

Diseño de lechadas livianas de cemento para pozos geotérmicos

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Diseño de lechadas livianas de cemento para pozos geotérmicos

Llevado a cabo por el estudiante:

Lobo Ramírez Marco Aurelio

Carné: 8502961

Proyecto de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el jueves 01 de junio de 2023 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

GUSTAVO
ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA)

Firmado digitalmente por
GUSTAVO ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA)
Fecha: 2023.06.02
15:43:36 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya, MSc.
Rep/Director de la Escuela

ROMMEL LEZING
CUEVAS
KAUFFMANN
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
ROMMEL LEZING CUEVAS
KAUFFMANN (FIRMA)
Fecha: 2023.06.01 11:57:36
-06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann
Profesor Guía

WILLIAM
ALONSO POVEDA
MONTROYA
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por WILLIAM ALONSO
POVEDA MONTROYA
(FIRMA)
Fecha: 2023.06.01
20:45:56 -06'00'

Ing. Alonso Poveda Montoya, MSc
Profesor Lector

MILTON ANTONIO
SANDOVAL
QUIROS (FIRMA)

Firmado digitalmente por
MILTON ANTONIO
SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2023.06.01 11:46:41
-06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Observador

Abstract

Geothermal wells in Costa Rica are between 2000 m and 3500 m deep and serve to drive through pipes of different diameters, from the bottom to the surface, biphasic type flow (Steam-water) or only steam with temperatures above 200 °C, which are then derived through surface pipes to the powerhouse area, where they move a turbine for the generation of electricity. The purpose of these wells is the production of steam and condensate to produce geothermal energy, which considers a production temperature of these higher than 200 °C.

The wells are built in stages, and these are lined with steel pipes, which are distributed as follows.

Pipe of 473 mm from 0 to 350 m, in hole of 609 mm cemented in its annular space between pipe and formation.

Pipe of 340 mm from 900 m to surface, in hole of 444 mm, and cemented to surface in the annular space between pipe formation and pipes.

Its function is to avoid contamination of reservoir water with surface aquifers, conduct the flow to steam pipes and withstand the loads of safety valves, while drilling and producing valves completed the well.

The pipes in production areas are hung from the 340 mm pipe.

The cementing of these wells must ensure a useful life of the well, at least 20 years. However, in the geothermal fields of Costa Rica, the cement columns and density used tend to fracture the formation, which creates problems with the finish and quality of the cementation when the mixture reaches the surface.

Resumen

Los pozos geotérmicos en Costa Rica tienen entre los 2000 m y 3500 m de profundidad y se utilizan para conducir vapor o flujo bifásico (agua-vapor) a través de tuberías de diferentes diámetros, desde el fondo hasta la superficie, fluidos con temperaturas superiores a los 200 °C, que después se derivan por medio de tuberías superficiales hasta la zona de casa de máquinas, donde mueven una turbina para la generación de energía eléctrica. La finalidad de estos pozos es la producción de vapor y condensado para producir energía geotérmica, lo que considera una temperatura de producción de estos superior a los 200 °C.

Los pozos se construyen por etapas y estas son revestidas con tuberías de acero, que se distribuyen de la siguiente forma:

Tubería de 473 mm desde 0 hasta 350 m, en agujero de 609 mm cementada en su espacio anular entre tubería y formación.

Tubería de 340 mm desde 900 m hasta superficie, en agujero de 444 mm y cementada hasta superficie en el espacio anular entre tubería formación y tuberías.

Su función consiste en evitar contaminación del agua de yacimiento con acuíferos superficiales, conducir el flujo a las tuberías de vapor y soportar las cargas de las válvulas de seguridad mientras se perfora y válvulas productoras finalizado el pozo.

Las tuberías en zonas de producción quedan colgadas a partir de la tubería de 340 mm.

La cementación de estos pozos debe asegurar una vida útil de pozo, por lo menos de 20 años. Sin embargo, en los campos geotérmicos de Costa Rica, las columnas de cemento y densidad utilizada tienden a fracturar la formación, lo que genera problemas con el acabado y calidad de la

For this reason, a mixture with a light characteristic is used to reach the surface with cement; however, due to the type of additives used, such as bentonite, which serves as an extender, it tends to contaminate the grout, helping with the non-separation, but negatively affecting, the physical and mechanical characteristics of the mixture, not complying with the minimum necessary requirements.

Due to the above, and as an improvement option for the cementing process of geothermal wells, a study is carried out, using a combination of additives, which help us improve the quality of the mixture and the mechanical conditions of it, so a lightweight mixture design will be carried out, which is within the design parameters according to current standards such as API 10 A and 10B as well as ISO 10426.

According to the results obtained, it is possible to design a slurry with acceptable mechanical characteristics for use as a low-density (light) slurry with densities between 1.62 gr/cm^3 to 1.68 gr/cm^3 , reaching compressive strengths higher than those 10 MPa, between 24 and 36 hours of forging at room temperature, these conditions allow drilling operations to continue without the need to wait for long periods of time.

During the test, different types of problems arose, which caused very scattered results on some occasions, however, the compression characteristics are accepted.

According to the process developed, it is concluded that bentonite as an extender directly affects the compressive strength of the cement, it is also required to have equipment and curing areas according to the process that is carried out, such as low temperature and pressure as well as a high temperature. pressure and temperature, adding, the taking of samples during the cementation process to give traceability to the quality of the cementation.

cementación al llegar con la mezcla hasta la superficie.

Es por esto, que se utiliza una mezcla de característica liviana, para llegar con cemento a superficie, sin embargo, por el tipo de aditivos que se utilizan, como el caso de la bentonita, que sirve como extendedor, tiende a contaminar la lechada ayudando con la no separación, pero afectando negativamente, las características físicas y mecánicas de la mezcla, no cumpliendo con los requerimientos mínimos necesarios.

Lo anterior provoca que se tengan problemas de expansión térmica, colapsos y problemas de calidad en la parte mecánica del pozo.

Debido a lo anterior y como opción de mejora para el proceso de cementación de pozos geotérmicos se realiza un estudio, utilizando una combinación de aditivos que ayuden a mejorar la calidad de la mezcla y sus condiciones mecánicas. Por lo tanto, se realizó un diseño de mezcla de característica liviana, que esté entre los parámetros de diseño según las normas vigentes como API 10 A y 10B, así como ISO 10426.

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron, se logra diseñar una lechada de características mecánicas aceptables para el uso como lechada de baja densidad (liviana) con densidades entre 1.62 gr/cm^3 a 1.68 gr/cm^3 , que alcanza resistencias a la compresión superiores a los 10 MPa, entre las 24 y 36 horas de fragua a temperatura ambiente. Estas condiciones permiten continuar con las operaciones de perforación, sin la necesidad de esperar lapsos prolongados.

Diseño de lechadas livianas de cemento para pozos geotérmicos

MARCO AURELIO LOBO RAMÍREZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio de 2023

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	2
Resumen ejecutivo.....	3
Introducción	8
Metodología	22
Resultados.....	43
Análisis de los resultados.....	60
Conclusiones y recomendaciones	65
Apéndices	72
Anexos.....	77

Prefacio

Los campos geotérmicos en Costa Rica son proyectos de extracción de vapor por medio de pozos con profundidades verticales hasta 3000 m y con profundidades desviados hasta 2700 m con un desplazamiento horizontal de aproximadamente 1000 m.

Estos pozos tienen un acabado mecánico de cuatro secciones de diferente diámetro y dos de estas son cementadas. Su objetivo es evitar la contaminación de los acuíferos superficiales y transportar el vapor hasta la turbina para generar energía eléctrica.

Entre los objetivos de las cementaciones se encuentra mantener el sello, la adherencia, durabilidad y las condiciones seguras de pozo por más de 20 años.

Las tuberías se cementan desde el fondo hasta la superficie, con columnas de cemento hasta de 950 m de altura, y de acuerdo con la densidad que utiliza la presión ejercida puede romper la formación. Esto provoca problemas en los procesos de cementación.

Es por esto por lo que para bajar la carga hidrostática por peso de columna se usaron lechadas de baja densidad. Sin embargo, de acuerdo con los análisis realizados, el uso de bentonita como extendedor ha provocado una baja en la resistencia a la compresión, lo que reduce los efectos de adherencia y, por ende, aumenta la expansión térmica de la tubería presentándose, en algunas ocasiones, canalizaciones de la cementación.

Por esto, para el presente proyecto se propone diseñar una lechada que ayude a mejorar las características de compresión y reduzca los efectos mencionados. Lo anterior al mantener los controles de calidad según las normas API 10 A y B, así como la ISO 10426-2.

Para ello, se trató de localizar aditivos en el mercado nacional e internacional, con el fin de tener un valor comparativo, tanto en precio como accesibilidad.

Para ello, se trató de localizar aditivos en el mercado nacional e internacional, con el fin de tener un valor comparativo, tanto en precio como accesibilidad. Sin embargo, en el ámbito nacional, los aditivos no son recomendables para utilizarse en pozos profundos, por lo que se busca gestionar con los fabricantes de aditivos nacionales, si es posible tenerlos o modificarlos, sin necesidad de tenerlos en bodega por mucho tiempo.

Para los aditivos hechos para pozos petroleros se ha trabajado con marcas como Halliburton y Baker Hughes, los cuales, tienen certificación API y experiencia en el uso de aditivos para cementación de pozos profundos.

Una de las condiciones particulares que se presentó durante el desarrollo de este proyecto fue que estaba en trámite una licitación de compra de aditivos para cementación de pozos, por medio de licitación pública internacional y una de las condiciones del cartel consistía en solicitarle a cada proveedor muestras de los aditivos que ofrecen, para realizar las pruebas correspondientes. Por este motivo, se imposibilitó solicitar muestras a los posibles proveedores, debido a que, por consideraciones internas, no se permite adelantar el envío de las muestras mientras estuviera en proceso la confección de la licitación, por lo que el proyecto se realiza con aditivos que se tenían en el sitio.

El proceso solo se desarrolla con cementos hidráulicos tipo G, H y K (mezclado con 35 % de sílica) tipo API y aditivos para cementación de pozos profundos.

Agradezco a Dios, por darme la oportunidad de concluir con este trabajo una etapa de mi carrera que por años quise culminar. A mi familia, esposa e hijas, por el apoyo dado durante todo el proceso de la licenciatura. A todo el personal y profesores de la Escuela de Ingeniería en Construcción, por todo el apoyo y conocimiento transmitido, así como a los ingenieros Mario Solano y Federico Nietzen, por permitirme realizar este proyecto que genera un aporte importante para el proceso de cementación de pozos geotérmicos, así como para el Instituto Costarricense de Electricidad.

Resumen ejecutivo

El proceso de perforación de pozos geotérmicos lo realiza el Instituto Costarricense de Electricidad. Esta empresa cuenta con tres equipos de perforación profunda y dos unidades de cementación de pozos con capacidad de presión de 1034 kg/cm² (15 000 psi) y 50 l/s.

La compañía inició con la perforación de pozos para el desarrollo de la energía geotérmica durante los años 1970 y 1980, cuando se realizaron los primeros pozos verticales. Estos fueron perforados y cementados por compañías internacionales, lo que da lugar a los estudios de prefactibilidad del campo geotérmico Alfredo Mainieri Protti (Miravalles). Una vez concluido este estudio inicia la etapa de desarrollo a partir del año 1992, proceso que se realiza a través de las empresas Nabor Lofflan y Halliburton, cuando se perforan los primeros pozos de desarrollo, utilizando para las cementaciones materiales de la empresa Halliburton y bajo la norma establecida API 10 A y B.

Para el año 1997 y 1998, el ICE adquiere la primera perforadora y unidad de cementación, así como el primer equipo de laboratorio de cementaciones tipo petrolero como:

- a. **Unidad ultrasónica de cemento (UCA)**, para el control de la compresión en condiciones de pozo.
- b. **Consistómetro atmosférico**, que lleva las condiciones de la mezcla a parámetros de pozo, como temperatura.
- c. **Consistómetro presurizado**, que se utiliza para calcular el tiempo bombeable, el cual es el tiempo necesario para mezclar y bombear la lechada.
- d. **Prensa filtro** alta presión y temperatura, la que ayuda para regular el control de pérdida de agua de la mezcla por presión hidrostática.
- e. **Reómetro**, ayuda a determinar las condiciones mecánicas de flujo, tanto laminar, turbulento o tipo tapón.
- f. Posteriormente, con los años se compró el **Equipo de pruebas destructivas de cubos** para realizar los cálculos de los tiempos de compresión a diferentes días y compararlos con las pruebas no destructivas de la unidad UCA.

Los pozos geotérmicos cuentan con un esquema constructivo de cuatro etapas, dos de ellas cementadas. La primera etapa en agujero de 609 mm hasta los 350 m, encamisada con tubería de 473 mm, desde el fondo hasta superficie y cementado el espacio anular entre la tubería y formación, desde el fondo hasta la superficie. La segunda etapa se perfora en 444 mm desde los 350 m hasta los 950 m y se encamisa con tubo de acero de 340 mm, desde el fondo hasta la superficie, se cubre la zona entre tuberías y se cementa el espacio anular entre tubería y formación y entre tuberías.

El objetivo de estas cementaciones es aislar las zonas de producción de vapor de los acuíferos someros, para evitar contaminación, soportar la tubería, conducir el fluido de producción, desde el pozo hasta la casa de máquinas y darle una buena adherencia, además de evitar flujo de fluido descontrolado hasta la superficie, entre otros.

Debido a que las otras etapas no se cementan, se comentará en otro trabajo.

