 1

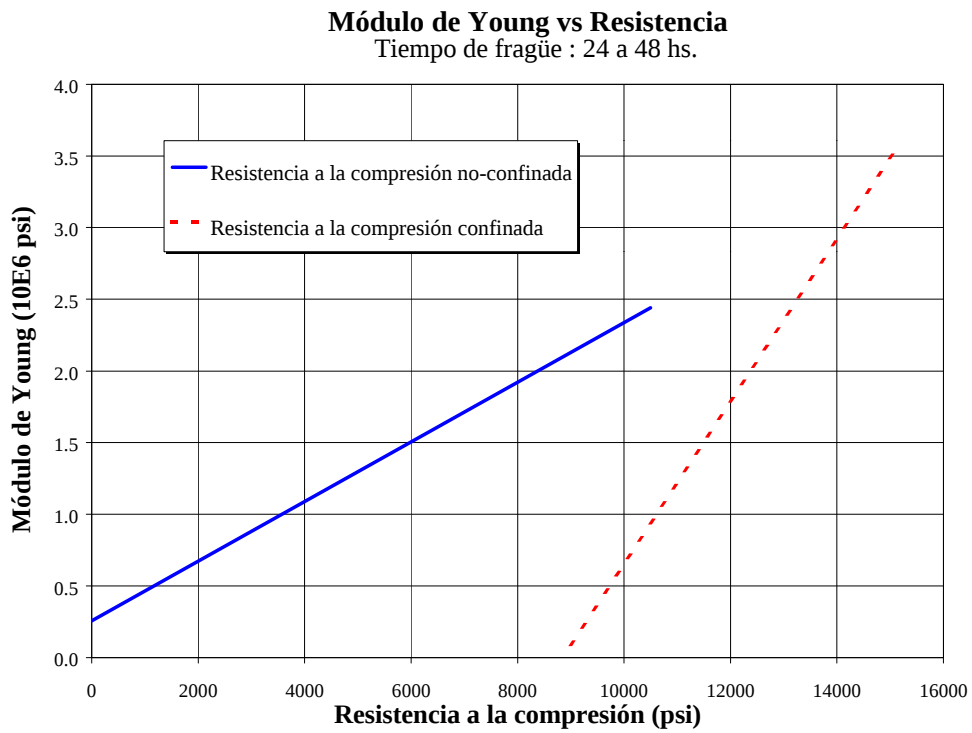


Figura 2: Desarrollo de resistencia de tres lechadas livianas

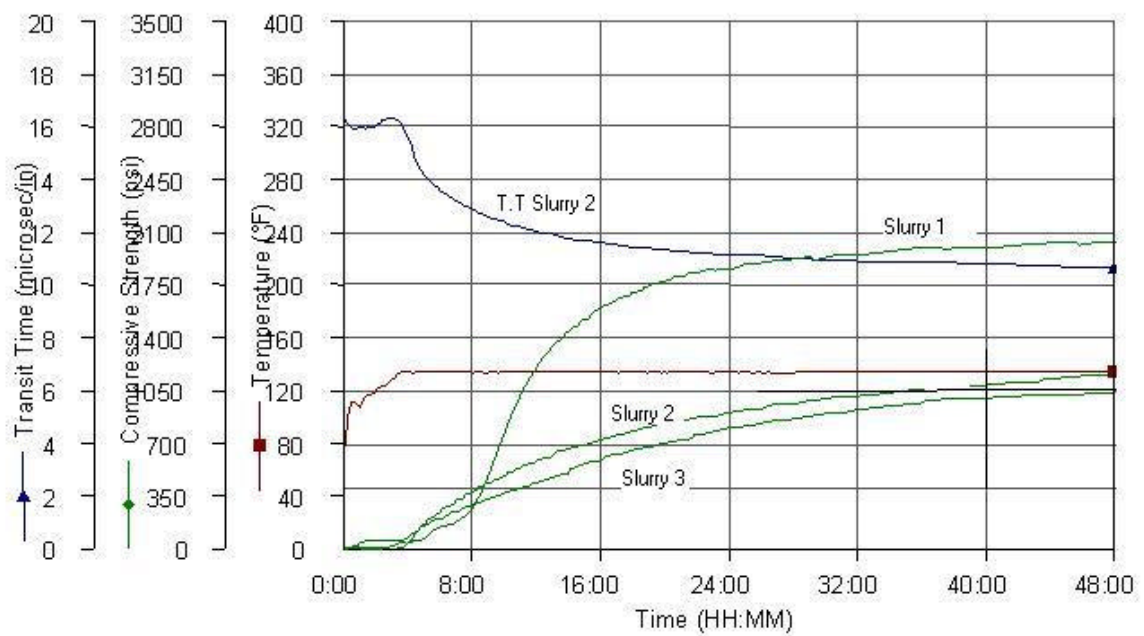


Figura 3

RC real vs RC mínima y máxima del simulador

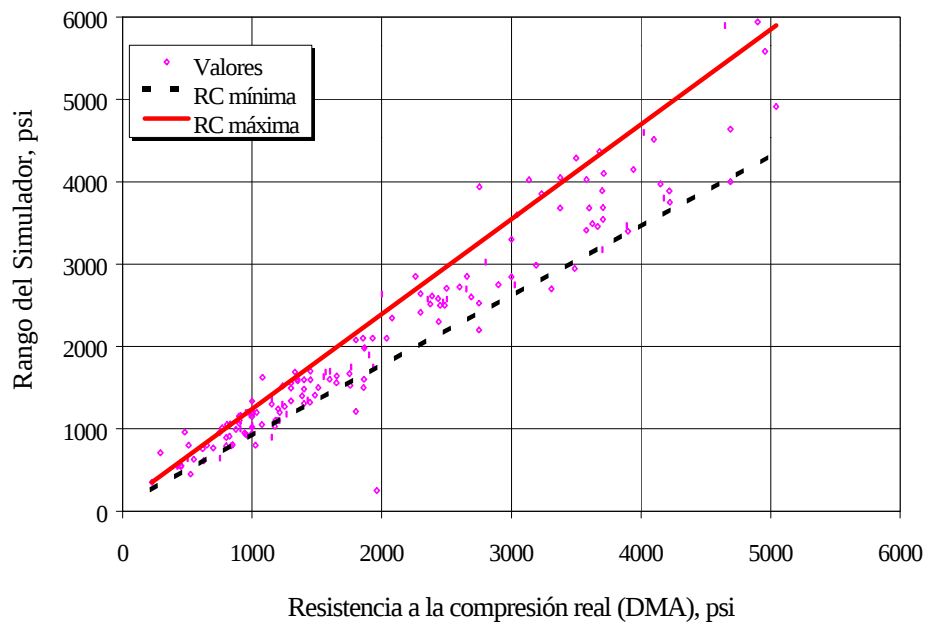


