

Evaluación de desempeño de dos diseños de lechadas de cemento para sistemas de recuperación térmica en el Campo Chichimene ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales•••••

pags 50-69

Grupo de investigación: Nuevas Tecnologías de perforación.

Línea de investigación: Cementación de pozos

Jorge Ramos•, Pedro Alonso Jimenez Padilla••, Roger David Palencia Stanford•••, Lilia Polanco••••

Recibido: 3 de agosto de 2014 Aceptado: 5 de diciembre de 2014

RESUMEN

Se evaluó el desempeño de dos diseños de lechadas de cemento para sistemas de recuperación térmica en el Campo Chichimene, a través de pruebas de laboratorio. Se establecieron rangos de diseño para el proyecto teniendo en cuenta las condiciones de un pozo real perforado en el campo, al igual que los estándares de calidad exigidos por Ecopetrol S.A. para este tipo de proyectos, tanto para propiedades API como para propiedades mecánicas. De acuerdo con los resultados obtenidos, la tecnología B es la que mejor se ajusta a los requerimientos para el proyecto; por lo tanto, es la recomendada para su uso en la cementación de los pozos de éste u otro campo, que tengan condiciones similares al pozo escogido para establecer los rangos de propiedades.

Palabras Clave: Lechadas de Cementos, Sistema de recuperación térmica Directa, Campo Chichimene.

ABSTRACT

The performance of two cement slurry designs for thermal recovery systems in Chichimene oilfield were evaluated through laboratory tests. Design ranges were established for the project, taking into account the conditions of a real drilled well in the oilfield, as well as the quality standards required by Ecopetrol S.A. for this kind of projects, for both API properties and mechanical properties. According to obtained results, technology B is the one which best fit the requirements for the project, therefore It's recommended for use in cementing wells of this oilfield or any other with similar conditions to the chosen well, used to establish the properties ranges.

Key words: cement slurries, direct thermal recovery system, Chichimene oilfield.

- Docente investigador, Ingeniería de petróleos. Jorge.ramos@investigadores.uamerica.edu.co
- Estudiante coinvestigador, Ingeniería de petróleos.
- Estudiante coinvestigador, Ingeniería de petróleos.
- Ingeniera Departamento de Perforación, Ecopetrol.
- Proyecto desarrollado en convenio con el ICP.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

INTRODUCCIÓN

Ante la creciente demanda mundial de energía, el agotamiento de los yacimientos de crudo liviano, y la necesidad de extraer la mayor cantidad posible de petróleo de los yacimientos, la industria petrolera se ha visto obligada a buscar otro tipo de alternativas, entre las cuales una de las más importantes es la explotación de yacimientos de crudo pesado. Debido a las características del crudo presente en este tipo de yacimientos, la explotación de estos hace necesaria la utilización de métodos de recobro mejorado de petróleo (EOR), siendo la recuperación térmica el método más utilizado y más exitoso.

Las altas temperaturas alcanzadas en los sistemas de recuperación térmica, hace necesaria la utilización de lechadas de cemento que sean capaces de soportar altas temperaturas sin que se vean afectadas sus propiedades mecánicas de manera apreciable, y que por lo tanto garanticen la integridad del pozo durante la implementación de dichos sistemas, éstos son los llamados cementos térmicos.

Durante el desarrollo del presente trabajo, se evalúan a nivel de laboratorio las dos tecnologías de lechadas térmicas disponibles en el mercado, para las cuales se evalúan las propiedades API tales como densidad, agua libre, filtrado, reologías, tiempo de espesamiento y resistencia a la compresión ultrasónica, las cuales son propiedades evaluadas en todos los tipos de cemento, a condiciones específicas relacionadas con el campo y el yacimiento, así como las propiedades mecánicas indicadoras principales de la calidad del cemento tales como módulo de Young, razón de Poisson, resistencia a la compresión y resistencia a la tensión, luego de someter las muestras de cemento a la temperatura que se alcanzaría en los procesos de Recuperación Térmica (párrafo excesivamente largo). Los resultados se comparan con los rangos establecidos para evaluar su estabilidad térmica y mantenimiento de las propiedades mecánicas durante estos procesos. Finalmente, con base a los resultados obtenidos, se se-

lecciona la tecnología de lechada que mejor se ajusta a los requerimientos establecidos para el proyecto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este proyecto se manejaron una serie de programas y equipos, los cuales se explicaran a continuación:

Programas

Well Cat: es un software diseñado por la Compañía Halliburton para realizar cálculos de los tiempos de Bombeabilidad de los fluidos, especialmente cementos.

Excel (demasiado obvio): es un programa desarrollado por la compañía Microsoft, el cual realiza distintas series de cálculos matemáticos, estadísticos y analíticos, según los algoritmos elaborados por el usuario con el fin de obtener una respuesta. Para los cálculos de las cantidades de cemento, agua y aditivos a mezclar, se utilizó un software que calcula automáticamente por estequiometría las cantidades requeridas en gramos, introduciendo como datos de entrada el volumen de lechada a preparar y las concentraciones de aditivos requeridas.

Equipos

- Consistómetro atmosférico: equipo que permite la agitación a BHCT con el fin de realizar la preparación de la lechada en condiciones atmosféricas.
 - Balanza de lodos presurizada: equipo utilizado para medir la densidad de la lechada.
 - Filtroprensa: equipo de alta presión utilizado para cuantificar la pérdida de filtrado de una lechada de cemento.
 - Viscosímetro rotacional: equipo utilizado para describe el comportamiento de

la lechada en movimiento a través de la tubería y otros ductos. El viscosímetro Fann es el más utilizado, es un aparato de tipo rotacional, movido por un motor sincronizado a dos velocidades diferentes que permite obtener velocidades rotacionales de 600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM.

- Consistómetro HP/HT: equipo utilizado para determinar el tiempo de espesamiento de una lechada de cemento ya que simula las condiciones de presión y temperatura a las cuales va a estar sometido el mismo en el trabajo de cementación real.
- Analizador ultrasónico de cemento: equipo utilizado para determinar la resistencia a la compresión ultrasónica. El principio de este aparato es el de medir el tiempo de tránsito de ondas sónicas a través del cemento.
- Cámara de curado: recipiente utilizado principalmente para permitir el fragüe y endurecimiento del cemento a BHST (175 °F).
- Mufla: equipo utilizado para realizar el calentamiento de los cilindros de cementos hasta una temperatura de 500 °F.
- Planímetro: instrumento de medición utilizado para el cálculo de áreas irregulares.
- Extensómetros: instrumento de medición utilizado para medir la deformación de los especímenes de cemento.

Luego de haber explicado descrito?? los instrumentos que se utilizaron para la realización del proyecto, a continuación se muestra la metodología que se siguió para obtener la evaluación de cada una de las tecnologías.

Las dos lechadas fueron mezcladas y evaluadas en concordancia con la norma API RP 10B-2 para las propiedades API. La API no esta-

blece procedimientos para la evaluación de las propiedades mecánicas, por lo tanto los cementos se evaluarán de acuerdo con las normas ASTM. Para los cálculos de las cantidades de cemento, agua y aditivos a mezclar, se utilizó una hoja de cálculo en Excel™. Se introduce la concentración de cemento como 100% y las concentraciones de los aditivos en %BWOC o gal/sx según el estado del aditivo, y este calcula las cantidades en gramos de cemento, agua y aditivos. Por lo tanto, con esta hoja de cálculo se pueden preparar cualquier cantidad de muestras con diferentes concentraciones. Para cada tecnología se prepararon varias muestras y se seleccionó la muestra que se ajustó a los requerimientos de propiedades API establecidos anteriormente.