Una de las condiciones de la cementación de pozos es realizar estas en una sola operación, pero por la capacidad de soporte de la formación al tener una carga hidrostática excesiva, se rompe y entra en proceso de pérdida de circulación. Esto provoca detener la operación y desplazar la lechada y después bajar con líneas de menor diámetro por dentro del espacio anular a tocar la cima de la cementación.

Este proceso puede tomar varios días para finalizar la cementación y, si no se tiene cuidado, se tiende a dejar bolsas de fluido que no lograron desplazar. Esto provoca una posible causa de colapso (cierre interno de tubería) por expansión de la burbuja de agua o lodo por temperatura y se tiene que regresar con el equipo de perforación a reparar la zona del problema.

Es por eso por lo que se introdujo la lechada liviana, utilizando para esto aditivos reductores de densidad, como la esferilita (esferas huecas), lo que permite bajar entre un 10 % al 15 % la densidad de la mezcla que se utiliza. Una de las condiciones dadas por parte del fabricante para su uso fue que tiene que utilizarse junto con otro aditivo tipo extendedor, en este caso, bentonita prehidratada, lo que no permite que, por las condiciones de mezcla, se presentó sedimentación o separación de aditivos.

Sin embargo, al utilizar la bentonita (arcilla deshidratada) crea contaminación en la mezcla y causa un efecto secundario adverso, como la reducción de la resistencia a la compresión, aunque al emplear las esferas por su condición de agregado sólido se debe tener un incremento en la capacidad resistente.

Con los años se ha mantenido este diseño, se utilizó en cementaciones completas de pozo, en ocasiones alternando lechada convencional de 1,87 gr/cm³ con 1,56 gr/cm³. A pesar de que se lograban los objetivos de la operación, se comenzó a tener problemas de expansión térmica por baja adherencia y, en algunos, canalizaciones y salidas de vapor, por lo que esta lechada se utilizó para cementar solo un tramo entre tubería y formación. No se dejó de utilizar la bentonita por problemas de separación de mezcla.

Por este motivo, para este proyecto se planteó el diseño de una lechada liviana con

mejores características mecánicas como resistencia a la compresión y adherencia. Se eliminó por completo el uso de bentonita y se balanceó la densidad, de tal forma que no se presentara separación de los componentes de la mezcla.

La primera lechada liviana que se utilizó era con productos Halliburton, que correspondía a cemento hidráulico tipo G, harina sílica, reductor de filtrado y fricción. Así como la esferilita, la bentonita, por ser un aditivo que se usa para la perforación, es provista por el ICE.

Tabla 1 Mezcla liviana que se utiliza antes de realizar el proyecto.

MATERIAL	%	W (kg)	V.abs (L/kg)	V (L)	Agua (L)
Cemento H	100,00	50,00	0,32	15,93	34,72
Harina Sílica	35,00	17,50	0,38	6,65	7,16
Halad 23	0,80	0,40	0,00	0,00	
CFR-6	0,40	0,20	0,00	0,00	Densidad. kg/L
Esferilita	15,00	7,50	1,44	10,77	1,57
Bentonita	2,00	1,00	0,38	0,38	

En las pruebas de ensayos no destructivos de resistencia a la compresión, como la realizada con la unidad de análisis ultrasónico de cemento, se puede observar que la misma mezcla, incluso a temperaturas de fondo de pozo, tardaba hasta tres días en fraguar y la presión de trabajo de resistencia a la compresión se mantenía por debajo de los 48,27 kg/cm² (700 psi). Esto generaba tiempos de espera prolongados, así como adherencias de baja capacidad.

Por esto, para el control de calidad de las lechadas de cemento hidráulico es necesario bajar o reemplazar el uso de los aditivos como bentonita para mejorar la resistencia a la compresión a corto plazo, así como la adherencia con una densidad similar, pero que no se sedimente.

Por lo tanto, se propone, como proyecto, el diseño de una lechada con aditivos diferentes a los que se utilizan originalmente, para cumplir con los objetivos propuestos de este proyecto.

Para este caso se utilizaron dos tipos de pruebas de compresión, como la no destructiva por medio de la unidad (UCA). Antes de esta, se preparó las muestras y se obtuvieron las combinaciones necesarias de aditivos, para que las pruebas de filtrado, reología, agua libre, tiempo bombeable y sedimentación estuvieran entre los parámetros de operación aceptables de la lechada. Al contar con estos datos, se realizó la prueba no destructiva simulando las características de fondo de pozo, tanto en presión como temperatura y la destructiva a través del uso de cubos. Esta consiste en el mezclado de los aditivos y cemento hidráulico y se chorrean en moldes de 5 cm x 5 cm, según lo indica la norma ISO 10426, manteniendo condiciones atmosféricas de 28 °C y 60 °C a presión atmosférica.

Otras pruebas realizadas son:

1. Agua libre.
2. Reología
3. Filtrado
4. Tiempo bombeable

Todas de acuerdo con las normas API 10 A y B, así como la norma ISO 10426.

Estas pruebas representan una parte muy importante para el proceso, debido a que ayudan a evitar deshidratación de la lechada, fraguando durante la operación, agua en la parte superficial cuando se encuentre en espera de fragua, comportamiento del tiempo de fragua, así como la capacidad de desplazar y homogeneizar la colocación de la muestra en el espacio anular.

A pesar de que los aditivos cuentan con sus porcentajes de uso, de acuerdo con la temperatura y densidad de la mezcla, las pruebas se realizaron para corroborar el efecto de estos en los resultados y ajustarlos a los parámetros óptimos necesarios. Todos juntos tienen una función en la lechada, por eso, al principio se solicitó a la empresa que vende los aditivos, preparar una mezcla base que cumpliera con el cemento hidráulico utilizado. Una vez que se obtuvieron, se trabajó variando su cantidad y se ajustaron las características de la lechada. Esta misma se utilizó para la lechada convencional de 1.87 gr/cm³, sin embargo, esta no tiene las propiedades de una lechada liviana.

Por ende, con la ayuda del equipo de laboratorio se realizaron diferentes combinaciones de porcentajes de aditivos hasta encontrar la relación que ayudara con la reducción de la densidad, alcanzando 1,60 gr/cm³, con el uso de la esferilita al 15 % y sin bentonita. Esto se considera como punto de partida para comenzar con las pruebas.

Al principio todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de cementos, tanto las no destructivas como las destructivas, hasta que la máquina de fallo de cubos entró en fallo electrónico. Por este motivo, se hizo el traslado a una zona cerca de un laboratorio de cementos de concreto del ICE en Pailas, donde se llevó a cabo la preparación de las mezclas, curado y fallado de estas.

Una vez realizadas las mezclas, se prepararon 15 unidades de cubos de 5 cm x 5 cm de lado. Se preparó esta cantidad de cubos, debido a que era la máxima cantidad de moldes con que se contaba y para la norma de fallo de concreto se estima como mínimo una cantidad de 15 cilindros. Aunque en este caso era lechada, para evitar problemas en dispersión de resultados y contar con una mayor cantidad de datos, se utilizaron estos cinco moldes de tres cubos cada uno. Para tener una cantidad de muestras idónea y que fuera representativa para el análisis estadístico de la media y verificar que los resultados estuvieran dentro del rango necesario, al principio, se realizan con tres cubos por muestra, sin embargo, eran muy pocas muestras para determinar un análisis objetivo del estudio.

Es por eso por lo que se proponen los siguientes objetivos específicos para este trabajo:

- Determinar el cumplimiento de las condiciones necesarias para el diseño de mezcla de lechadas de los aditivos, tanto nacionales como internacionales.
- Establecer los porcentajes adecuados de los aditivos por utilizarse antes de que se proceda con las pruebas no destructivas.
- Diseñar la mezcla de la lechada para que posteriormente se compruebe la resistencia de diseño.

- Evaluar el comportamiento a la compresión y densidad de las pruebas destructivas y no destructivas diseñadas mediante un análisis estadístico.

Con este proceso se pretendió evaluar la calidad de las mezclas de diseño al utilizar el aditivo para lechadas livianas como la esferilita. Para esto se varió su porcentaje entre el 10 y 15 %, con lo que se lograron densidades entre los $1,62 \text{ gr/cm}^3$ y $1,74 \text{ gr/cm}^3$ y se obtuvo resistencia a la compresión de $34,4 \text{ kg/cm}^2$ entre las 24 y 36 horas, con temperaturas de superficie de $26 \text{ }^\circ\text{C}$ y resistencia a la compresión de $34,4 \text{ kg/cm}^2$ en menos de 24 horas a temperaturas de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Lo anterior en muestras colocadas en un recipiente con temperaturas controladas y otro en condiciones de temperatura de agua termal cerca de los $63 \text{ }^\circ\text{C}$, presión atmosférica.

Este tipo de proceso se realizó porque la temperatura en una columna de pozo no es constante, rigiéndose bajo un gradiente térmico anormal, el cual puede ser de $0,26 \text{ }^\circ\text{C}$ por metro de profundidad.

Las muestras se simularon también en condiciones de pozo y en la que los resultados de resistencia a la compresión eran más aceptables en corto plazo que con la mezcla original con el uso de la bentonita como extendedor.

En el análisis estadístico Anova y Manova se demuestra una discrepancia en la resistencia a la compresión al llegar al valor mínimo determinado por la API, al tener condiciones de temperatura y presión de toda la columna de pozo.

Esto generó datos importantes que requieren dar un seguimiento, no solo para los diseños realizados en laboratorio, sino para los procesos ejecutados en las operaciones de cementación en el pozo. Tanto así, que es muy importante valorar el tiempo de fragua de la lechada y esperar después de que finalice la última operación de cementación, cumpliendo con el objetivo de llenado hasta superficie, para luego continuar con las maniobras de pozo. Esto hará que la adherencia y resistencia a compresión sean las adecuadas para no tener

problemas de expansión térmica y canalización por microfisuras, al tener movimientos de contracción en la tubería.

Los aditivos analizados fueron los de la compañía Baker Hughes y Halliburton. No se analizaron aditivos en el ámbito nacional porque no se tienen para condiciones de pozo en cuanto a presión y temperatura.

En cuanto a los aditivos internacionales, por razones de estar en proceso de licitación para compra de aditivos, no se podía adelantar la solicitud de una muestra de estos, ya que se alteraba la transparencia en la competitividad de las compañías que podían ofertar.

Para el tipo de cemento hidráulico que se utiliza en yacimientos petroleros y geotérmicos, por sus condiciones de temperatura y presión, en la norma API 10 A y B por sus características de molienda, se especifican el tipo G y el H como los que más se emplean en la rama de perforación de pozos profundos y a los que se les agrega arena sílice hasta un máximo de 40 % por relación de peso de cemento hidráulico, para mejorar su resistencia a la compresión y ataque a los sulfatos a temperaturas y presiones de producción de pozo. Sin embargo, la compañía alemana Dickerford patentó y certificó el cemento hidráulico tipo K, que es un cemento hidráulico que viene mezclado previamente con un 35 % de sílice, lo que simplifica la mezcla de los aditivos al preparar la mezcla en seco.

Por esto, el presente estudio es de mucho valor agregado para los procesos de cementación de pozos geotérmicos, al mejorar la vida útil de su operación.

Los aditivos como tal demuestran que son efectivos para este tipo de lechadas y que alcanzan condiciones de mezcla idóneas estando siempre en los parámetros establecidos por la norma.

Para tener datos comparativos de calidad, es importante realizar un muestreo de la mezcla que se prepara y bombea en el sitio. Lo anterior para llevar a cabo las pruebas no destructivas y destructivas y así cerrar el control de calidad de la lechada.

Para corroborar la calidad interna de la cementación, es necesario realizar registros de CBL (*cement bond log* por sus siglas en inglés). Estos permiten determinar las características internas de la calidad de la cementación, por lo que se pueden establecer los puntos de presencia de agua y problemas de adherencia entre tubería, cemento hidráulico y formación

Esta prueba, aunque no da un punto para corregir, puede ayudar a evitar un posible colapso de la tubería por problemas presentados durante el proceso de cementación.

Es importante destacar que la trazabilidad de los aditivos y control de calidad de estos es relevante, debido a que tienen un tiempo de vida útil. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas periódicas, tanto físicas en cuanto a pruebas de laboratorio como visuales de su estado en los envases que se utilizan.

Con este trabajo se evidenció que se pueden obtener mezclas de baja densidad con mayor resistencia a la compresión y sin presentar separación de la mezcla, sin utilizar bentonita prehidratada, en campos geotérmicos.

Para las pruebas de laboratorio es necesario contar con cámaras de curado que mantengan las mezclas bajo condición de presión y temperatura a lo largo de todo el proceso del diseño y aplicación de la mezcla en sitio.

Introducción

La propuesta del proyecto de graduación Diseño de lechadas livianas para pozos geotérmicos, plantea la necesidad de desarrollar mezclas de baja densidad. Lo anterior para mejorar la resistencia a la compresión y la capacidad de adherencia entre el cemento y la tubería de acero.

Los pozos de geotermia se construyen en dos etapas superficiales, una que va desde 0 m hasta 450 m, que se perfora en 609 mm y se encamisa en 473 mm, cementando el espacio anular entre estos desde los 450 m hasta superficie y después se continúa perforando en un diámetro menor que pasa a través de este en 444 mm hasta 950 m, encamisando desde 950 m

hasta superficie en 340 mm y cementando desde el fondo hasta superficie, dando lugar a la segunda etapa.

Estas dos cementaciones tienen como finalidad realizar un sello hermético entre el fondo y la superficie, para evitar que los acuíferos del fondo de pozo por su quimismo, diferente al superficial, entren en contacto con acuíferos someros.