Figura 4: Carta de RC ensayada para lechada nro. 5 (DMA)

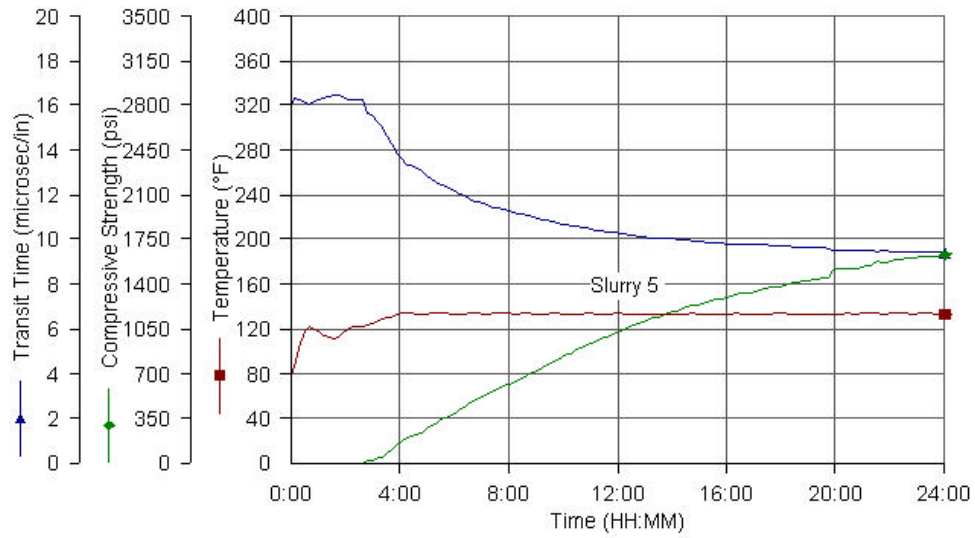


Figura 5: Predicción de RC para lechada nro. 5 (simulador)

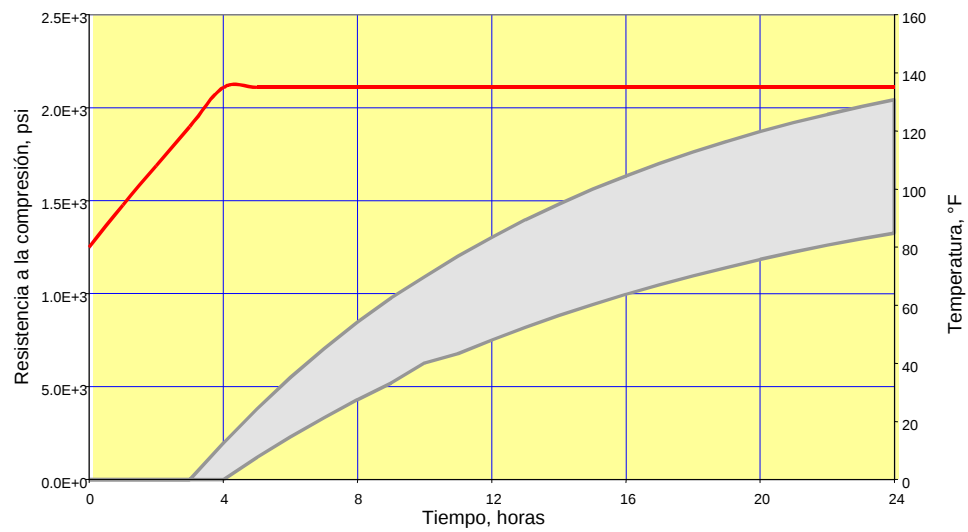


Figura 6 : Diagrama de pozo para ejemplo de uso del simulador