Evaluación propiedades API

- Preparación y mezclado: antes del mezclado, el cemento, agua y los aditivos debieron ser pesados en una balanza electrónica de acuerdo con las concentraciones pre-establecidas para cada tecnología. Posteriormente se llevó a cabo el mezclado en una mezcladora API, agregando el agua, los aditivos y el cemento. El orden de mezcla varió de tecnología a tecnología. Por lo general se hace mezcla para una lechada de 600 ml, por limitante de la capacidad del recipiente de la mezcladora. Se preparó una mezcla de 600 ml con la misma composición para cada prueba API.
- Densidad: la densidad fue medida en una balanza de lodos presurizada. La lechada es vertida en el recipiente de la balanza y cerrada para la presurización. La presurización se hace inyectando la lechada por un orificio en la tapa y a través de una jeringa de inyección, lográndose esto cuando ya no es posible inyectar más lechada. Posteriormente la balanza es lavada y secada, y se procede a la lectura del valor de densidad, el cual corresponde al valor leído cuando se alcanza el equilibrio de la balanza.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

- Agua libre: la API establece procedimientos para realizar la prueba con un periodo estático en calentamiento y con un periodo estático a temperatura ambiente. Por facilidad, en este caso se realizó la prueba con un periodo estático a temperatura ambiente. Para esta prueba la lechada luego de ser preparada es acondicionada en un consistómetro atmosférico en un recipiente que permite la agitación a BHCT durante 20 minutos contados a partir de que la lechada alcanza la temperatura deseada. Transcurridos esos 20 minutos, se vierte 670 g de la lechada en un erlenmeyer de 500 ml o en una probeta de 250 ml. El erlenmeyer es tapado con un papel para evitar la evaporación y dejado en reposo durante dos horas en una superficie sin vibración. Transcurridas las dos horas se extrae el agua que se ha desprendido de la lechada con una jeringa, y se calcula el porcentaje de agua libre de acuerdo con la siguiente ecuación (ver Ecuación 1).

Ecuación 1. Cálculo del porcentaje de agua libre.

$$\phi = \frac{VF(100)}{VS}$$

Fuente: American Petroleum Institute., 2005.

Dónde:

VF= Volumen de agua libre en mililitros

VS= Volumen de lechada en mililitros

- Pérdida de filtrado. esta prueba se lleva a cabo en una filtroprensa: para esta prueba es necesario un acondicionamiento previo de la lechada a BHCT, la cual puede llevarse a cabo en un consistómetro atmosférico o en un consistómetro HP/HT (alta presión y alta temperatura). En este caso se llevó a cabo dicho acondicionamiento en un consistómetro atmosférico en todos los casos. Luego del acondicionamiento la lechada se vierte en el recipiente de la filtroprensa, don-

de la lechada debe pasar a través de una malla de 325 mesh luego de abierta la válvula de fondo. El recipiente es presurizado a 1000 psi con nitrógeno, y el controlador de temperatura de la filtroprensa es capaz de mantener el recipiente a BHCT durante el tiempo de la prueba, el cual es de 30 minutos. Transcurridos los 30 minutos se cuantifica la cantidad de filtrado en la probeta, se multiplica por 2 y se reporta el filtrado API como cm³/30 min.

- Reologías en superficie: las reologías en superficie fueron determinadas a temperatura ambiente de 68 °F.
- La determinación del comportamiento reológico de la lechada en superficie es de gran importancia, ya que es un indicativo de la facilidad con que la lechada se va a dejar mezclar y bombear al momento de realizar el trabajo. Las reologías son determinadas a través de un viscosímetro rotacional. El viscosímetro cuenta con un cilindro denominado bop y una camisa, entre los cuales se sitúa la lechada durante la prueba. Luego de la mezcla, la lechada es vertida en un recipiente y dicho recipiente elevado para que el bop y la camisa queden sumergidos completamente. Se procede a realizar las lecturas a 3, 6, 100, 200 y 300 rpm, esperando 10 segundos luego de iniciada la rotación para realizar la lectura. La lectura a 600 rpm no se realiza, ya que a esta velocidad de rotación las partículas de la lechada se centrifugan, causando una lectura errónea. La lectura que nos da el dial del viscosímetro corresponde al ángulo de deflexión entre el bop y la camisa causado por la lechada. Una vez se tienen las lecturas necesarias se procede al cálculo del YP y la VP a través de alguno de los modelos reológicos. La determinación de los geles también hace parte de la reología, los cuales se determinan a 10 segundos y 10 min, es decir se lee el máximo valor alcanzado a 3 rpm, luego de dejar la lechada a condiciones estáticas durante estos tiempos.

- Reologías en fondo: las reologías en fondo fueron determinadas a BHCT de 132 °F. Para la realización de esta prueba, la lechada debe ser acondicionada previamente en un consistómetro atmosférico a BHCT durante 20 minutos contados a partir de que la lechada alcanza la temperatura deseada. Las reologías son determinadas de igual manera que en superficie, teniendo como diferencia que la lechada es vertida en un recipiente capaz de mantener la lechada a BHCT, y que es ajustado a la temperatura deseada previo a la realización de la prueba. Al igual que en superficie se realizan las lecturas a 3, 6, 100, 200 y 300 rpm, y posteriormente se calcula el YP y la VP de la lechada en fondo a través de alguno de los modelos reológicos. También se calculan los geles a 10 segundos y 10 minutos. Las reologías en fondo van a ser menores que en superficie, como consecuencia del adelgazamiento ocasionado en la lechada por la temperatura, sin embargo esto puede no suceder, de acuerdo con el tipo de lechada.
- Tiempo de espesamiento/bombeabilidad/fragüe: para la determinación del tiempo de espesamiento se requiere la utilización de un consistómetro HP/HT, el cual simula las condiciones de presión y temperatura a las cuales va a estar sometida la lechada en el trabajo de cementación real. La lechada es vertida en un recipiente especial, el cual tiene un agitador que va conectado al consistómetro. Lo que mide el consistómetro es la consistencia de la lechada, a través de un potenciómetro que mide los cambios de voltaje causados por el espesamiento de la lechada. Tras el mezclado de la lechada, esta es vertida en una copa especial que luego es introducida en el consistómetro, en un aceite con unas características especiales que permiten un aumento gradual de la temperatura. El consistómetro es capaz de simular las condiciones de presión y temperaturas que se le especifican en el *schedule* o rampa de presión y temperatura. La importancia de realizar esta prueba es que permite saber el tiempo de operación

requerido para completar el trabajo sin que se nos fragüe la lechada en la tubería.

- Resistencia a la compresión ultrasónica o no destructiva: para la determinación de la resistencia a la compresión ultrasónica es necesaria la utilización de un analizador ultrasónico de cemento (UCA). El principio de este aparato es el de medir el tiempo de tránsito de ondas sónicas a través del cemento, siendo este tiempo de tránsito un indicativo del desarrollo de esfuerzo compresivo del cemento, ya que entre más resistencia adquiera el cemento, menor será el tiempo de tránsito a través de dicho cemento. La importancia de esta prueba es que permite conocer el tiempo WOC, es decir el tiempo después del cual se podrá continuar con las operaciones en el pozo.