Esto evita riesgos ambientales, así como mantener las tuberías en su lugar y por medio de la adherencia se evita la expansión térmica y la aparición de microfisuras, lo que podría en riesgo el estado mecánico del pozo.

Figura 1: Acabado de pozo geotérmico, fuente recursos geotérmicos

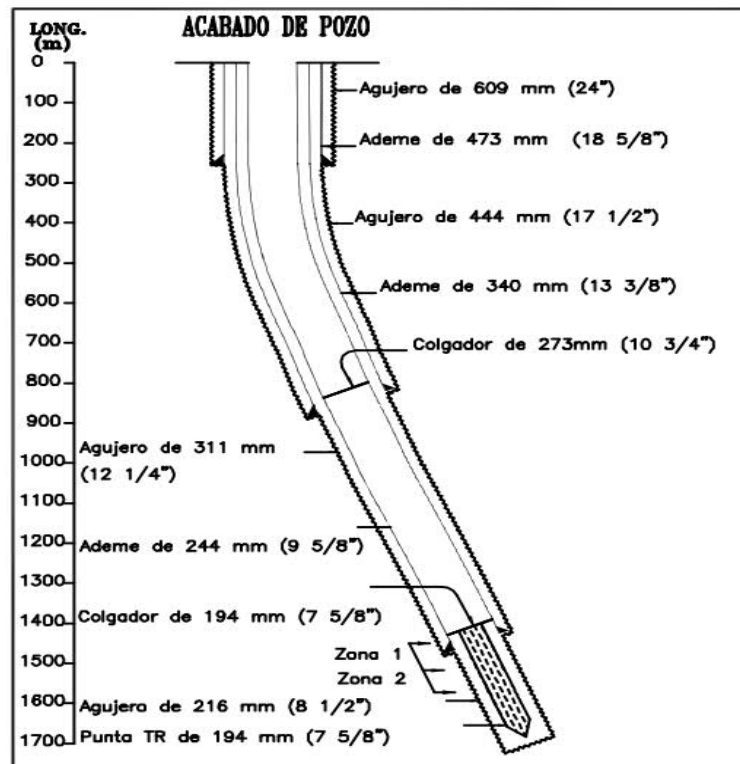
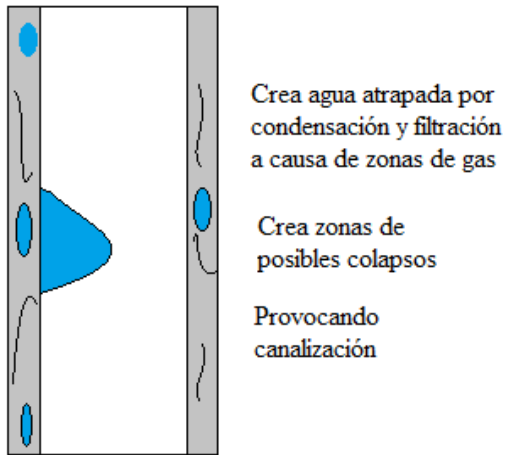


Figura 2. Formación de microfracturas

Formación de microfracturas



Otro de los objetivos de estas cementaciones es amarrar la tubería y permitir el paso de flujos geotérmicos a superficie para que, a través de turbinas de vapor, se genere energía eléctrica. Además, que en pozos de reinyección se permita el regreso de los fluidos geotérmicos al yacimiento.

Una de las características principales de la adherencia entre la tubería y la lechada, es evitar la expansión térmica y la creación de microfracturas por el efecto de la temperatura de producción, 240 °C aproximadamente. Esta condición debe prevalecer durante toda la vida útil del pozo.

El cemento hidráulico por sus características físicas de resistencia a la compresión tiene muy baja resistencia en tensión. Por lo tanto, se plantea este proyecto para reducir estos efectos de expansión térmica y microfracturas, así como mejorar las características de resistencia a la compresión de las lechadas livianas.

Durante muchos años, sobre todo en la tubería de producción (950 m a superficie), se utilizan dos tipos de lechada, una de cola o alta densidad 1,87 gr/cm³ y otra de 1,65 gr/cm³, con

resistencias a la compresión entre 206 kg/cm² y 103,5 kg/cm².

La diferencia entre la primera y la segunda de baja densidad es la de menor resistencia a la compresión de la segunda. Este tipo de lechada se utiliza por muchos años en los campos geotérmicos Miravalles, Pailas y Borinquen y su uso se relaciona porque, en primer lugar, la resistencia de la formación no soporta la capacidad de la columna hidrostática de la lechada y, en segundo lugar, se emplea para reducir la presión de la columna.

Sin embargo, para bajar la densidad de esta lechada es necesario utilizar un aditivo llamado esferilita, cuyas características principales, por ser una esfera hueca, permiten bajar la densidad. No obstante, por su composición, es necesario agregar más agua a la mezcla y al hacerlo presentaban problemas de separación entre cemento hidráulico y aditivos, lo que provocaba problemas mecánicos en la tubería del pozo.

Por lo tanto, para prevenir este problema se agrega otro aditivo llamado bentonita (arcilla en polvo) con un bajo porcentaje y que, por sus características químicas y físicas, reacciona con el cemento hidráulico y lo contamina, lo que produce una expansión en su volumen. Esto aumenta sus características reológicas y evita la separación de los aditivos, pero reduce la capacidad de compresión y, por ende, de adherencia en la mezcla obtenida.

Aunque se logra el objetivo de la mezcla, esta empezó a presentar problemas de adherencia entre tuberías. Además de incrementarse la expansión térmica por temperatura en algunos pozos, por lo que la mezcla se ha dejado de utilizar en la zona entre tuberías y se ha centrado su uso entre tubería y formación.

No obstante, esta condición no ha solucionado los problemas de rotura de formación por columna hidrostática. Por ende, se plantea la mejora en la aplicación de los aditivos, lo que optimiza las características físicas de la lechada, al bajar su densidad y que, a la vez, no afecta

directamente la resistencia a la compresión y adherencia.

En este trabajo se referencian documentos de investigación que se relacionan con el uso de lechadas livianas en cementación de pozos. Por ejemplo, el desarrollado por Gómez y Tarquino (2018) y Zaldivar (2017) en su tesis *Aplicación de cementos especiales en lechadas ligeras para evitar pérdida de circulación durante la cementación*.

En el documento de Gómez y Tarquino (2018) se realiza una investigación sobre diseño de lechadas livianas y como objetivo principal se pretende reducir los problemas de pérdida de circulación por exceso de presión hidrostática y alta resistencia a la compresión.

El primero es un diseño para pozos petroleros utilizando emulsificantes y, al ser cementos espumados, se requiere de equipo especial para la dosificación del aire o nitrógeno, con agua y un porcentaje de espumante, así como la densidad de diseño para una columna o presión de diseño, y para mantenerse estable y menos porosa la mezcla por expansión del gas, se requiere de una columna hidrostática sobre esta y una longitud mínima de colocación, no para toda la columna, aunque es un procedimiento para cementar con lechadas livianas, sus condiciones de operación, como temperatura, presión y profundidad son muy diferentes en la aplicación geotérmica, por lo que no se considera aplicable a geotermia.

Para el caso de lechadas ligeras (Zaldivar, 2017) se comenta acerca de uno de los aditivos como la esferilita y el uso de extendedores que afectan directamente la resistencia a la compresión reduciéndola, contrario con la esferilita que contribuye con la resistencia a la compresión. En ambos documentos el objetivo es el mismo, mantener adherencia, sellar y con una resistencia a la compresión entre los parámetros según la norma API. Sin embargo, estos tratan más sobre procesos de colocación que diseño de lechada, entre otros. No obstante, los dos se han enfocado en pozos petroleros cuya temperatura de producción es muy inferior a la geotérmica, así como las longitudes de la cementación también son menores, por lo que los problemas de

expansión térmica, adherencia y uso de aditivos varían muy significativamente en este aspecto.

En otro documento se analizan los problemas de deshidratación de las lechadas pesadas y su efecto directo con la carga hidrostática, por lo que si no se controla puede deshidratar la mezcla y afectar directamente la resistencia a la compresión y adherencia. Lo que se busca en este proyecto es reducir la carga hidrostática y la pérdida de agua por columna, mejorando la resistencia a la compresión. Además, analiza los problemas provocados por la porosidad y el efecto de deshidratación, del documento *Time-varying characteristics and mechanisms of hydrostatic pressure*.

El documento *Design of low-density cement optimized by cellulose-based fibre for oil and natural gas wells*, se refiere a las condiciones de baja presión en yacimientos petroleros y el trabajo lo relacionan con las lechadas livianas, el uso de esferas (esferilitas) y las características importantes de sello y resistencia a la compresión. Por lo tanto, se toma como referencia, aunque las temperaturas de trabajo sean menores y las presiones mayores y su enfoque se trabaja en bajar la densidad para reducir los riesgos de pérdida, pero mantener o mejorar el sello y los problemas de microfracturas, agregando fibras como aditivo, lo que hace más flexible la mezcla y más resistente.

En el caso del documento *Comprehensive review on the loss of wellbore integrity due to cement failure and available remedial methods*, el objetivo principal es mejorar las condiciones del cemento hidráulico y reducir los fallos y pérdida de integridad de la cementación, con el tiempo y ataque de los gases como CO₂ y H₂S. Esto también ayuda para tomar en cuenta no solo el factor densidad, compresión, tiempo y adherencia, sino aplicar mejoras en el comportamiento de la lechada con el tiempo.

La Geotermia en Costa Rica se comenzó a desarrollar a principios de los años 70, con el Instituto Costarricense de Electricidad. Los primeros resultados se obtuvieron de los estudios de prefactibilidad realizados en el primer campo propuesto para el desarrollo geotérmico, como lo fue el campo Miravalles. Se inicia con los primeros pozos para los estudios de factibilidad y

con los resultados se inició con la perforación de los pozos para el desarrollo y producción del primer campo geotérmico en Costa Rica, Campo Geotérmico Miravalle Dr. Alfredo Mainieri Protti.

El proceso de perforación de este campo comienza con la contratación de las compañías Nabor Loffland (perforación), Halliburton (cementación) y Air Drilling Services (bajo balance).

Durante la perforación de estos pozos en las maniobras de cementación el proceso tenía la particularidad de que presentaba muchas pérdidas de circulación, por ruptura de la formación al realizar la cementación de las tuberías de revestimiento en las primeras etapas superficiales. Esto provocaba problemas y pérdidas de tiempo, al llevar a cabo la completación principal de los pozos.

Por eso, por sugerencia de los ingenieros de la compañía Halliburton, se agrega un aditivo para reducir la densidad de mezcla y así tratar de evitar los problemas mencionados.

Este aditivo se llama microesferas o esferilita, por sus características mecánicas reduce la densidad hasta en $0,31 \text{ gr/cm}^3$ (2,58 lb/gal). Esto permite bajar la presión hidrostática de la columna en $0,03 \text{ kg/cm}^2$ por metro de columna ($0,43 \text{ psi/m}$), lo que ayuda a tener un poco más de margen al colocar columnas de 1000 m de lechada.

Entre los aditivos propuestos para bajar la densidad sin afectar la estabilidad de la lechada se sumó la bentonita, que cumple el papel de extendedor, logrando bajar su densidad, pero sin provocar problemas de separación o sedimentación de sus partes. Por lo tanto, la bentonita se prehidrataba con el agua necesaria para completar la cementación de toda la zona de importancia.

Durante este proceso y por la necesidad de trazar la calidad de mezcla o lechada, el ICE adquiere el equipo de laboratorio necesario para evaluar el diseño de las mezclas antes de mezclarlas y bombearlas al pozo. El equipo adquirido es el siguiente:

Unidad ultrasónica de cemento (ensayo no destructivo) permite calcular la resistencia a la

compresión de la lechada diseñada en condiciones de pozo.

Reómetro para corroborar las características de reología de la mezcla como viscosidad, geles, entre otros.

Prensa filtro de presión para determinar la pérdida de agua por presión en el tiempo.

Consistómetro atmosférico, permite llevar la muestra a condiciones de pozo (temperatura y presión) antes de realizar los análisis.

Consistómetro presurizado, da la posibilidad de calcular el tiempo bombeable de la lechada.

Agua libre, permite determinar el porcentaje de pérdida de agua hacia la parte superior de la columna, que para efectos de geotermia por la temperatura de trabajo $200 \text{ }^\circ\text{C}$ a $240 \text{ }^\circ\text{C}$, debe ser de 0 %, prueba de sedimentación, entre otros. El último equipo adquirido es el de ensayo de cubos (pruebas destructivas de cemento).

Junto con estos equipos de laboratorio, en 1997 se adquiere también una unidad de cementación, una perforadora y un equipo de bajo balance. Lo anterior para que el ICE pudiera perforar y realizar las maniobras de completación de pozo.

Desde ese entonces y hasta hoy, el ICE cuenta con dos unidades de cementación, tres equipos de perforación profunda, dos equipos de bajo balance y un equipo de laboratorio de lechadas de cemento, así como de lodos de perforación.

Con esto, la empresa ha mejorado y se ha actualizado. Además, entró en el proceso de certificación ISO 9001 y 14000.

Como la industria de cementación de pozos, tanto en geotermia como en petróleo ha mejorado y ampliado las funcionalidades y características de los aditivos, conforme han pasado los años se utilizan aditivos de diferentes compañías, pero sin combinarlos. Lo anterior se debe a que estos pueden presentar problemas de

incompatibilidad y provocar problemas en las condiciones mecánicas de la mezcla de cemento.

Para todos los procesos de cementación y por ser una rama de la perforación petrolera se utilizan como base las Normas API 10 A y B, así como la norma ISO 101426-1 y la ASTM C 150.