Evaluación de propiedades mecánicas

Para la determinación de las propiedades mecánicas fue necesaria la fabricación de 14 cilindros de cemento de 1.5 pulgadas de diámetro por 3.5 pulgadas de largo para cada tecnología. Cabe resaltar que la composición del cemento utilizada para la fabricación de dichos cilindros fue la misma de la muestra escogida por propiedades API para cada tecnología.

El objetivo de evaluar las propiedades mecánicas fue determinar si los cementos servirían en el proyecto de recuperación térmica real (combustión *in situ*), por lo tanto fue necesario someter los cilindros de cemento de las tres tecnologías a una temperatura de 500 °F en una mufla, durante 1 mes, y con un aumento gradual de la temperatura. Esta temperatura corresponde a la máxima temperatura a la cual se dejarán llegar los pozos cuando el frente de combustión los alcance.

Una vez que las muestras son sometidas a la temperatura establecida, éstas deben ser preparadas para la determinación de las propiedades mecánicas. Como se había mencionado anteriormente, no existen estándares API para la

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

determinación de las propiedades mecánicas de los cementos, por lo cual se siguen los mismos estándares utilizados para las rocas. La preparación de las muestras se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM D4543-08 "*Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances*".

Básicamente la preparación consiste en dejar los cilindros en condiciones adecuadas para el estudio de las propiedades mecánicas. Para este fin lo primero que se hace es dejar las muestras tan homogéneas como sea posible en sus dos caras, esto con el fin de que el esfuerzo aplicado sobre los especímenes sea proporcional en toda su área. Cualquier irregularidad presente en el área de esfuerzo puede generar una medida errónea en las propiedades, y por lo tanto resultados poco confiables. Para lograr este objetivo se utiliza un instrumento conocido como planímetro, el cual es un aparato de medición utilizado para el cálculo de áreas irregulares. Tal y como lo referencia en la norma ASTM D4543-08 la planitud permitida para la cara de los cilindros debe ser igual o menor a 0.02 mm.

Para el caso en que las muestras sean utilizadas para la prueba de resistencia a la tensión se hace necesario dividir un cilindro en tres discos. Las cuales por norma tienen una medida equivalente a dos veces el diámetro por longitud. La idea fundamental para la preparación de estos discos es que su cilindricidad sea menor o igual a 0.02 mm, con el fin de que el resultado de la resistencia a la tensión sea lo más confiable posible.

Una vez las muestras son preparadas, se procede a la determinación de las propiedades mecánicas. Las propiedades determinadas para cada tecnología fueron: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, módulo de Young y razón de Poisson.

- Resistencia a la compresión. Para este ítem será necesario obtener el cálculo de los esfuerzos a través de los procedimientos descritos en la norma ASTM D7012. Básicamente

esta norma describe como obtener estos resultados a través de someter las muestras a esfuerzos uniaxiales y triaxiales.

- Resistencia a la compresión uniaxial. Los esfuerzos uniaxiales son aquellos que solo someten las muestras a estudiar en una sola dirección, es decir no presentan ningún esfuerzo por confinamiento. Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial o UCS (en sus siglas en inglés). La muestra es sometida a compresión en sus extremos para determinar el punto en el cual la muestra falla y se rompe. Es de gran importancia siempre iniciar realizando las pruebas uniaxiales ya que con esta prueba se define el esfuerzo máximo al que puede estar sometido cada tecnología. Para el caso de la resistencia a la compresión se realiza el ensayo de este esfuerzo a tres muestras diferentes, con el fin de determinar un esfuerzo máximo y mínimo al que pueden estar sometidos los cilindros de dicha tecnología. Determinar estos parámetros será de gran ayuda para la prueba el desarrollo de la prueba triaxial.
- Resistencia a la compresión triaxial. Para las prueba de compresión triaxial se adiciona un ítem importante en todo ensayo que es el esfuerzo de confinamiento, el cual ayuda en gran medida a que estas muestras alcancen a superar el esfuerzo determinado en el ensayo uniaxial. Para la determinación de estos esfuerzos se utiliza un equipo muy conocido en los laboratorios de mecánicas de rocas denominado Sistema de Prueba de Mecánica de roca o (RMTS en sus siglas en inglés). El esfuerzo por confinamiento es realizado a través de presión hidráulica que proporciona un aceite minera. Es necesario que el espécimen tenga un recubrimiento impermeable con el fin de evitar posible contaminación de la muestra con el aceite.
- Resistencia a la tensión. Para la determinación de la resistencia a la tensión se utiliza el procedimiento de Brazilian Test. Básicamente esta prueba describe como obtener estos

resultados a través de someter las muestras a esfuerzos uniaxiales y triaxiales, Estos procedimientos se explicaran más adelante. Resistencia a la tensión uniaxial. La resistencia a la tensión uniaxial es el valor de falla cuando la muestra de cemento es sometida a un esfuerzo de tensión, la forma más común de medir esta resistencia es sujetar una muestra cilíndrica por sus dos extremos, y estirla hasta que falle, sin embargo esta prueba es difícil realizarla con el cemento fraguado ya que el núcleo en la mayoría de los casos se rompe en sus puntos de sujeción, por lo tanto un método indirecto conocido como el Brazilian Test es a menudo llevado a cabo para determinar la resistencia a la tensión de un cemento fraguado. La técnica consiste en cargar especímenes en forma de discos en compresión a través de su diámetro hasta que falle. Un esfuerzo tensil es generado en el centro del disco en una dirección normal a la carga aplicada, se recomienda el uso de platinas curvadas para mejorar la distribución de esfuerzo en la muestra. La ASTM además estandarizo la forma para determinar la resistencia a la tensión del concreto tal y como se describe en la norma ASTM C496, la cual es muy similar a la norma ASTM D3967-08 que va referida a la resistencia a la tensión de la roca.

El valor obtenido de esta prueba será vital para saber el esfuerzo máximo a los que puede estar sometido cada disco, por lo que será de gran ayuda para evaluar la resistencia a la tensión triaxial.

Se hace referencia a estas propiedades geomecánicas recurrentemente y desde el inicio del artículo y hasta ahora se definen.

- **Módulo de Young.** El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Es un parámetro de gran importancia para determinar qué tan rígido es un cuerpo. Módulos de Young alto será un in-

dicativo de que el cuerpo tendrá menor deformación cuando se aplique un esfuerzo y entre menor sea el valor de este el cuerpo presentará mejores características de flexibilidad. Para el caso de los cementos la idea fundamental es que esta propiedad sea lo más baja posible, ya que entre más flexible sea un cemento, genera un mayor aseguramiento producto de las expansiones por temperatura. El procedimiento para poder determinar este módulo viene dado por los resultados obtenidos en las pruebas uniaxiales, en donde se relaciona la deformación que genera un cuerpo cuando está sometido a algún esfuerzo de carga. La deformación de las muestras es registrada a través de un extensómetro.

- **Razón de Poisson.** El coeficiente o razón de Poisson, es una constante elástica que relaciona la deformación radial con la deformación axial, en un cuerpo sometido a carga que se acorta en la dirección de carga y se expande en la dirección radial. El procedimiento para poder determinar esta razón viene dado por los resultados obtenidos en las pruebas uniaxiales, en donde se relaciona la deformación tanto radial como axial que genera un cuerpo cuando está sometido a algún esfuerzo de carga. La deformación de las muestras es registrada a través de un extensómetro radial y un extensómetro axial con el fin de poder con estos resultados realizar el cálculo de la razón de Poisson a través de la Ecuación 2. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de las dos tecnologías de lechadas de cemento que serán evaluadas en la investigación.