Durante todos los procesos siempre se utilizan las condiciones según la norma y por eso se comenzó por analizar el proceso y no utilizar el extendedor (bentonita) en las lechadas de cemento. Esto porque como parte del proceso por las condiciones de la bentonita altera la resistencia a la compresión a corto plazo.

Es por esto por lo que para este proyecto se propuso diseñar lechadas de cemento hidráulico livianas sin el uso de bentonita y con la aplicación de un antisedimentante. Lo que se busca es minimizar el efecto de sedimentación y separación de los aditivos, por el efecto de agua de mezcla y porcentaje de aditivo para reducir la densidad.

Al tener los aditivos en el laboratorio, se inicia con el proceso de diseño de estos para obtener una mezcla de condiciones similares, pero con una mayor resistencia a la compresión a corto plazo.

Por lo anterior, se inició con las pruebas no destructivas para obtener la mejor relación de aditivos y que también se mantuvieran los resultados de las demás pruebas según la norma. Al tener estos y considerar los parámetros, se toman de base para tener los valores iniciales.

Se realizan los diseños y preparativos de las mezclas, tanto a temperatura de 27 °C como 60 °C. Para llevar las muestras a esta temperatura y mantenerla hasta 72 horas se utilizan dos opciones. Al no tener cámara de curado se colocan en un recipiente que mantiene temperatura constante y en otra se colocan los moldes en una salida constante de agua de yacimiento a 63 °C.

Se realizaron dos tipos de diseños, uno comparativo con 10 % y 15 % de esferilita y 1 % de bentonita; otro con 10 % y 15 % de esferilita, sin bentonita. Todos los porcentajes con relación al peso de cemento hidráulico en seco.

Cabe mencionar, como se indicó al principio, que se contaba con la máquina de fallo de cubo. Sin embargo, esta presentó un fallo por daño en una tarjeta, lo que indujo a buscar en el ICE otro laboratorio y fue necesario trasladar la mezcladora y aditivos cerca del sitio, para estar cerca del laboratorio y tener fácil acceso.

Otro punto que extendió el tiempo de las pruebas fue que, al principio, por tener cinco moldes de tres cubos cada uno, se estaban fallando tres cubos por diseño, por lo que se tenían muy pocos parámetros comparativos. Por este motivo, se cambió a realizar 15 cubos por diseño por tiempo, total de 60 a 75 cubos.

Durante el diseño de la mezcla uno de los objetivos era seleccionar los aditivos por utilizar, analizarlos y realizar las pruebas de laboratorio, verificando que los resultados estuvieran entre los parámetros permitidos. Una vez con los aditivos, se realizan las mezclas y se inicia con el fallo de los cubos de acuerdo con la tabla de resultados.

En los resultados de prueba de resistencia a la compresión se logra obtener una densidad de 1.62 gr/cm³. No se aprecia sedimentación ni agua libre en las muestras. Al contar con los diseños se realizaron las mezclas para los diferentes tiempos de fragua y tipos de mezcla.

Es importante considerar que la temperatura de formación no es constante a lo largo de la profundidad del pozo, por tener un gradiente térmico anormal, por ser zona geotérmica. Este gradiente puede tener un rango de 0.25 °C/1 m, lo que causa que al colocar la mezcla de cemento hidráulico esta queda expuesta a variaciones de temperatura, iniciando con unos 240 °C en fondo de pozo hasta 20 °C cerca de la superficie.

Al bajar la tubería que quedará en el agujero esta tiene un peso máximo, el cual se mantiene y reduce de acuerdo con el procedimiento de cementación, manteniendo siempre una tensión remanente. Por lo tanto, es necesario considerar los tiempos de fragua y resistencia a la compresión mínimos de 34,5 kg/cm² (500 psi).

Una de las condiciones y resultados al realizar las pruebas fue que a temperatura de 27 °C la resistencia a la compresión de 34,5 kg/cm² se alcanza después de las 24 a 48 horas. Por lo tanto, se deduce que, si se utilizara este tipo de lechada para continuar con las operaciones de cementación, es recomendable esperar mínimo 48 horas.

Esto se debe a que, al tener la tubería a tensión esta se debe cortar, lo que provoca un proceso de contracción y el cemento tiene mínimo 3,45 MPa (34,5 bar) de resistencia a la compresión, lo que puede inducir a crear microfracturas y reducir la adherencia entre el tubo, cemento y formación. Lo anterior puede afectar la calidad de la cementación y el tiempo de vida de producción del pozo, sin presentarse problemas mecánicos.

Una de las condiciones encontradas en las pruebas es que la lechada con bentonita reduce su resistencia a la compresión no pasando de 48 bar (700 psi) en tres días, mientras que en la muestra que no se utiliza esta resistencia la adquiere entre 24 y 48 horas.

Palabras clave:

Cemento, resistencia, compresión, laboratorio, aditivos, adherencia, laboratorio, API.

Marco teórico

Cemento hidráulico tipo API

El cemento hidráulico como material de cementación de pozos, es uno de los más importantes en la calidad del acabado mecánico de los pozos. Por su composición, tiene, una nomenclatura diferente a la que comúnmente se utiliza, como es el Portland, que va desde el tipo I hasta el tipo VIII. Por las condiciones de temperatura, presión y ataque de sulfatos, se utilizan cementos tipo API, que van desde el tipo A hasta el tipo J. La variación de estos en cuanto a los Portland se relaciona con la combinación de los porcentajes de los minerales base, como: aluminato tetracalcio (C3A), silicato tricalcio (C3S), aluminoferrato de tetracalcio (C4AF) y silicato de dicalcio (C2S).

En la tabla 3, se mencionan los cementos según la norma API. Sin embargo, para los que se utilizan usualmente en el país, el que más se aproxima, por sus características de resistencia a los sulfatos, es el tipo VII y VIII, que puede ser un caso de estudio posterior. Por ello, si este, aunque no sea certificado API, puede cumplir con las condiciones requeridas en cuanto a tiempo de contacto a elevadas temperaturas y su posible degradación, también si existe la posibilidad de que las compañías productoras de cemento nacional puedan variar su molienda para producir la cantidad necesaria por año, de tal forma, de poder tener este con mayor accesibilidad.

El uso de estos tipos de cementos hidráulicos depende de la profundidad y tipo de yacimiento, como, aceite (gas, aceite y sulfuros) y geotermia (agua, vapor, temperatura y gases como CO₂ y sulfuros).

Es importante mencionar que el cemento hidráulico por utilizar para este proyecto es el mismo con que cuenta el Instituto Costarricense de Electricidad, correspondiente, a cemento hidráulico tipo G, mezclado con el 35 % de sílica, en sacos de 50 kg. Este es de tipo K y lo produce y patenta la empresa Dyckerhoff de Alemania. Anteriormente este cemento se compraba en tipo H y G y la sílica por separado y se mezclaban de forma manual en sitio, por lo que ahora se procesa en la planta de cemento y de manera mecanizada.

En algunas ocasiones se consultó a las empresas Cemex y Holcim la viabilidad de que ellos fabricaran este producto o lo importaran desde México donde lo producían. Sin embargo, por las bajas cantidades que se utilizan mensualmente, no resultaba rentable para las compañías, ya que este cemento no lo tienen en línea de producción en Costa Rica.

El cemento hidráulico (G, H y K) se utiliza para varios propósitos, como aislar zonas de acuíferos superficiales para que no se contamine con los acuíferos de producción de pozo, crear adherencia entre la tubería y el agujero, llenando el espacio anular entre estos con lechada evitando la expansión térmica por el efecto de temperatura y reduciendo los problemas por canalización y degradación, así como soportar las válvulas de seguridad durante la perforación y las válvulas de producción al finalizar.

Por la profundidad y presión de la columna de cemento hidráulico, es necesario utilizar algunos aditivos para mantener la lechada en condiciones operativas, como, por ejemplo, que no se deshidrate y que cumpla con los

requerimientos para las condiciones de diseño: resistencia a la compresión, tiempo de colocación, pérdida de agua y tiempo de fragua.

Además de aditivos adicionales como la arena sílica que ayuda a mejorar las condiciones de resistencia a la compresión y temperatura de la lechada y de los controladores de agua libre, pérdida de filtrado, reología, reductor de fricción y retardante siendo necesario utilizar los aditivos para bajar densidad como la esferilita. Esta última, por sus características, baja la densidad de la mezcla para evitar los riesgos de rotura de formación por presión hidrostática, pero tiene el particular efecto indirecto que baja la resistencia a la compresión, por lo cual es necesario el uso de un extendedor como la bentonita (arcilla en polvo), que evita que la mezcla tenga problemas de segregación y sedimentación.

Como se mencionó anteriormente, los aditivos que más se utilizan para estas mezclas son:

Antiespumantes, reductores de filtrado, controladores de agua libre, retardantes, acelerantes y reductores de fricción, estos ayudan de acuerdo con los porcentajes que se utilizan para obtener la mezcla de cemento con las características de diseño.

En el Instituto Costarricense de Electricidad, por las condiciones de fractura de la formación debido a la presión de la columna de lechada, ha diseñado dos tipos de lechada, una de $1,87 \text{ gr/cm}^3$ con una resistencia a la compresión aproximada de $20,7 \text{ MPa}$ (207 kg/cm^2) en 24 horas y otra liviana para compensar el efecto de la presión de $1,56 \text{ gr/cm}^3$ con una resistencia a la compresión de $10,3 \text{ MPa}$ (103 kg/cm^2). Ambas resistencias a la compresión se obtienen con equipos de ensayos no destructivos en un tiempo que oscila entre 8, 12, 18, 24, 36, 48 y 72 horas; inciso 2.2.1 frecuencia de muestreo, Norma API Rp 10B.

Para realizar esta mezcla es necesario utilizar un aditivo para bajar densidad y un extendedor (bentonita) para evitar la segregación o separación de los aditivos. Esto ocasiona que el efecto de la adherencia sea mucho menor, la posibilidad de tener microfracturas por expansión térmica sea mayor y que la columna de cemento

presente porosidad por el efecto de deshidratación de la bentonita con los años, presentándose problemas mecánicos de pozo en el futuro.

Por esta condición es que se planteó diseñar una lechada en la que se utilicen diferentes aditivos y que esta no pierda las condiciones de resistencia a la compresión y la adherencia con el acero.

Para esto se utilizan los equipos de laboratorio de cemento según Norma API 10 A y B, para el diseño de lechadas de cemento, ubicado en el plantel central del ICE en la ciudad de Guayabo, Bagaces, Guanacaste.

Con esto se espera generar una mejor condición del estado mecánico del pozo, reducir el tiempo de cementación y mejorar la calidad de adherencia entre el tubo y la lechada, así como la vida útil del pozo, riesgos futuros de colapso e intervenciones por reparación.

Normas aplicadas

ACI C 318 05S y ACI 214 RS 11.

Esta guía proporciona una introducción a la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto.

Analiza las variaciones en la resistencia del hormigón y presenta procedimientos estadísticos útiles para interpretarlas con respecto a los criterios de prueba y aceptación especificados. <https://global.ihc.com/>.

ASTM C109/C109M.

Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (utilizando especímenes cúbicos de 2 in o [50 mm]), aplicada en la chorrea de los cubos para las pruebas destructivas de cemento (Inteco, s. f.).

ASTM C 114

Métodos de prueba estándar para el análisis químico del cemento hidráulico

Estos métodos de prueba cubren los análisis químicos de los cementos hidráulicos.

Cualquier método de prueba de precisión y sesgo aceptable demostrado puede usarse para el análisis de cementos hidráulicos, incluidos los análisis con fines de arbitraje y certificación, como se explica en el apartado 4 (Eurolab, s. f.).

Se proporcionan métodos de prueba química específicos para facilitar la referencia de quienes deseen usarlos.

Estos se agrupan como métodos de prueba de referencia y métodos de prueba alternativos (Eurolab, s. f.).

Los métodos de prueba de referencia son métodos de prueba químicos clásicos aceptados desde hace: “Mucho tiempo que proporcionan un esquema básico de análisis razonablemente bien integrado para cementos hidráulicos” (Eurolab, s. f., s. p.).

Los métodos de prueba alternativos generalmente brindan la determinación individual de analitos específicos. Pueden usarse solos o como alternativas y determinaciones dentro del esquema básico a opción del analista y como se indica en el método individual (Eurolab, s. f.).

ASTM C 150

Especificación estándar para cemento Portland

Esta especificación cubre ocho tipos de cemento Portland, como sigue (ver Nota 2):

Tipo I:

Para usar cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo (Cemex, s. f.).

Tipo IA

Cemento inductor de aire para los mismos usos que el tipo I, donde se desea incorporar aire (Cemex, s. f.).

Tipo II:

Para uso general, especialmente cuando se desea una resistencia moderada a los sulfatos o un calor de hidratación moderado (Cemex, s. f.).

Tipo IIA

Cemento inductor de aire para los mismos usos que el tipo II, donde se desea incorporar aire (Cemex, s. f.).

Tipo III:

Para usar cuando se desea una alta resistencia inicial (Cemex, s. f.).

Tipo IIIA

Cemento inductor de aire para el mismo uso que el tipo III, donde se desea incorporar aire (Cemex, s. f.).

Tipo IV

Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación (Cemex, s. f.).

Tipo V:

Para usar cuando se desea una alta resistencia a los sulfatos (Cemex, s. f.).

ASTM C 183

Práctica estándar para el muestreo y la cantidad de pruebas de cemento hidráulico.

Esta práctica cubre los procedimientos para el muestreo y la cantidad de pruebas de cemento hidráulico después de que ha sido fabricado y está listo para ofrecerse a la venta.