Se presenta en primera instancia la composición y características de la lechada A. Posteriormente se muestran los resultados de la evaluación de la lechada A, tanto de las propiedades API, como de las propiedades mecánicas, analizando brevemente dichos resultados.

- **Composición.** El cemento térmico A, es un cemento especial con alto contenido de aluminio y a base de fosfatos. La mezcla de este ce-

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

mento con ciertos aditivos da como resultado la lechada A. La Tabla 1 muestra la composición de la lechada A, la concentración en % BWOC o en gal/sx dependiendo del estado del compuesto y los pesos en gramos para la preparación de una lechada de 600 ml.

- Densidad. El resultado de la densidad en superficie para esta lechada fue de 14.3 ppg. Con respecto a la densidad de esta lechada, hay que tener en cuenta que en fondo ésta será mayor (aproximadamente 14.5 ppg), como consecuencia de la presión y temperatura, las cuales hacen que las esferas (spherilite 4000 psi) se rompan, aumentando la densidad de la lechada.
- Agua libre. La lechada A no desprendió agua luego de las dos horas de prueba, por lo tanto el agua libre reportada es de 0%. Esto se ajusta al requerimiento de este proyecto, en el cual se utilizará un liner, y por lo tanto la

lechada no debe desprender agua libre durante el trabajo de cementación.

- Pérdida de filtrado. La pérdida de filtrado para esta lechada transcurridos los 30 min fue de 20.57 ml o cm^3 , por lo tanto se reporta la pérdida de filtrado como $20.57 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$. Teniendo en cuenta el rango establecido para ésta propiedad, la lechada A se ajusta al requerimiento.
- Reologías en superficie. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en el viscosímetro rotacional a temperatura ambiente para la lechada A.

Ecuación 2. Razón de Poisson.

$$\nu = \frac{\text{Deformación}_r}{\text{Deformación}_a}$$

Fuente: Nelson, E. & Guillot, D, 2006

Tabla 1. Composición de la lechada A.

Aditivo	Concentración	Peso (g)
Cemento Térmico A	100	695.20
Agua	24.387 gal/sx	169.54
Dair 3000L	0.012 gal/sx	0.87
Versaset	0.35% BWOC	2.43
Latex 3000	1.5 gal/sx	122.31
Well Life 684	2.5% BWOC	17.38
Spherilite 4000 psi	5% BWOC	34.76

Fuente: Los Autores.

Función de los aditivo

A continuación se especifica la función de los aditivos.

- Dair 3000L (gal/sx). Antiespumante
- Versaset (%BWOC). Acelerador
- Latex 3000 (gal/sx). Control de pérdida de filtrado.
- Well Life 684 (%BWOC). Mejoramiento de propiedades mecánicas. Está compuesto 94% por carbón y 6% por nitrógeno.
- Spherilite 4000 psi (%BWOC). Es un extensor en superficie. Consiste en esferas que se rompen con presión y que por lo tanto aumentan la densidad en fondo.

Tabla 2. Reologías en superficie para la lechada A.

Velocidad rotacional (rpm)	Lectura ramp-up	Lectura ramp-down	Lectura promedio
Ø3	10	10	10
Ø6	11	11	11
Ø100	40	39	40,5
Ø200	63	65	64
Ø300	85		85

Fuente: Los Autores.

Las lecturas de geles en superficie son especificadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Lecturas de geles a 10 segundos y 10 minutos en superficie para la lechada A.

Tiempo transcurrido	Lectura máxima
10 segundos	12
10 minutos	18

Fuente: Los Autores.

- Reologías en fondo. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en el viscosímetro rotacional a BHCT de 132 °F para la lechada A.

Tabla 4. Reologías en fondo para la lechada A.

Velocidad rotacional (rpm)	Lectura ramp-up	Lectura ramp-down	Lectura promedio
Ø3	8.5	8.5	8.5
Ø6	10	10	10
Ø100	28.5	26	27.25
Ø200	44	44	44
Ø300	61		61

Fuente: Los Autores.

Las lecturas de geles en fondo son especificadas en la Tabla 5.

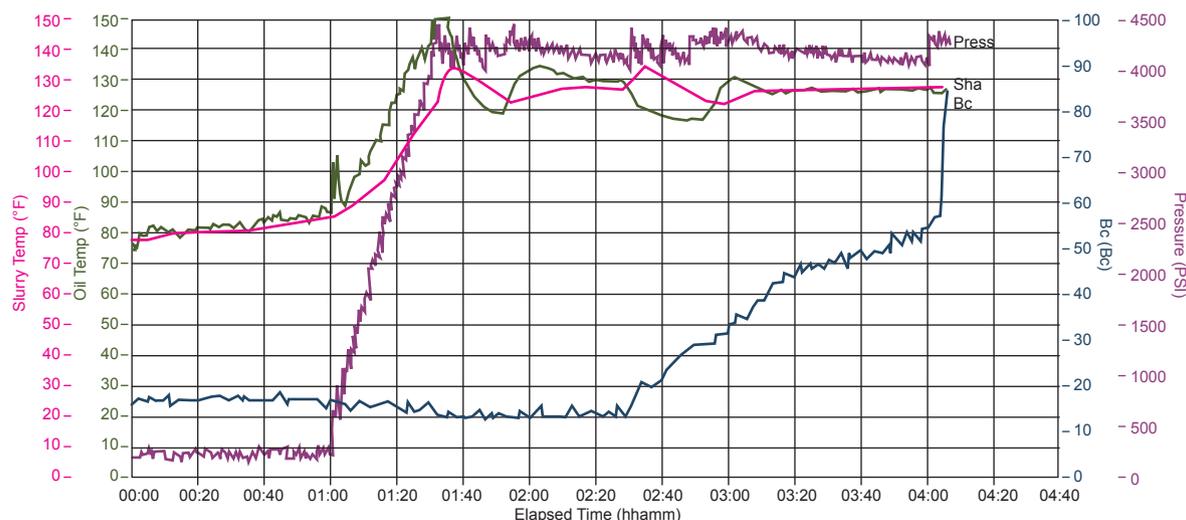
Tabla 5. Lecturas de geles a 10 segundos y 10 minutos en fondo para la lechada A.

Tiempo transcurrido	Lectura máxima
10 segundos	9
10 minutos	20

Fuente: Los Autores.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

- Tiempo de espesamiento/bombeabilidad. La Gráfica 1 plasma la historia de desarrollo de consistencia de la lechada A.

Gráfica 1. Tiempo de bombeabilidad para la lechada A.

Fuente: Los Autores.

Se observa que aproximadamente a las 4 horas y 12 minutos se alcanzan las 70 Bc, siendo registrado éste tiempo como el tiempo de espesamiento. Al llegar a éste tiempo se observa una ganancia muy rápida de consistencia, lo cual representaría un alto riesgo en el caso de que se presentara alguna contingencia que no permita completar la cementación en un tiempo menor al registrado como el tiempo de espesamiento.

- Resistencia a la compresión no destructiva. La gráfica 2 muestra el desarrollo de resistencia a la compresión de la lechada A con el tiempo.
- En la gráfica se observa que a las 24 horas, se tiene un valor de resistencia a la compresión ultrasónica de 1510 psi, lo cual se ajusta al requerimiento establecido para el proyecto.
- Propiedades mecánicas-Tecnología A. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades mecánicas

para la tecnología A con sus respectivas unidades de medida.