ASTM C 465

Especificación estándar para adiciones de procesamiento para uso en la fabricación de cementos hidráulicos

Esta especificación se refiere a los criterios y pruebas que se utilizan para determinar si una adición de procesamiento orgánico o inorgánico, cuando se utiliza en la cantidad recomendada a opción del productor de cemento en la fabricación de cementos hidráulicos, cumple con los requisitos prescritos por definición en las especificaciones C150/C150M, C1157/C1157M, C845/C845M y C595/C595M (Inteco, 2019). Se considera que los materiales enumerados en las especificaciones anteriores de ASTM cumplen con los requisitos de adiciones de procesamiento orgánico de esta especificación:

C150/C150M – 62 Para cemento Portland

C205 – 58 T Para cemento Portland de escoria de alto horno

C340 – 58 T Para cemento Portland puzolánico

C358 – 58 Para cemento de escoria

Características de las Normas API 10 A y B.

La norma 10 A se limita a los tipos de cemento en el uso de cementación de pozos petroleros, aplicados también en geotermia y las pruebas para determinar si estos se encuentran entre los parámetros de la norma.

Para la API 10B

Esta norma se refiere a las pruebas de lechadas de cemento, así como los parámetros establecidos de estas.

Las pruebas por realizar a la lechada de cemento son:

1. Resistencia a la compresión no destructiva.
34,5 kg/cm² (500 psi) < 24 horas
Presión y temperatura en condiciones de fondo de pozo
2. Resistencia a la compresión ensayos destructivos cubos de 5 cm por lado.
34,5 kg/cm² (500 psi) < 24 horas
Temperaturas 26 °C a 60 °C a presión atmosférica, no se tiene cámara de curado para

temperatura de 60 °C y presión 206,9 kg/cm² (3000 psi).

3. Pérdida de agua (filtrado) por presión y temperatura en condiciones de pozo.
Máximo 50 cm³ en 30 min
4. Reología.
Condiciones para calcular el flujo de acuerdo con el régimen de bombeo que puede andar entre turbulento, laminar o tapón.
5. Sedimentación.
Que no se tenga separación de los componentes.
6. Tiempo bombeable.
De acuerdo con la profundidad de la cementación se estima entre 4 a 6 horas.
7. Agua libre.
Para el presente caso no se permite % de agua libre
8. Tiempo de fragua a temperatura ambiente.

Determinar cuando el cemento puede haber fraguado en la parte superior del pozo.

ASTM C 496

Trata de los métodos para obtener la resistencia a la tracción del cemento. Por las características de los esfuerzos por temperatura de pozo, es un método de mucha utilidad en la prueba de contención por expansión térmica de la tubería.

ASTM E 220

Método de prueba estándar para la calibración de termocuplas mediante técnicas de comparación.

Este método de prueba describe los principios, el aparato y el procedimiento para calibrar termocuplas en comparación con un termómetro de referencia.

Las calibraciones se cubren en rangos de temperatura apropiados para los tipos individuales de termocuplas en un rango general

de aproximadamente $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-78,15\text{ }^{\circ}\text{K}$ a $1973,15\text{ }^{\circ}\text{K}$).

En general, este método de prueba es aplicable a termocuplas que no se utilizan, y no se aplica a las termocuplas usadas debido a la posible falta de homogeneidad del material, cuyos efectos no pueden identificarse ni cuantificarse mediante técnicas de calibración estándar.

Las termocuplas con elementos térmicos de gran diámetro y las termocuplas revestidas, pueden requerir de un cuidado especial para controlar las pérdidas por conducción térmica.

En este método de prueba, todos los valores de temperatura se basan en la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (consultar la Guía E1594).

API 10

Especificación de materiales y pruebas de cementación de pozos.

API 10 A

Especificación para cementos y materiales para cementación de pozos

Este documento especifica los requisitos y brinda recomendaciones para seis clases de cementos para pozos y dos clases de cementos para pozos compuestos, incluidos sus requisitos químicos y físicos y los procedimientos para las pruebas físicas.

Esta especificación es aplicable a las clases de cemento de pozos:

A, B, C y D, que son los productos que se obtienen al moler clínker de cemento Portland y, si es necesario, sulfato de calcio (CaSO_4) como aditivo intermolido.

Los aditivos de procesamiento se pueden utilizar en la fabricación de cemento de estas clases. Los agentes modificadores del fraguado pueden intercalarse o mezclarse durante la fabricación del cemento clase D.

Los cementos hidráulicos clases K y L son cementos compuestos. Se refiere a la mezcla en seco de cemento con otros aditivos, ya listos para utilizar, por ejemplo, el K. Cemento G mezclado con un 35 % de sílica, que son los productos obtenidos al moler clínker de cemento Portland y una o más formas de CaSO_4 con componentes compuestos o mediante la mezcla posterior de cemento Portland producido por separado con componentes compuestos procesados por separado. (Apéndice B.1)

Esta especificación también se aplica a las clases de cemento de pozos G y H. Estos son los productos que se obtienen al moler clínker sin más aditivos que una o más formas de CaSO_4 , agua o aditivos químicos necesarios para la reducción de cromo (VI).

Clase A

Este producto se obtiene de la molienda del clínker. Está constituido esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos y, por lo general, contiene una o más formas de sulfato de calcio como aditivo molido.

Los aditivos de procesamiento pueden usarse en la fabricación de cemento de clase A. Se demuestra que las cantidades que se utilizan cumplen con los requisitos de ASTM C465. Este producto está diseñado para usarse cuando no se requieren propiedades especiales y está disponible solo en grado, similar a la norma ASTM C150, tipo I.

Clase B

Este producto se obtiene de la molienda del clínker. Está constituido esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos y, por lo general, contiene una o más formas de sulfato de calcio como aditivo intermolido a opción del fabricante (Figuroa García, 2019).

Los aditivos de procesamiento pueden usarse en la fabricación de cemento de clase B. Se ha demostrado que las cantidades que se utilizan cumplen con los requisitos de ASTM C465.

Este producto está diseñado para usarse cuando las condiciones requieren una resistencia moderada o alta a los sulfatos. Está disponible en grados MSR y HSR, similar a ASTM C150, tipo II.

Clase C

Se obtiene de la molienda del clínker. Está constituido esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos y, por lo general, contiene una o más formas de sulfato de calcio como aditivo molido (Figueroa García, 2019).

Se demuestra que las cantidades que se utilizan cumplen con los requisitos de ASTM C465. Este producto está diseñado para usarse cuando las condiciones requieren alta resistencia temprana y está disponible en O, MSR y grados HSR, similares a ASTM C150, tipo III.

Clase D

Se obtiene de la molienda del clínker. Está constituido esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos y, por lo general, contiene una o más formas de sulfato de calcio como aditivo molido a opción del fabricante (Figueroa García, 2019).

Además, a opción del fabricante, los agentes modificadores del fraguado pueden intercalarse o mezclarse durante la fabricación. Este producto está diseñado para usarse en condiciones de temperaturas y presiones moderadamente altas y está disponible en los grados MSR y HSR.

Clase G

Se obtiene de la molienda del clínker. Está constituido esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos y, por lo general, contiene una o más formas de sulfato de calcio como aditivo molido (Figueroa García, 2019).

Sin aditivos aparte del calcio sulfato o agua o ambos, se intercalarán o se mezclarán con el clínker durante la fabricación del cemento clase G. Se permiten los aditivos químicos necesarios para la reducción de cromo (VI), siempre que tales aditivos no impidan que el cemento cumpla su propósito previsto.

Este producto está diseñado para usarse como cemento básico para pozos y está disponible en los grados MSR y HSR.

Clase H

Se obtiene de la molienda del clínker. Está constituido esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos y, por lo general, contiene una o más formas de sulfato de calcio como aditivo intermolido (Figueroa García, 2019).

Sin aditivos aparte del sulfato de calcio o agua o ambos, se intercalarán o se mezclarán con el clínker durante la fabricación del cemento clase H.

Se permiten los aditivos químicos necesarios para la reducción de cromo (VI), siempre que tales aditivos no impidan que el cemento del pozo cumpla su propósito previsto.

API 10 B

Prácticas que se recomiendan para cementación de pozos

API 10 B y PR 10 B

Práctica recomendada para prueba de cementos para pozos. Es la norma que especifica los métodos y recomendaciones para pruebas de cemento y materiales de pozos.

API RP 10B 6

Práctica recomendada para determinar la resistencia estática de gel de las formulaciones de cemento.

Esta parte de la Norma ISO 10426 especifica los requisitos y proporciona métodos de prueba para la determinación de la resistencia estática del gel (SGS) de las lechadas de cemento y materiales que se relacionan en condiciones de pozo simuladas.

API Reporte 10 TR3

Temperaturas para las pruebas de tiempo de espesamiento operativo del cemento API: informe de 1993 del grupo de trabajo API sobre los programas de temperatura de cementación.

INTE C 57 2020

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulicos utilizando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas). Nota 1. El Método de Ensayo ASTM C349 proporciona un procedimiento alternativo para esta determinación (no usar como ensayo de aceptación). 1.2 Este método de ensayo cubre la aplicación de los ensayos usando las unidades SI o pulgada-libra. Los valores indicados en uno u otro sistema deben ser considerados separadamente como norma

INTE C151:2020 (INTE 06-11-19:2016)

Establece los términos y definiciones para aplicar al cemento hidráulico a sus componentes, características, propiedades y al ensayo de estos; aunque algunos términos pueden tener aplicaciones más amplias.

ISO-10426

Esta norma es una aplicación de las Normas API 10 A y B. En estas se indican los parámetros de las pruebas por realizar, tanto los procedimientos de los equipos y pruebas, así como los parámetros base, los cuales se toman como guía para su aceptación.

(ISO: Organismo Internacional de Estandarización).

ISO 13500

Industrias del petróleo y del gas natural. Materiales de fluidos de perforación. Especificaciones y ensayos.

La bentonita es un aditivo muy importante en los fluidos de perforación. Por ser un aditivo que se utiliza en este tipo de cementación, el

tomar especificaciones de esta, así como tipos de ensayo, es un punto relevante.

Estadística

De acuerdo con Melo Martínez *et al.* (2020):

Diseñar estadísticamente un experimento es realizar una prueba o una serie de pruebas, buscando caracterizar las variables explicativas o factores (Xi) de mayor influencia en un ensayo de interés, evaluado a través de una o varias variables respuesta(s), tal que, si deliberada o sistemáticamente se introducen cambios controlados en algunas de las variables explicativas del proceso, siempre sea posible observar o cuantificar los cambios que estos generan en la(s) variable(s) respuesta(s).

Adicionalmente, se busca minimizar el efecto de las variables no controlables (covariables), procurando con ello estabilizar y minimizar la variabilidad de las respuestas, identificando los factores que contribuyen a las mayores causas de variabilidad.

Aunque la aplicación o uso del diseño experimental se da en la mayoría de las áreas del conocimiento, este debe cumplir las siguientes fases:

1. Caracterización de un proceso: en esta fase se busca determinar los rangos de las variables o factores controlables de mayor influencia en la(s) variable(s) respuesta(s), que a la vez minimizan el efecto de las variables no controlables (factores o covariables).
2. Depuración y optimización de un proceso ya caracterizado: en esta fase se hallan los niveles de los factores estudiados que proporcionan la respuesta óptima a la solución del proceso caracterizado en la fase anterior.

En cualquier aplicación de la estadística, en el marco del diseño y análisis de un experimento, es necesario que quienes lo desarrollen entiendan claramente el problema objeto de estudio, posean un amplio conocimiento del material experimental por usar, conozcan las posibilidades existentes para coleccionar los datos y, además, tengan el conocimiento estadístico necesario para

direccionar e interpretar adecuadamente los resultados del experimento.

Generalmente, el grupo de investigación debe estar conformado por expertos conocedores de la problemática por estudiar (biólogos, agrónomos, ingenieros, etc.), y especialistas en la plantación del diseño estadístico y el análisis apropiado de la información recolectada (p. 3).

Muestreo resistencia a la compresión

Para los análisis de las muestras, al principio, por la cantidad de moldes se estimaban tres cubos por edad en tiempo de resistencia a la compresión. No obstante, al ver la diferencia en cuanto a los resultados, se cambió a 15 unidades por edad de muestra.

La norma ACI 318 S05 en la sección 5.3 Dosificación basada en la experiencia en obra o en mezclas de prueba en el punto 5.3.1 Desviación estándar menciona:

5.3.1.1 — Cuando una planta de concreto tiene registros de ensayos debe establecerse una desviación estándar de la muestra.

Los registros de ensayos a partir de los cuales se calcula deben cumplir las siguientes condiciones:

- A. Representar materiales, procedimientos de control de calidad y condiciones similares a las esperadas, y las variaciones en los materiales y en las proporciones dentro de la muestra no deben haber sido más restrictivas que las de la obra propuesta.
- B. Representar un concreto producido para que cumpla con una resistencia o resistencias especificadas, dentro de 7 MPa de resistencia a la compresión.
- C. Consistir al menos de 30 ensayos consecutivos, o de dos grupos de ensayos consecutivos totalizando al menos 30 ensayos como se define en 5.6.2.4, excepto por lo especificado en 5.3.1.2 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2020, s. p.).