En cuanto a los resultados de las propiedades mecánicas se observa que todas las propiedades se ajustan a los requerimientos del proyecto, exceptuando el módulo de Young, el cual está ligeramente por encima del requerimiento. La razón de Poisson cumple con el requerimiento, sin embargo el valor está muy bajo, ya que es exactamente el valor mínimo requerido. Los valores de resistencia a la compresión y resistencia tensil, están ambos por encima del valor mínimo requerido, lo cual hace que en cuanto a éstas 2 propiedades el cemento esté muy bien, ya que entre más altos sean los valores de resistencia a la compresión y tensil, el cemento será más resistente a los esfuerzos.

Se presenta en primera instancia la composición y características de la lechada B. posteriormente se muestran los resultados de la evaluación de la lechada B, tanto de las propiedades API, como de las propiedades mecánicas, analizando brevemente dichos resultados.

- **Composición.** El cemento térmico B, es un cemento Portland convencional clase G modificado, sin embargo no se tuvo acceso a información que especifique exactamente como es modificado dicho cemento. La Tabla 7 muestra la composición de la lechada B.
- **Densidad.** El resultado de la densidad en superficie para esta lechada fue de 14.00 ppg.
- **Agua libre.** La lechada B no desprendió agua luego de las dos horas de prueba, por lo tanto el agua libre reportada es de 0% a una inclinación de 15°. Esto se ajusta a los requerimientos del proyecto, ya que se utilizará un liner, por lo tanto la lechada no debe desprender agua libre durante el trabajo de cementación.
- **Pérdida de filtrado.** La pérdida de filtrado para esta lechada transcurridos los 30 min

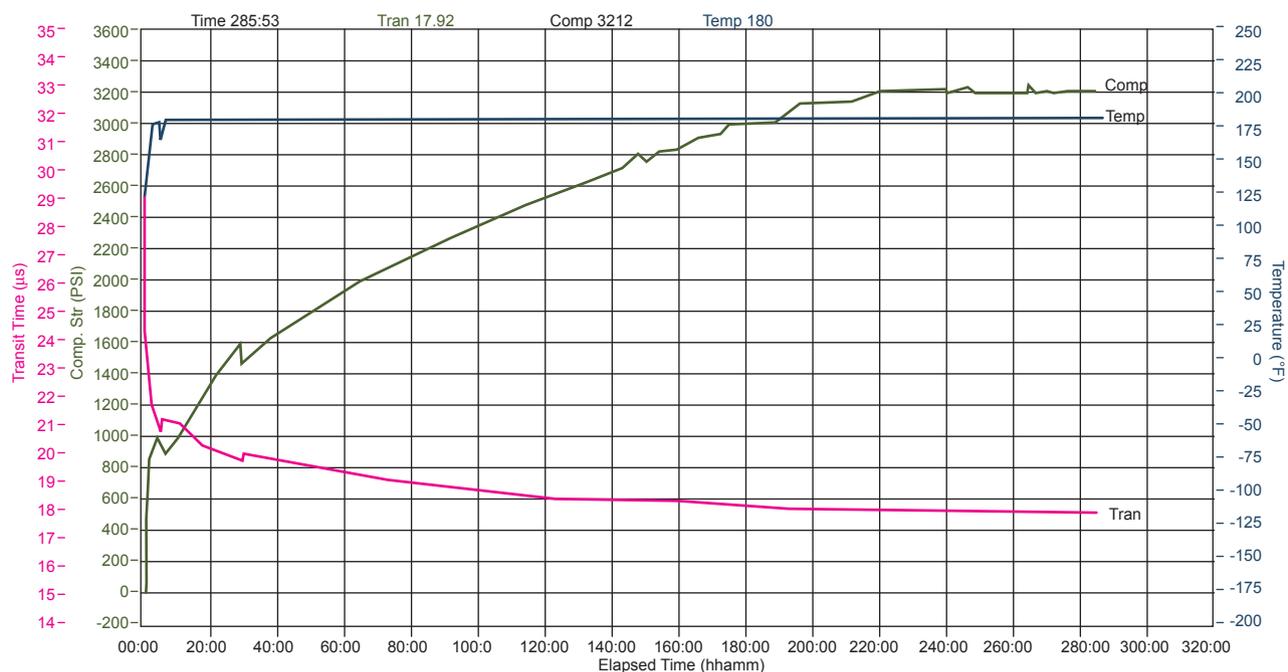
fue de 22 ml o cm³, a 132°F y 1000 psi. Por lo tanto se reporta la pérdida de filtrado como 22 cm³/30 min. Éste valor de pérdida de filtrado se ajusta el requerimiento establecido para el proyecto el cual es un filtrado menor a 30 cm³/30 min.

- **Reologías en superficie.** La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos en el viscosímetro rotacional a temperatura ambiente para la lechada B.

Estos datos de geles y reología en superficie nos da como resultado una viscosidad plástica (VP) de 151.568 cp y un *yield point* (YP) de 40.24 lb/100ft², valores que se ajustarían al proyecto, ya que se respetaría la jerarquía reológica mencionada con anterioridad.

- **Reologías en fondo.** La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos en el viscosímetro rotacional a BHCT de 132 °F para la lechada B.

Gráfica 2. Resistencia a la compresión ultrasónica para la lechada A.



Fuente: Los Autores.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

Tabla 6. Resultados de propiedades mecánicas para la tecnología A.

Propiedad	Unidad	Rango establecido	Valor
Módulo de Young	Psi	< 0.8 + E + 6	0.842 E + 6
Razón de Poisson	Adimensional	> 0.15	0.15
Resistencia a la compresión	Psi	> 2.200	3281
Resistencia tensil	Psi	> 360	490.6

Fuente: Los Autores.

Tabla 7. Composición de la lechada B.

Aditivos	Concentración
Cemento Térmico B	1.00 sk
Agua	3.834 gal/sk
Antiespumante	0.030 gal/sk
Viscosificante	0.040% BWOC
Controlador de filtrado	0.250% BWOC
GASBLOK	0.850 gal/sk
Dispersante	0.230 gal/sk
Retardador	0.30 BWOC

Fuente: Los Autores.

Tabla 8. Reologías en superficie para la lechada B.

Velocidad rotacional (rpm)	Lectura promedio
Ø3	17.5
Ø6	21.0
Ø30	36.0
Ø60	50.0
Ø100	65.0
Ø200	88.5
Ø300	102

Fuente: Los Autores.

Las lecturas de geles en superficie son especificadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Lecturas de geles a 10 segundos y 10 minutos en superficie para la lechada B.

Tiempo transcurrido	Lectura máxima
10 segundos	17
10 minutos	26

Fuente: Los Autores.

Tabla 10. Reologías en fondo para la lechada B.

Velocidad rotacional (rpm)	Lectura promedio
Θ3	16.5
Θ6	21.0
Θ30	40.0
Θ60	55.0
Θ100	71.0
Θ200	90.5
Θ300	116.0

Fuente: Los Autores.

Las lecturas de geles en fondo son especificadas en la Tabla 11.

Tabla 11. Lecturas de geles a 10 segundos y 10 minutos en fondo para la lechada B.

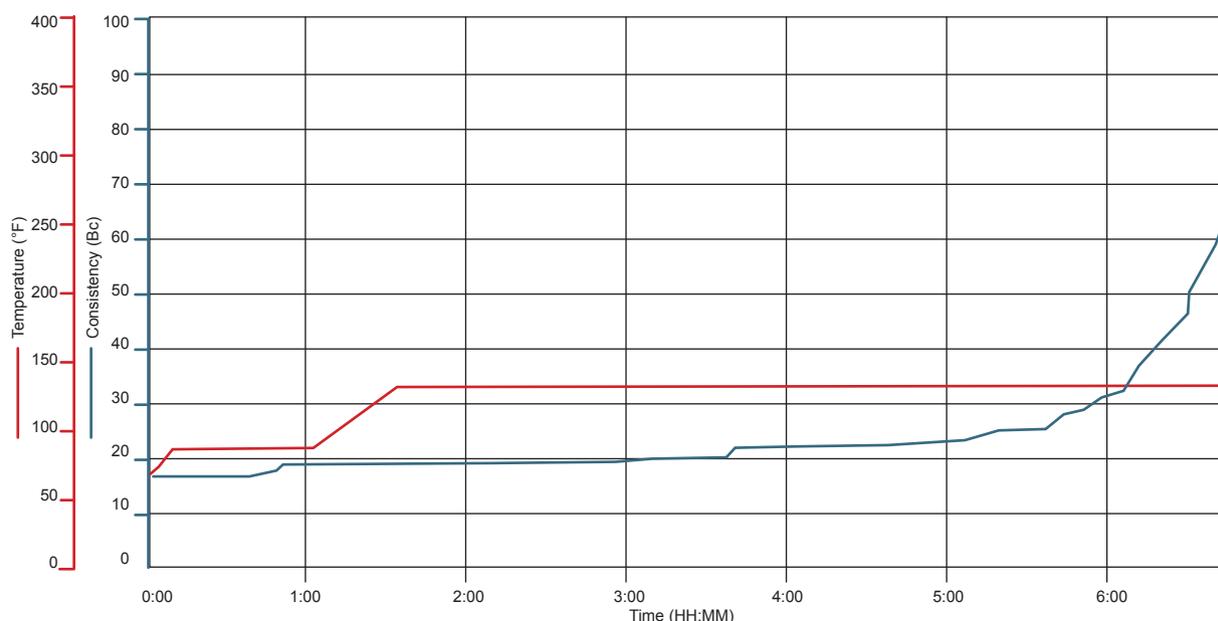
Tiempo transcurrido	Lectura máxima
10 segundos	18
10 minutos	37

Fuente: Los Autores.

Estos datos de geles y reología en fondo nos dan como resultado una viscosidad plástica de 176.523 cp y un *yield point* de 39.88 lb/100 ft², los cuales se ajustan a los rangos propuestos anteriormente.

- Tiempo de espesamiento/bombeabilidad. La Gráfica 3 plasma la historia de desarrollo de consistencia de la lechada B.

Gráfica 3. Tiempo de bombeabilidad para la lechada B.



Fuente: Los Autores.

Los tiempos de desarrollo de consistencia para la lechada B se pueden apreciar en la Tabla 12. De acuerdo con la gráfica de la historia de desarrollo de consistencia, los 70 Bc se alcanzan a las 6 horas y 46 minutos, registrando este tiempo como el tiempo de espesamiento. De acuerdo al rango establecido, esta lecha-

da no cumpliría con el requerimiento para ésta propiedad, ya que el tiempo estaría por encima del límite superior del rango establecido. Los tiempos de desarrollo de resistencia para la lechada B se pueden apreciar en la Tabla 13, donde a las 24 horas se alcanza una resistencia de 1500 psi.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

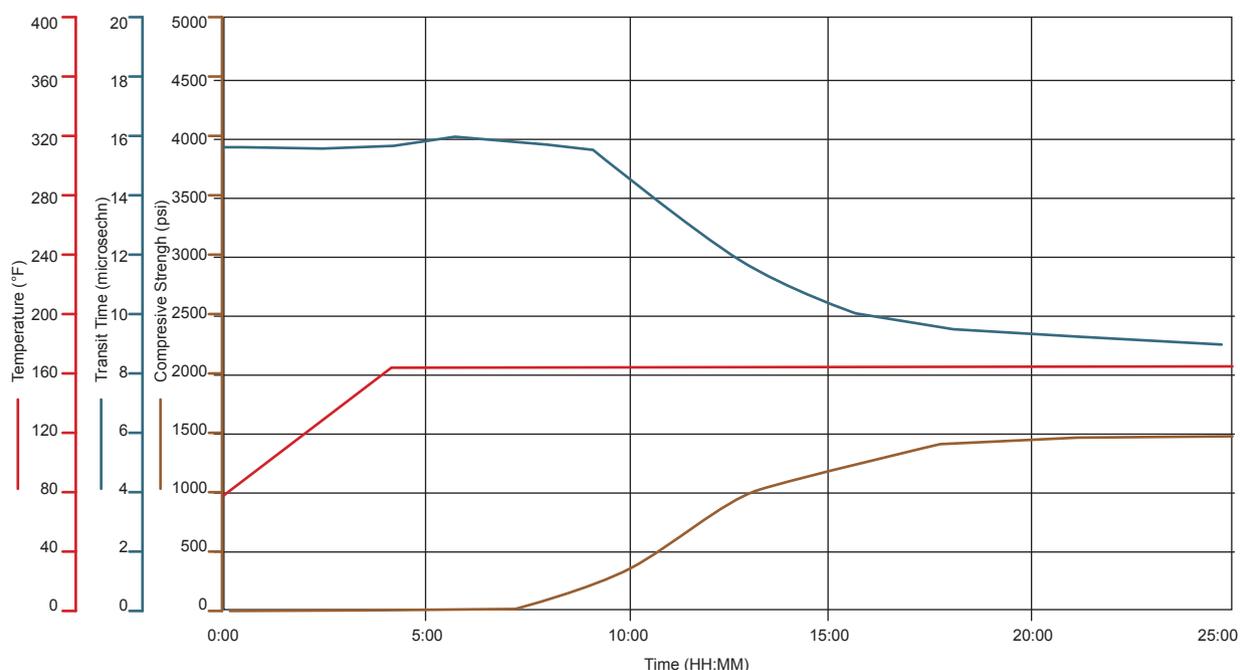
- Resistencia a la compresión no destructiva. La Gráfica 4 muestra el desarrollo de resistencia a la compresión de la lechada B con el tiempo.

Tabla 12. Desarrollo de consistencia para la lechada B.

Consistencia	Tiempo
Observación: El tiempo de espesamiento incluye el tiempo de Batch Mix Time	
Batch Mix Time	01:00 hr:mm
POD	05:26 hr:mm
30 Bc	05:54 hr:mm
50 Bc	06:31 hr:mm
70 Bc	06:46 hr:mm

Fuente: Los Autores.

Gráfica 4. Resistencia a la compresión ultrasónica para la lechada B.



Fuente: Los Autores.

Tabla 13. Tiempos de desarrollo de resistencia para la lechada B.

Tiempo (HH:MM)	Resistencia Compresión (PSI)
Resistencia @ 8:36	50
Resistencia @ 11:04	500
Resistencia @ 24:00	1500

Fuente: Los Autores.

En la gráfica 4 se observa que a las 24 horas, el cemento alcanza exactamente el valor mínimo requerido de resistencia a la compresión ultrasónica para éste tiempo.

- Propiedades mecánicas-Tecnología B. La Tabla 14 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades mecánicas para la tecnología B con sus respectivas unidades de medida.