5.3.1.2 — Cuando la instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos que se ajusten a los requisitos de 5.3.1.1, pero sí tenga un registro basado en 15 a 29 ensayos consecutivos, se debe establecer la desviación estándar de la muestra s_s como el producto de la desviación estándar de la muestra calculada y el factor de modificación de la tabla 17 (tabla 5.3.1.2 ACI 318 05). Para que sean aceptables, los registros de ensayos deben ajustarse a los requisitos (a) y (b) de 5.3.1.1, y deben representar un solo registro de ensayos consecutivos que abarquen un período no menor de 45 días calendario consecutivos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2020, s. p.), en los que se indica que:

“Cuando se dispone de menos de 30 ensayos, pero con un mínimo de 15, la desviación estándar de la muestra calculada se incrementa por el factor indicado en la tabla 5.3.1.2. Este procedimiento da como resultado una resistencia promedio requerida más conservadora (mayor). Los factores de la Tabla 5.3.1.2 están basados en la distribución de muestreo de la desviación estándar de la muestra y proporcionan una protección (equivalente a la del registro de 30 ensayos) contra la posibilidad de que la muestra reducida subestime la verdadera desviación estándar de la población (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2020, s. p.)”.

Para el caso particular del presente trabajo, como es para lechadas y según la norma ASTM C-109 se basa en dos a tres cubos por prueba en caso de morteros, se utiliza como la ACI 318, para trabajar con un rango estadístico mayor.

El objetivo principal del análisis es determinar las concentraciones óptimas de aditivos y con la resistencia a la compresión según la norma. Para esto se realiza un análisis de las muestras de los cubos de las dos lechadas que dieron un mejor resultado en los ensayos no destructivos de las mezclas.

Metodología

El proyecto consideró cuatro objetivos específicos, los cuales son necesarios para lograr el cumplimiento del objetivo general.

Para los procedimientos necesarios según las normas vigentes como API 10 A y 10 B (American Petroleum Institute), así como las ASTM (American Society of Testing Materials) y la ISO 10426; para los cementos se utiliza cemento clase G mezclado con un 35 % de Sílicanb ahora patentado como clase K.

Uno de los objetivos era evaluar los aditivos nacionales y analizar la posibilidad de utilizarlos en el diseño de lechadas de cemento hidráulico para cementación de pozos; sin embargo, verificando, estos no cumplen para este uso, debido a que vienen diseñados para cementos tipo I y condiciones de superficie. Se contactó a proveedores para poder tener la posibilidad de que ellos los tengan a nivel nacional, y sea de mejor accesibilidad para la empresa.

La prioridad de este proyecto es mejorar la densidad y resistencia a la compresión en lechadas livianas de cemento en pozos geotérmicos, mediante el análisis de pruebas destructivas y no destructivas, por lo que, se desarrollaron mezclas y combinaciones de aditivos internacionales hasta obtener dos mezclas de lechadas que cumplieran con la densidad de diseño y la resistencia a la compresión, además, de las características físicas como tiempo bombeable, pérdida de filtrado, control de agua libre, sedimentación y reología, de acuerdo con la norma API 10 A y B, última versión. El cemento hidráulico tipo G mezclado con un 35 % de sílica (clase K) solo se consigue de forma internacional, ya que, debido a que las cantidades que se utilizan son muy pocas

como para cambiar la molienda en una planta productora nacional.

Como se mencionó anteriormente, uno de los procesos importantes de este trabajo era caracterizar los aditivos nacionales e internacionales, así como valorar que cumplieran con las condiciones necesarias para el diseño de la mezcla de pozos profundos, sin embargo, las compañías nacionales solo cuentan con aditivos para trabajos en construcción superficiales, para presión y temperatura no cuentan en este momento con la posibilidad de comprarlos internamente.

Para el caso de los aditivos internacionales, se estaba en proceso de compra a través de una licitación que todavía no había salido al mercado, y en esta se tiene como requisito que se envíen muestras de los productos para analizarlos en el laboratorio y así poder valorar si se aceptan o no, por lo que no fue posible solicitar el envío anticipadamente.

Por este motivo, se tuvo que trabajar con los que se tenía en almacén, lo que tendió a cerrar más el objetivo de trabajar y diseñar mezclas con mayor cantidad de marcas y así lograr un parámetro de calidad y costo por proveedor.

En este paso iniciamos con el proceso de evaluación del segundo objetivo, para el cual entramos en el proceso de diseño de mezclas y la aplicación de los procedimientos para obtener los porcentajes adecuados de cada aditivo y que tengamos los objetivos esperados.

Los aditivos que se caracterizaron fueron los siguientes:

1. Retardador.

Se utiliza para tener un tiempo de colocación de la mezcla y permite trabajar con las temperaturas esperadas de pozo, variando el porcentaje de acuerdo con esto.

- a. Líquido negro oscuro
- b. Temperatura de trabajo 132 °C (circulando a fondo de pozo)
- c. Rango típico de densidad 1,43 a 2,75 gr/cm³
- d. Concentración recomendada 0,18 a 3,55 l por cada 100 kg de peso de cemento
- e. Gravedad específica 1,16
- f. Volumen absoluto 0,8629 l/kg.

Para poder analizar el porcentaje requerido de este retardador, fue necesario, realizar las combinaciones de aditivos necesarias y así obtener los valores de la lechada acorde con el diseño. Una vez con los datos, se realizó esta última prueba, que consiste en agregar el retardante y optimizar los tiempos de colocación (tiempo bombeable) y resistencia a la compresión, colocando las mezclas en los equipos UCA y en el consistómetro presurizado, las veces que fueran necesarias, hasta que el porcentaje de retardante, cumpliera, con el tiempo de colocación y no afectara la resistencia a la compresión con el tiempo

2. Controlador agua libre

Permite tener un valor de cero agua libre, manteniendo las condiciones de la lechada y, a la vez, reducir las posibilidades de colapso por exceso de agua liberada por la mezcla.

- a. Líquido claro en una suspensión de hidrocarburo (polímero)
- b. Temperatura de trabajo 27 a 149 °C (circulando a fondo de pozo)
- c. Rango típico de densidad 1,44 a 2,64 gr/cm³
- d. **Concentración recomendada** 0,09 a 0,36 l por cada 100 kg de peso de cemento

- e. Gravedad específica 0,91
- f. Volumen absoluto 1,095 l/kg

Este proceso consiste en obtener por medio del procedimiento del apartado número 8 de la norma API 10 A.

3. Controlador de filtrado

Permite evitar la deshidratación de la mezcla por presión hidrostática.

- a. Líquido claro a amarillo claro
- b. Temperatura de trabajo 210 °C
- c. Rango típico de densidad 1,59 a 1.89 gr/cm³
- d. Concentración recomendada 0,89 a 17,72 l por cada 100 kg de peso de cemento
- e. Gravedad específica 1,05
- f. Volumen absoluto 0,953 l/kg

Esta prueba consiste en someter la lechada a una temperatura y presión estimada de pozo. Aunque en los parámetros de la norma no se indica un valor específico, se toma como parámetro normal aceptable un resultado entre 50 y 70 cm³; si el valor diera superior, se considera una posible deshidratación de la muestra, lo que conlleva, tener que realizarla nuevamente, variando los porcentajes del reductor de filtrado.

Se ejecuta según apartado 10 de la norma API RP 10B.

4. Dispersante

Se utiliza para hacer la mezcla más dispersa, debido a la cantidad de aditivos que lleva. Si este no se usa, la bombeabilidad se dificulta por su viscosidad.

- a. Líquido café oscuro
- b. Temperatura de trabajo <4 a 204 °C (circulando a fondo de pozo)
- c. Rango típico de densidad 1,45 a 2,39 gr/cm³

- d. **Concentración recomendada**
0,04 a 1,78 l por cada 100 kg de peso de cemento
- e. Gravedad específica 1,18
- f. Volumen absoluto 0,8479 l/kg.

Este aditivo se utiliza para verificar o mejorar la bombeabilidad de la mezcla, por lo que su uso se establece según el tipo de fluido que se quiera tener y lo cual afecta la resistencia al gel de la lechada.

Aplicando el apartado 11 de la norma API RP 10B.

5. Antiespumante

Con las condiciones de los productos y el cemento al mezclarse produce una cantidad alta de espuma, lo que provoca problemas en la mezcla.

- a. Líquido transparente
- b. **Concentración recomendada**
0,04 a 0,18 l por cada 100 kg de peso de cemento
- c. Gravedad específica 0,99
- d. Volumen absoluto 1,0131 l/kg

6. Multipropósito.

Este aditivo tiene la característica de mejorar la resistencia a la compresión, así como resistencia a los sulfatos. Es una mejora para las condiciones que se esperan de la lechada.

- a. Polvo blanco fino
- b. Temperatura de trabajo 0 a 93 °C (circulando a fondo de pozo)
- c. Rango típico de densidad 1,44 a 2,16 gr/cm³
- d. **Concentración recomendada**
4,44 a 17,76 l por cada 100 kg de peso de cemento
- e. Gravedad específica 1,30
- f. Volumen absoluto 0,7470 l/kg

Tabla 2 Pruebas de diferentes aditivos (resultados)

		0.8 % Halad23		1.0 % Halad23		1.2 % Halad23		1.4 % Halad23	
		Muestra #1	Muestra #2	Muestra #1	Muestra #2	Muestra #1	Muestra #2	Muestra #1	Muestra #2
Res. Comp.	UCA 0.69 MPa	41:03 h	41:52 h	44:02 h	43:06 h	41:56 h	41:21 h	47:40 h	45:41 h
	UCA 3.45 MPa	59:50 h	61:55 h	62:05 h	59:09 h	59:00 h	62:13 h	63:51 h	63:49 h
	Presión UCA 64H (MPa)	3.86	3.62	3.65	3.95	3.95	3.64	3.46	3.48
	Presión UCA 64H (MPa)	0.40	0.20	13.90	15.30	12.30	0.20	5.80	9.20
	Tiempo bombeable (unidades de consistencia [Bc])	8:00Horas-11,3Bc	8:00Horas-10,3Bc	8:00Horas-14,4Bc	-	8:00Horas-13,9Bc	8:00Horas-7,33Bc	8:00Horas-11,3Bc	8:00Horas-10,2Bc
		-	17:32Horas-70,0Bc	19:23Horas-70,0Bc	-	26:07Horas-70,0Bc	18:28Horas-70,0Bc	20:19Horas-70,0Bc	19:45Horas-70,0Bc
Reología	Lectura 300 rpm	60	52	65	80	66	80	124	145
	Lectura 200 rpm	42	36	45	52	45	57	86	92
	Lectura 100 rpm	23	20	23	32	24	27	49	54
	Viscosidad plástica (Cp)	55,5	48	63	72	63	79,5	112,5	136,5
	Punto cedente (lb/100 pie ²)	4,77	4,24	2,12	8,48	3,18	0,53	12,19	9,01
	Filtrado, cm ³	15 min	11 min	248	-	-	250	166	204
Agua libre %	0,8	1,6	1,6	1,6	1,6	2,4	1,6	1,6	
Densidad (gr/cm ³)	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	
Fragua (T ambiente)	50-64Horas	50-64Horas	46Horas	46Horas	28-42Horas	28-42Horas	72Horas	72Horas	

Prueba realizada al cemento G (Apéndice 1 fig. 33)

Para el cuadro anterior se utilizaron aditivos almacenados en bodega, de los cuales se aprecia que los tiempos de fragua para alcanzar los 34,5 kg/cm² (500 psi) supera las 60 horas. Esto sobrepasa el objetivo para este trabajo, por lo que se procede a no usar estos aditivos.

Para el proceso de prueba antes de que los productos fueran adquiridos, se solicitó al fabricante o proveedor realizar una prueba de estos con el cemento que se utiliza en Costa Rica y diseñar la lechada con densidad convencional 1,87 g/cm³ para la aplicación en el campo. Una de las condiciones básicas es que sean compatibles con el cemento y se obtengan

propiedades mecánicas de la mezcla en su tiempo y dentro de la norma.

Para la última compra de aditivos se contaba con un lote de aditivos de la compañía Halliburton como Halad (reductor de filtrado) y CFR (reductor de fricción), ambos en presentación en polvo. Estos cumplían con el objetivo de las condiciones del cemento; sin embargo, con la nueva presentación líquida se cambia su manipulación y características para el proceso de mezclado.

Solo los aditivos multipropósito y estabilizador se utilizan en polvo, por el mejoramiento en las características de resistencia a la compresión y reducción de la estática para mejorar su bombeabilidad. Lo anterior cuando se

utilice desde el tanque de almacenamiento en seco.

API 10 A, procedimientos de laboratorio y 10-B aditivos de cementación.

Caracterización de aditivos:

- a) Se realizaron pruebas a los aditivos por utilizar en las lechadas de cemento G. Lo anterior con el fin de obtener los porcentajes adecuados en el desarrollo del diseño de mezcla. Cada uno de los aditivos tiene un rango de porcentaje de uso según peso de cemento. El primer aditivo por definir es el retardante, ya que con este se define el tiempo de colocación y no afecta la calidad de la mezcla para los demás aditivos.
- b) Para obtener el porcentaje adecuado del retardante se debe utilizar el consistómetro presurizado API 10 A y el tiempo de pruebas es de tres o cuatro días. Posteriormente, se realizan las demás pruebas iniciales como porcentaje de agua libre, filtrado, sedimentación o separación y reología.

Estas pruebas se realizaron el mismo día debido a que el proceso de preparación de la mezcla es uno solo, como mezclar cemento, agua y aditivos. Posteriormente, se introducen a el consistómetro atmosférico para preparar la mezcla a condiciones de temperatura de fondo de pozo (80 – 120 °C). Los porcentajes de aditivos se utilizaron según información del fabricante; cuando estos no se ajustan a lo necesario para un buen resultado de la prueba son descartados para su uso. Una vez que se encontró el porcentaje adecuado, se realizaron las pruebas finales de resistencia a la compresión destructiva y no destructiva.