De acuerdo con los rangos establecidos, todas las propiedades mecánicas de la tecnología B, se ajustan perfectamente a los rangos requeridos para el proyecto.

RESULTADOS

A continuación se realizará el análisis y comparación de los resultados obtenidos para las tres?? tecnologías analizando cada una de las propiedades tanto API como mecánicas.

- Comparación y análisis de resultados propiedades API. A continuación se comparan los resultados obtenidos para las dos lechadas analizando cada propiedad API determinada en el laboratorio.
- Densidad. Como se puede apreciar en la Tabla 15, los resultados obtenidos de las dos tecnologías se encuentran dentro del rango requerido de 10,92 a 16,49 ppg. Toda lechada que se ajuste a este intervalo superara la presión de poro pero no la presión de fractura, condición requerida para controlar el pozo y a su vez evitar fracturar la formación.
- Reología en Superficie. Como se puede apreciar en la Tabla 18, la tecnología que mejor comportamiento reológico tiene en superficie es la Lechada B ya que al tener menor VP y YP, su mezclabilidad en superficie será mucho más sencilla permitiendo que lo equipos de mezcla no realicen un gran esfuerzo.
- Reología en fondo. Como se explicó en páginas anteriores el objetivo de una lechada en fondo es que tenga un comportamiento reológico tal, que se cumpla con la "jerarquía reológica", es decir que el YP y la VP del cemento sean mayores que el YP y la VP del lodo y el espaciador. En ese orden de ideas tal como se muestra en la Tabla 19, se puede evidenciar que las tres tecnologías en cuanto a VP y YP, se ajustan a las necesidades del proyecto ya que superan las propiedades antes mencionadas. Generar una jerarquía reológica entre los fluidos es un factor determinante para este tipo de trabajos porque se garantiza una limpieza profunda del anular a cementar, ocasionando una excelente adherencia del cemento tanto a la tubería como a la formación. Es por esto que a pesar de que en todas las lechadas se cumpla esta jerarquía, la tecnología que mejor comportamiento reológico en fondo tiene es la Lechada B, ya que por sus propiedades genera una mejor limpieza del hueco.
- Agua Libre. Como se puede apreciar en la Tabla 16, los resultados obtenidos de las dos tecnologías son de 0% de agua libre, cumpliendo con los requerimientos de API para la cementación de un *liner*.
- Pérdida de Filtrado. Como se puede apreciar en la Tabla 17, los resultados obtenidos de las dos tecnologías en cuanto a pérdida de filtrado se encuentran por debajo de 35cm³/30 min, cumpliendo con los requerimientos estipulados para este proyecto. Sin embargo la tecnología que mejor comportamiento tiene con respecto a la propiedad en mención es la Lechada A, ya que presente una pérdida menor en su fase acuosa. Recordemos que entre menor sea la pérdida de filtrado para un cemento, sus propiedades para la que fue diseñada no se verá afectada.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

Tabla 14. Resultados de propiedades mecánicas para la tecnología B.

Propiedad	Unidad	Rango	Valor
Módulo de Young	psi	< 0.8 * E + 6	0.696 E + 6
Razón de Poisson	Adimensional	> 0.15	0.17
Resistencia a la compresión	psi	> 360	4200
Resistencia tensil	Psi	> 2.200	580

Fuente: Los Autores.

Tabla 15. Comparación de resultados de densidad.

Propiedad	Lechada A	Lechada B
Densidad	14.5 ppg	14.0 ppg

Fuente: Los Autores.

Tabla 16. Comparación de resultados de agua libre.

Lechada A	Lechada B
0%	0%

Fuente: Los Autores.

Tabla 17. Comparación de resultados de pérdida de filtrado.

Lechada A	Lechada B
20.57 cm ³ /30 min	22 m ³ /30 min

Fuente: Los Autores.

Tabla 18. Comparación de resultados de reología en superficie.

Velocidad rotacional (rpm)	Lectura promedio Lechada A	Lectura promedio Lechada B
Ø3	10.0	17.5
Ø6	11.0	21.0
Ø100	40.5	65.0
Ø200	64.0	88.5
Ø300	85.0	102.0
GELES		
10 Seg	12	17
10 Min	18	26
VP	158.57 cP	151.57 cP
YP	45 lbf/100 ft ²	40.24 bf/100ft ²

Fuente: Los Autores.

Tabla 19. Comparación de resultados de reología en fondo.

Velocidad rotacional (rpm)	Lectura promedio Lechada A	Lectura promedio Lechada B
Ø3	8.5	16.5
Ø6	10.0	21.0
Ø100	27.25	71.0
Ø200	44.0	90.5
Ø300	61.0	116.0
GELES		
10 Seg	9	18
10 Min	20	37
VP	164.523 cp	176.523 cp
YP	40.88 lbf/100 ft ²	39.88 bf/100 ft ²

Fuente: Los Autores.

- Tiempo de espesamiento/Bombeabilidad/frágüe. En el caso de ésta propiedad, las tres lechadas también se encuentran dentro del rango establecido para el proyecto, sin embargo es de resaltar que entre menor sea el tiempo que dura la lechada en alcanzar los 70 Bc será más conveniente, ya que de éste modo se reducirán los tiempos no productivos (NPT de sus siglas en inglés), reduciendo en gran medida los costos operacionales. La lechada que mejor cumple ésta condición es la lechada A, tal como se muestra en la Tabla 20.
- Resistencia a la compresión no destructiva. Para el caso de ésta propiedad, las dos tecnologías cumplen con el requerimiento de una resistencia a la compresión mayor a 1500 psi a las 24 horas tal y como se evidencia en la Tabla 21. Sin embargo se observa que la lechada B presenta un valor ligeramente más alto que la otra lechada, lo cual es más conveniente ya que de cierto modo garantizaría mejor la integridad del pozo al iniciar nuevamente operaciones en el pozo.

Tabla 20. Comparación de resultados de tiempo de espesamiento.

Consistencia	Tiempo Lechada A	Tiempo Lechada B
<i>Batch Mix Time</i>	01:00 hr:mm	01:00 hr mm
70 Bc	4:12 hr mm	06:46 hr:mm
100		

Fuente: Los Autores.

Tabla 21. Comparación de resultados de resistencia a la compresión no destructiva.

Tiempo (HH:MM)	Resistencia compresión Lechada A	Resistencia Compresión Lechada B
Resistencia @ 12:00	758 Psi	813 Psi
Resistencia @ 24:00	1512 Psi	1500 Psi

Fuente: Los Autores.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

DISCUSIÓN

A continuación se comparan los resultados obtenidos para las dos lechadas de cemento, analizando cada propiedad mecánica determinada en el laboratorio de rocas del ICP.