- c) Se compararon los resultados de acuerdo con los límites establecidos en la norma

Pruebas químicas (Tabla 3 y la Figura 33):

- a) En el laboratorio de lodos y cementos del ICE se comprobó la compatibilidad entre los aditivos, debido a que, por lo general, estos, a pesar de trabajar bien con el cemento, no tienen compatibilidad con aditivos de otras marcas con funciones diferentes.

Tabla 3 Propiedades químicas del cemento según la norma API 10-B, página 5, sección 4.1.2 requerimientos químicos

		Cemento Clase					
		A	B	C	D,E,F	G	H
GRADO ORDINARIO (O)							
Óxido del magnesio (MgO), máximo, %		6	NA	6	NA	NA	NA
Trióxido de azufre (SO ₃), máximo, %		3,5 ^a	NA	4,5	NA	NA	NA
Pérdida por ignición, máximo, %		3	NA	3	NA	NA	NA
Residuo insoluble, máximo, %		0,75	NA	0,75	NA	NA	NA
Aluminato Tricálcico (C ₃ A), máximo, %		NR	NA	15	NA	NA	NA
GRADO (MSR) MODERADA RESISTENCIA A LOS SULFATOS							
Óxido del magnesio (MgO), máximo, %		NA	6	6	6	6	6
Trióxido de azufre (SO ₃), máximo, %		NA	3	3,5	3	3	3
Pérdida por ignición, máximo, %		NA	3	3	3	3	3
Residuo insoluble, máximo, %		NA	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Silicato tricálcico (C ₃ S),	máximo, %	NA	NR	NR	NR	58 ^b	58 ^b
	Mínimo, %	NA	NR	NR	NR	48 ^b	48 ^b
Aluminato Tricálcico (C ₃ A), máximo, % ⁽³⁾		NA	8	8	8	8	8
Contenido total de álcalis, expresado como óxido de sodio (Na ₂ O) equivalente, máximo, %		NA	NR	NR	NR	0,75 ^c	0,75 ^c
GRADO (HSR) ALTA RESISTENCIA A LOS SULFATOS							
Óxido del magnesio (MgO), máximo, %		NA	6	6	6	6	6
Trióxido de azufre (SO ₃), máximo, %		NA	3	3,5	3	3	3
Pérdida por ignición, máximo, %		NA	3	3	3	3	3
Residuo insoluble, máximo, %		NA	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Silicato tricálcico (C ₃ S),	máximo, %	NA	NR	NR	NR	65 ^b	65 ^b
	Mínimo, %	NA	NR	NR	NR	48 ^b	48 ^b
Aluminato tricálcico (C ₃ A), máximo, %		NA	3 ^b	3 ^b	3 ^b	3 ^b	3 ^b
Aluminoferrita tetracálcico (C ₄ AF) más dos veces el Aluminato tricálcico (C ₃ A), máximo, %		NA	24 ^b	24 ^b	24 ^b	24 ^b	24 ^b
Contenido total de álcalis, expresado como óxido de sodio (Na ₂ O) equivalente, máximo, %		NA	NR	NR	NR	0,75 ^c	0,75 ^c
NR = Ningún Requisito; NA = No Aplicable							
^a Cuando el contenido del aluminado tricálcico (expresado como C ₃ A) del cemento es 8 % o menos, el máximo							
^b La expresión de limitaciones químicas por medio del cálculo de los compuestos supuestos no significa necesariamente que los óxidos están realmente o completamente presentes como tales compuestos. Cuando la proporción de los porcentajes de Al ₂ O ₃ a Fe ₂ O ₃ es 0,64 o menos, el contenido del C ₃ A es cero. Cuando la							
C ₃ A = (2,65 x % Al ₂ O ₃) - (1,69 x % Fe ₂ O ₃)							
C ₄ AF = 3,04 x % Fe ₂ O ₃							
C ₃ S = (4,07 x % CaO) - (7,60 x % SiO ₂) - (6,72 x % Al ₂ O ₃) - (1,43 x % Fe ₂ O ₃) - (2,85 x % SO ₃)							
Cuando la proporción de Al ₂ O ₃ a Fe ₂ O ₃ es menos de 0,64, el C ₃ S debe ser calculado como sigue:							
C ₃ S = (4,07 x % CaO) - (7,60 x % SiO ₂) - (4,48 x % Al ₂ O ₃) - (2,86 x % Fe ₂ O ₃) - (2,85 x % SO ₃)							
^c El óxido de sodio equivalente (expresado como Na ₂ O equivalente) debe ser calculado por la fórmula:							
Na ₂ O equivalente = (0,658 x % K ₂ O) + (% Na ₂ O)							

Diseño de mezcla:

Ya en este punto comenzamos con el tercer objetivo, que consiste en diseñar la mezcla de acuerdo con las características y porcentajes de trabajo de los aditivos evaluados

- a) Al tener los aditivos seleccionados se realizaron las pruebas para obtener los porcentajes de las concentraciones de estos y así mezclar para verificar las condiciones mecánicas y físicas, para determinar el proceso de trabajo para la mezcla de diseño que cumple con los parámetros. Para esto, se estimaba contar con cinco muestras para el retardante y otras cinco para determinar las características fisicomecánicas de los otros aditivos y así verificar el porcentaje adecuado para probar la mezcla final y sus resultados a la compresión. En total, para las 4 mezclas serían 20 muestreos para el retardante y 20 para el conjunto de aditivos. Según se mencionó, la norma establece que para las pruebas destructivas de los cubos se toman 3 cubos por muestra y para pruebas de concreto mínimo 15 moldes por mezcla, por lo que en este caso se realizan 15 cubos por muestra y por cada uno de los lapsos como la primera a las 24 horas.
- b) Para realizar las muestras de compresión y tiempo bombeable, es necesario asegurarse de que la mezcla no presente sedimentación, deshidratación, exceso de agua libre y problemas de reología. Si esta no cumple alguno de estos parámetros según la norma API, se debe llevar a cabo otro diseño hasta que los cumpla y se puedan realizar las pruebas no destructivas y destructivas.

Figura 3 Mezclador para realizar la lechada



Figura 4 Mezclando lechada



Tabla 4 Requerimientos físicos página 8, API 10-A, apartado 4.1.3

Cemento para pozos Clase				A	B	C	D	E	F	G	H			
Agua de la mezcla, % de la fracción de la masa del cemento (Tabla 5)				46	46	56	38	38	38	44	38			
Prueba de finura (métodos alternativos) (cláusula 6)														
Turbidímetro (superficie especificada, mínimo m ² /kg)				150	160	220	NR	NR	NR	NR	NR			
Permeabilidad al aire (superficie especificada, mínimo m ² /kg)				280	280	400	NR	NR	NR	NR	NR			
Contenido de fluido libre, máximo % (cláusula 8)				NR	NR	NR	NR	NR	NR	5,9	5,9			
Prueba de resistencia a la Compresión (8 h tiempo de curando) (cláusula 9)	Número de cédula Tabla 6	Temperatura final de curado. °C (°F)	Presión final de curado. MPa (psi)	Resistencia a la compresión mínima.										
				MPa (psi)										
				NA	38 (100)	atm	1,7 (250)	1,4 (200)	2,1 (300)	NR	NR	NR	2,1 (300)	2,1 (300)
				NA	60 (140)	atm	NR	NR	NR	NR	NR	NR	10,3 (1500)	10,3 (1500)
				6S	110 (230)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	3,4 (500)	NR	NR	NR	NR
				8S	143 (290)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	NR	3,4 (500)	NR	NR	NR
9S	160 (320)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	NR	NR	3,4 (500)	NR	NR				
Prueba de resistencia a la Compresión (24 h tiempo de curando) (cláusula 9)	Número de cédula, Tabla 6	Temperatura final de curado. °C (°F)	Presión final de curado. Mpa (psi)	Resistencia a la compresión mínima.										
				MPa (psi)										
				NA	38 (100)	atm	12,4 (1800)	10,3 (1500)	13,8 (2000)	NR	NR	NR	NR	NR
				4S	77 (170)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	6,9 (1000)	6,9 (1000)	NR	NR	NR
				6S	110 (230)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	13,8 (2000)	NR	6,9 (1000)	NR	NR
				8S	143 (290)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	NR	13,8 (2000)	NR	NR	NR
9S	160 (320)	20,7 (3 000)	NR	NR	NR	NR	NR	6,9 (1000)	NR	NR				
Presión y temperatura de la prueba de tiempo de espesamiento (cláusula 10)	Número de cédula para la especificación de prueba Tablas 9 a 13	Máxima consistencia (período de agitación de 15 a 30 min) Bc ^a	Tiempo de espesamiento (min / máx)											
			minutos											
			4	30		90 min	90 min	90 min	90 min	NR	NR	NR	NR	
			5	30		NR	NR	NR	NR	NR	NR	90 min	90 min	
			5	30		NR	NR	NR	NR	NR	NR	120 máx	120 máx	
			6	30		NR	NR	NR	100 min	100 min	100 min	NR	NR	
			8	30		NR	NR	NR	NR	154 min	NR	NR	NR	
9	30		NR	NR	NR	NR	NR	190 min	NR	NR				

^a unidades Bearden de consistencia (Bc) obtenidas en un consistómetro presurizado como está definido en la cláusula 10 y se calibró según la misma cláusula.
NR = Ningún Requisito

Requerimientos físicos página 6, API 10-B, apartado 4.1.3

Tabla 5 Prueba de tiempo bombeable de acuerdo con la consistencia

Clase	Cédula	Tiempo de espesamiento mínimo	Tiempo de espesamiento máximo
		min	min
A	4	90	NR
B	4	90	NR
C	4	90	NR
D	4	90	NR
	6	100	NR
E	6	100	NR
	8	154	NR
F	6	100	NR
	9	190	NR
G	5	90	120
H	5	90	120
NR = No Requerido			

Tabla 6 Requerimiento de agua de mezcla según el tipo de cemento

Componentes	Clase A y B g	Clase C g	Clase D, E, F, H g	Clase G g
Agua de mezcla	355 + - 0,5	383 + - 0,5	327 + - 0,5	349 + - 0,5
Cemento	772 + - 0,5	684 + - 0,5	860 + - 0,5	792 + - 0,5
g = gramos				

Tabla 7 Dimensiones de los cubos

	Cubo 50 mm	Cubo 2 pulg
Distancia entre lados opuestos	50.0 mm ± 0.5 mm	2.00 ± 0.02 pulg
Altura de molde	50.0 mm + 0.25 mm / - 0,38 mm	2 pulg + 0.01 pulg / -0.015 pulg

Requerimientos de prueba de resistencia a la compresión, API 10-A, apartado 9.1.2

Tabla 8 Especificación tiempo de colocación para cementos tipo G y H

Tiempo transcurrido	Presión	Temperatura
min	MPa (psi)	^o C (^o F)
0	6,9 (1 000)	27 (80)
2	9,0 (1 300)	28 (83)
4	11,1 (1 600)	30 (86)
6	13,1 (1 900)	32 (90)
8	15,2 (2 200)	34 (93)
10	17,3 (2 500)	36 (96)
12	19,3 (2 800)	37 (99)
14	21,4 (3 100)	39 (102)
16	23,4 (3 400)	41 (106)
18	25,5 (3 700)	43 (109)
20	27,6 (4 000)	44 (112)
22	29,6 (4 300)	46 (115)
24	31,7 (4 600)	48 (119)
26	33,8 (4 900)	50 (122)
28	35,6 (5 160)	52 (125)

Especificación tiempo de colocación para cementos tipo G y H, API 10-A, apartado 10.3.4

Prueba de porcentaje de agua libre:

Esta prueba consiste en mezclar cemento según lo indica la norma en el punto 7.2.4. Esto se hace con una batidora que mantenga 4000 rpm por 15 s y después 12000 rpm por 35 s.

Una vez que se mezclaba se colocaba en el consistómetro atmosférico y se preparaba a condiciones atmosféricas y temperatura ambiente.

$$\text{Fórmula} = \varphi = \frac{V_{ff} * \rho}{mS} \times 100$$

V_{ff}

= Volumen de agua libre medido en milímetros

ρ = Gravedad específica de la lechada

1,98 Cemento clase H con 38% agua

1,91 Cemento clase G con 44% agua

mS

= Masa inicial de mezcla expresada en gramos

La cantidad de agua libre aceptable debe ser menor al 5,9 %, según se indica en la Figura 34 tabla B-1 página 74, sección B.2.4 API 10 A 2019.

Sin embargo, para los efectos de geotermia se debe considerar un 0%, por los problemas que se pueden tener. Esto ya que, al quedar agua libre entre contactos de columna de cemento, queda un puente y por temperatura puede colapsar.

Prueba de resistencia a la compresión

Criterios de aceptación de la resistencia a la compresión

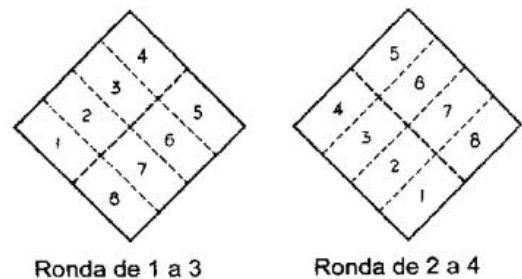
Según norma

La resistencia a la compresión de todas las muestras de prueba de aceptación hechas de esta muestra y probadas en el mismo periodo, se registró y promedió hasta los 50 kPa (10 psi) más cercanos, al menos dos tercios del original.

Las muestras individuales y la media de todas las muestras analizadas deben cumplir o superar el mínimo de resistencia a la compresión especificada en la Tabla 4 y la Tabla 9.

Además, según especificación, si las muestras no tenían el resultado esperado se debe realizar nuevamente. Para la preparación de las muestras se realizó según la norma.