- Resistencia a la compresión. La Tabla 22 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia a la compresión para la tecnología A y B con sus respectivas unidades de medida. Se puede ver que las dos tecnologías cumplen con el requerimiento de una resistencia a la compresión mayor a 2200 Psi. Sin embargo la tecnología que presenta una ventaja con respecto a la otra es el cemento B ya que al tener una mayor resistencia soportara mayores esfuerzos en fondo.
- Resistencia tensil. La Tabla 23 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia tensil para la tecnología A y B con sus respectivas unidades de medida. Se puede ver que las dos tecnologías cumplen con el requerimiento de una resistencia tensil mayor a 360 Psi. Sin embargo la tecnología que presenta una ventaja con respecto a la otra es el cemento B ya que al tener una mayor resistencia tensil soportara mayores esfuerzos de tensión producto del peso del casing en fondo.
- Módulo de Young. La Tabla 24 muestra los resultados obtenidos en la evaluación del módulo de Young para la tecnología A y B con sus respectivas unidades de medida. Se puede ver que con respecto a la tecnología A se excede un poco del rango establecido de 0.8 E+6, mientras que la tecnología B se ajusta perfectamente a este requerimiento. Este resultado garantiza que la tecnología B, pueda comportarse de buena manera ante las expansiones generadas por los procesos de recuperación térmica. Entre menor sea este módulo mejor flexibilidad en el cemento se tendrá una vez fraguado.
- Razón de Poisson. La Tabla 25 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de la razón de Poisson para la tecnología A y B. Se puede ver que las dos tecnologías cumplen con el requerimiento establecido en los rangos (> 0.15). Sin embargo la tecnología B presenta una pequeña ventaja con respecto a la tecnología A, ya que al presentar un valor mayor en esta propiedad es un indicativo de que este cemento se deforma más fácilmente de forma radial cuando se aplica un esfuerzo. Si el esfuerzo que se genera axialmente no se refleja en una deformación radial, es un indicativo de que el cemento pueda tener problemas por fracturamiento o agrietamiento interno, ya que la razón de Poisson es en cierto modo un indicativo de flexibilidad.

Tabla 22. Comparación de resultados de resistencia a la compresión.

Propiedad	Unidad	Lechada A	Lechada B
Resistencia a la compresión	psi	3281	4200

Fuente: Los Autores.

Tabla 23. Comparación de resultados de resistencia tensil.

Propiedad	Unidad	Lechada A	Lechada B
Resistencia tensil	psi	490.6	580

Fuente: Los Autores.

Tabla 24. Comparación de resultados Módulo de Young.

Propiedad	Unidad	Lechada A	Lechada B
Módulo de Young	psi	0.842 E + 6	0.6966

Fuente: Los Autores.

Tabla 25. Comparación de resultados Razón de Poisson.

Propiedad	Unidad	Lechada A	Lechada B
Razón de Poisson	Adimensional	0.15	0.17

Fuente: Los Autores.

CONCLUSIONES

Se evaluaron a nivel de laboratorio dos diseños de lechadas de cemento con distintas tecnologías para sistemas de recuperación térmica en el Campo Chichimene.

Se establecieron rangos de diseño para el proyecto teniendo en cuenta las condiciones de un pozo real perforado en el campo, al igual que los estándares de calidad exigidos por Ecopetrol S.A para este tipo de proyectos, tanto para propiedades API como para propiedades mecánicas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, **la tecnología B** es la que mejor se ajusta a los requerimientos para el proyecto, por lo tanto, es la recomendada para su uso en la cementación de los pozos de éste u otro campo, que tengan condiciones similares al pozo escogido para establecer los rangos de propiedades.

Los resultados obtenidos demuestran que el sometimiento de las muestras de cemento a la temperatura alcanzada en el proceso de combustión in situ (500 °F), afecta las propiedades mecánicas de los cementos, generando que algunas de éstas se salgan de los requerimientos para el proyecto.

En la evaluación llevada a cabo no se tuvo en cuenta la resistencia de los cementos a los gases de combustión, por lo tanto, la lechada

escogida como la más apropiada para el proyecto, únicamente garantizaría la integridad del pozo en cuanto a resistencia a la temperatura.

Todas las tecnologías evaluadas, garantizan un mayor rendimiento en el pozo para sistemas de recuperación térmica, que un cemento portland convencional. ya que las propiedades mecánicas se comportan mejor aun cuando son sometidas a altas temperaturas.

Cementos con mayores reologías pueden causar daño en los equipos de cementación, sin embargo según las propiedades API todas las tecnologías se ajustan a los rangos permitidos.

RECOMENDACIONES

Asegurar que las propiedades a evaluar sean igual a las condiciones a las cuales estará sometido el cemento en el proceso de cementación real. De ésta manera los resultados obtenidos serán más representativos y se simulara el comportamiento que tendrá el cemento en el proceso de cementación real.

Evaluar los cementos de acuerdo a estándares aceptados internacionalmente, teniendo en cuenta además, que las condiciones de evaluación deben ser iguales para todas las tecnologías a evaluar, de manera que se pueda hacer una comparación confiable.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CEMENTACIÓN DE POZOS

Asegurar que al momento de preparar las lechadas, sea utilizado el mismo lote de cemento para la determinar todas las propiedades de la misma tecnología, ya que las propiedades varían de lote a lote.

Garantizar la homogeneidad en el momento de fabricar los cilindros con el fin de que las propiedades mecánicas tengan resultados más confiables y no se presentan alguna variación de cilindro a cilindro.

Llevar a cabo el curado de los cementos en una cámara presurizada ya que está demost-

do que la presión afecta los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas.

Someter las muestras de cemento fraguado a los ambientes corrosivos generados por los gases de combustión, con las concentraciones estimadas y a condiciones de presión y temperatura en fondo alcanzados en la combustión in situ.

Seleccionar la lechada de cemento B, para cementar pozos de las mismas condiciones, ya que por los resultados obtenidos de propiedades API y mecánicas, sería la lechada que mejor se comportaría en fondo.

REFERENCIAS

- Altuna, G. (2001) Variation of the mechanical properties of well cementing slurries with different compositions. SPE paper 69616, p. 2.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010) 10A Specification for Cements and Materials for Well Cementing. Washington D.C: API, Edición 24, Diciembre 1. p. 3-6.
- Banthia, N. (2003) Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Compositions. Cement & Concrete Composites. No. 1, 3-9.
- Beer, P. & Johnston, R. (2007) Mecánica de materiales. Cuarta edición. México: Mc Graw Hill. p. 5
- Crook, R. (2006) Cementing. En: Petroleum Engineering Handbook, LAKE, Larry W. Richardson, TX: SPE, Volumen II, p. 391. Modificado autores.
- Gibson, S. (2011) Novel solution to cement strength retrogression. Paper SPE/IADC 138852. p. 1.
- Goodwin, K. & Crook, R. (1992) Cement Sheath Stress Failure. Paper SPE 20453. P. 6.
- Handin, J. (1965) Strength of Oil Well Cements at Downhole Pressure-Temperature Conditions. Paper SPE 1300 p. 7.
- Hernandez, R., Berard, B & Nguyen, H. (2009) Foamed Calcium Aluminate Phosphate Cement Enables Drilling and Cementation of California Geothermal Wells. SPE paper 120845. p. 1.
- Iverson, B., Ddarbe, R. & Mc Mechan, D. (2008) Evaluation of mechanical properties for cements. Paper ARMA 08-293. p. 1.
- Lledó, P. (2007) Valor Actual Neto. +C más consulting. p. 2. Disponible en: <http://www.masconsulting.com.ar/anterior/Documentos/a%20articulos%20pdf/03-07-12%20Valor%20Actual%20Neto%20-%20Lledo.pdf>
- Montiel, A. & Montiel, E. (2002) El ABC de las cementaciones y estimulaciones en México. México. p. 1.
- Nelson, Amsterdam, the Netherlands, Elsevier 1990, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4.
- Nelson, E. & Guillot, D. (2006) Well cementing. Sugar Land, Texas: Schlumberger. Segunda edición. p. 25.
- Smith, D. (1990) Cementing. Richardson, TX: SPE. Segunda edición. p. 145.