Figura 5 Proceso para llenado de cubos



ACI-109 sección 10 procedimiento de preparación de especímenes

En esta sección se indica el procedimiento al llenar los moldes. Para el presente caso, se vaciaba una y se pisoneaba para sacar el aire y después se continuaba con el llenado.

Para el proceso de acondicionamiento de la lechada se utilizaron dos métodos, uno consumidas en un recipiente a una temperatura ambiente y otro a temperatura de 60 °C, ambos a presión atmosférica. Lo anterior debido a que no se cuenta con una planta de curado para condiciones de pozo y presurizar a 207 kg/cm² (3000 psi).

La velocidad de carga que se utilizó, según indica la norma, fue 72 kN/min ± 7 kN/min (16 000 lbf/min ± 1600 lbf/min). Para las muestras

se esperaba que presentaran una fuerza superior a 3,4 MPa (500 psi).

Para especímenes que se esperaba que fuera inferior a 3,4 MPa (500 psi), se utilizó una velocidad de 18 kN/min \pm 2 kN/min (4000 lbf/min \pm 400 lbf/min).

La resistencia a la compresión se calculó y expresó en megapascales (libras de fuerza por pulgada cuadrada).

Figura 6 Máquina de falla de cubos



Figura 7 Segunda máquina de falla de cubos



Figura 8 Máquina en funcionamiento



Tabla 9 Resistencia a la compresión según especificación API

				Mínima resistencia a la compresión en el período de curado indicado	
Cemento clase	Cédula No.	Temperatura de curado final ^a	Presión de curado final ^b	8 h ± 15 min	24 h ± 15 min
		°C (°F)	MPa (psi)	MPa (psi)	MPa (psi)
A	---	38 (100)	atm	1,7 (250)	12,4 (1 800)
B	---	38 (100)	atm	1,4 (200)	10,3 (1 500)
C		38 (100)	atm	2,1 (300)	13,8 (2 000)
D	4S	77 (170)	20,7 (3 000)	NR	6,9 (1 000)
	6S	110 (230)	20,7 (3 000)	3,4 (500)	13,8 (2 000)
E	4S	77 (170)	20,7 (3 000)	NR	6,9 (1 000)
	8S	143 (290)	20,7 (3 000)	3,4 (500)	13,8 (2 000)
F	6S	110 (230)	20,7 (3 000)	NR	6,9 (1 000)
	9S	160 (320)	20,7 (3 000)	3,4 (500)	6,9 (1 000)
G,H	---	38 (100)	atm	2,1 (300)	NR
	---	60 (140)	atm	10,3 (1 500)	NR

NR = No Requerido

a. La temperatura de curado debe ser mantenida en ± 2 °C (± 3 °F)

b. La presión de prueba debe ser aplicada, dentro de los límites siguientes para la duración del período de curado, tan pronto como los especímenes están colocados en el recipiente a presión y mantenidos a la presión dada. Cédula 4S a 9S: a 20,7 MPa \pm 3,4 MPa (3 000 psi \pm 500 psi)

Pruebas de tiempo de colocación

Equipo

Un consistómetro presurizado utiliza un recipiente cilíndrico giratorio para lodos. Está equipado con un conjunto de paletas estacionarias encerrado en un recipiente a presión, capaz de soportar las presiones y temperaturas de diseño.

El espacio entre el recipiente para lodos y las paredes del recipiente a presión debe estar completamente lleno de un aceite de hidrocarburos. El aceite seleccionado tiene las siguientes propiedades físicas:

Viscosidad = 7 mm²/s to 75 mm²/s at 38 °C (49 SSU to 350 SSU at 100 °F).

Calor específico =
2,1 kJ/(kg·K) to 2,4 kJ/(kg·K)
(0,5 Btu/lb ·°F to 0,58 Btu/lb ·°F).

Conductividad térmica =
0,119 W/(m·K) a 0,133 W/(m·K)
[0,0685 Btu/(h·ft² ·°F/ft) a 0,0770 Btu/(h·ft² ·°F/ft)].

Gravedad específica = 0,85 to 0,91

Un equipo utiliza un sistema de calentamiento capaz de elevar la temperatura del aceite a una velocidad de al menos 3 °C/min (5 °F/min). Además, cuenta con un sistema de medición de la temperatura para determinar y controlar la temperatura de la lechada de cemento (línea central).

El contenedor gira a una velocidad de 150 r/min \pm 15 r/min y mide los puntos de consistencia.

El tiempo de colocación debe ser como mínimo 90 min y máximo 120 min. La prueba inicia cuando se alcancen unos 30 Bc (unidades de consistencia) y el tiempo máximo para realizar la operación de bombeo es el tiempo en que este alcance valores de 100 Bc.

Figura 9 Consistómetro presurizado



Para las pruebas de filtrado:

Se toma en consideración como parámetro de medida entre 20 y 50 cm³ en 30 min a 69 bar (1000 psi) a 80 °C. Esto con el fin de que la muestra no se deshidrate. Si el valor de la prueba no entra en estos parámetros, se modifican porcentajes del reductor de filtrado y se repite la prueba.

Aunque la norma API 10 A no especifica un valor de rango aceptable, se menciona entre 50 y 100 cm³ por 30 min.

Figura 10 Prensa filtro alta temperatura y presión



Condiciones reológicas

Las condiciones reológicas indican cuán fluida o viscosa se encuentra la mezcla. Esto permite calcular la velocidad de bombeo mínima para tener un flujo entre laminar, tapón o turbulento, para remover el lodo del espacio anular entre tuberías y tubería formación. Este proceso se realiza de acuerdo con el punto 11 de la Norma API RP 10B, y se realizó para verificar las características de fluidez de la mezcla, de tal forma que nos permita trabajar con un fluido bombeable, que no se separe y que tenga la capacidad de desplazar los fluidos de la menor densidad y otro punto importante, que se pueda colocar homogéneamente en todo el espacio anular.

Sin embargo, si el bombeo no se realiza adecuadamente, las condiciones de adherencia entre tuberías y tubería-formación puede no adecuarse. Por eso, fue necesario realizar este cálculo, debido a que es afectado de manera directa por el reductor de fricción.

Figura 11 Reómetro



Prueba de sedimentación

La prueba de sedimentación es la que define la estabilidad de la lechada, que generalmente, si se utiliza mayor cantidad de agua para obtener la densidad deseada, así como la fluidez de esta, puede provocar sedimentación. Por eso, es muy importante realizar los cálculos adecuados para tener la mezcla de diseño.

Entre las pruebas realizadas a los aditivos se logran encontrar los porcentajes adecuados para una mezcla con densidad y resistencia a la compresión deseada. Esta supera las condiciones de la lechada original, lo que aumenta la resistencia a la compresión en menos tiempo.

Tratamiento de las muestras:

Para cada una de las cuatro mezclas de diseño no destructivas de lechadas de cemento se tomaron los datos de control como temperatura de diseño, presión de columna, densidad, tiempo bombeable, agua libre, control de filtrado, reología y sedimentación. Esto agregó las variables adicionales para un mejor cálculo y

diseño. El objetivo para modificar fue la densidad y resistencia a la compresión.

Las muestras se chorrearon en el sitio y se esperó a que tuvieran un grado de consistencia, mínimo 8 horas, de forma que no se lavaran por el fluido. Para poder desmontar e introducirlos en el recipiente de calentamiento, una vez teniendo consistencia los moldes en unas ocasiones se colocaron en la salida de agua termal (Figura 12 y la Figura 13) con temperaturas promedio de 62 °C. Sin embargo, por ser una salida de un satélite, en una ocasión el flujo de agua y la temperatura superaron los parámetros y alcanzaron temperaturas cerca de los 80 °C. Por lo tanto, después de este acontecimiento se continuó colocando los cubos en el recipiente con ambiente controlado, una vez que alcanzaban el tiempo de fragua correspondiente se enfriaban y se llevaban a la planta de concreto para realizar las pruebas.

Cada uno de los aditivos cumplió con la norma API y puede utilizarse a temperaturas máximas de 250 °C.

Figura 12 Toma de temperatura en muestras expuestas a fluido geotérmico



Figura 13 Muestras colocadas en salida de agua de yacimiento geotérmico a 63 °C

Diseño de la mezcla de la lechada y la resistencia de diseño

Las pruebas de cemento no destructivas se realizan para comparar con las cementaciones en los pozos, debido a que estas tienen que cumplir con un tiempo de fragua no mayor de 36 horas y con resistencias a la compresión según la norma API, no menor que 20.7 bar (300 psi). Si esto no se cumple, al trabajar en la tubería, esta por los efectos de contracción y elongación, puede presentar microfisuras y problemas de adherencia a corto plazo. Por lo tanto, es necesario contar con una continuidad de tiempo entre etapas de perforación y cementación, y los valores de pruebas destructivas indican el parámetro de tiempo en el que se alcanza la presión, de acuerdo con la norma.

Una vez que se obtuvieron los diseños, se realizaron las pruebas de tiempo bombeable y resistencia a la compresión en tiempos de 8, 16, 24, 36, 48 y 72 horas.

- a- Estos tiempos cumplen con los establecidos en las pruebas no destructivas. No se toman en cuenta especímenes de pruebas destructivas, debido a que las condiciones de cementación a fondo de pozo son muy diferentes a los parámetros superficiales.
- b- Para cada una de las pruebas se utilizó una temperatura estática de fondo de pozo, así como la presión ejercida por la columna, de acuerdo con la profundidad de diseño de pozo. Para esto se tomó en cuenta la posible salida de gases como CO₂ y H₂S.



Para este caso la norma API RP 10B indica que se deben realizar muestreos en cubos:

Se vierte la lechada en estudio en una serie de moldes, cubos de 2 pulgadas por lado y se los coloca en un baño de agua a la temperatura requerida por la prueba, estos pueden ser:

- a. Un recipiente a presión atmosférica para muestras a temperatura hasta de 80 °C (180° F).
- b. Un recipiente presurizable para muestras a temperaturas hasta de 190 °C (463 ° K) y presiones hasta de 20.69 MPa (3000 psi). Por supuesto que éste es más caro, pero por otro lado es muy superior, ya que nos permite simular las condiciones del pozo durante el ensayo (American Petroleum Institute, 2013 b, s. p.).

Los tiempos recomendados para sacar las muestras son: 18, 24, 36, 48 y 72 horas (Modulo 1: cementos petroleros características y análisis – Unidad 2: Análisis y ensayos de los cementos y lechadas). Estas muestras se prueban en la máquina de falla a una velocidad de compresión de 69 kg/cm² (1000 psi) por minuto o 276 kg/cm² (4000 psi) por minuto. Según la dureza de la muestra se utiliza la menor velocidad y si ya se nota más consistente la segunda.

El total de muestras es de 15 por tiempo de fragua, por lo que por muestra serían entre 60 y 75, para un total de 300 muestreos.

- c- Para estas pruebas se analizó la muestra base que contenía bentonita al 1 % y 2 % y esferilita al 10 y 15 % y se analizó con esferilita al 10 % y al 15 %. Lo anterior para corroborar la densidad y mayor resistencia a la compresión.

Por consiguiente, se obtuvieron diferentes resultados para cada uno de los análisis, variando mucho la resistencia a la compresión inicial.

- d- Se analizaron pruebas físicas de los aditivos debido a que por ser de esta compañía tienen compatibilidad entre estos.

Figura 14 Llenado de moldes



Figura 15 Fin de llenado de moldes



Se llevó a cabo el análisis de las lechadas en forma no destructiva y destructiva, para analizar el comportamiento de la lechada, tanto en la parte superior como en la inferior, porque la temperatura no es constante a lo largo de la columna de pozo.

- a) Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión no destructivas para el diseño de lechadas según la norma API 10 A y 10 B.

- b) Los tiempos para las pruebas llevan los controles de las resistencias a 16, 24, 36, 48 y 72 horas según la norma API. Con los resultados se elaboraron cuadros comparativos y gráficos que permitieron la interpretación visual de los datos.

Una vez teniendo todos los datos, se procedió con el análisis de los resultados, de tal forma de lograr tener los datos procesados y listos para las conclusiones de este trabajo, que sería el cuarto objetivo.

Tratamiento estadístico:

La información obtenida se analiza en un estudio estadístico para darle validez a los resultados. Para esto, se utiliza como método la estadística descriptiva, lo que incluye la desviación estándar, media, coeficiente de varianza y promedios.

Además, se realiza un análisis de varianza de dos factores, lo cual trata de probar la hipótesis en el que las medias de dos o más poblaciones son iguales.

La técnica de análisis de varianza (ANOVA) también conocida como análisis factorial y desarrollada por Fisher en 1930, constituye la herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores (cada uno con dos o más niveles) sobre la media de una variable continua. Es por lo tanto la prueba estadística a emplear cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos. Esta técnica puede generalizarse también para estudiar los posibles efectos de los factores sobre la varianza de una variable (Amat, 2016, párr. 1).

Asimismo, IBM Corporation (2021) menciona:

“El Análisis multivariante de varianza (MANOVA) proporciona un análisis de regresión y un análisis de varianza para variables dependientes múltiples por una o más covariables o variables de factor. Las variables de factor dividen la población en grupos”.

Utilizando este procedimiento de modelo lineal general, es posible contrastar hipótesis nulas sobre los resultados obtenidos (s. p.).

Equipos que se utilizan

Equipo para realizar la prueba mediante el método no destructivo

Se utiliza un analizador ultrasónico de cemento (ver Figura 16).

Este nos permitió determinar el tiempo en el que la lechada de cemento fraguada alcanza los 3.5 MPa (500 psi) de resistencia a la compresión que es lo que recomienda el API para poder avanzar en las operaciones de un pozo.

El equipo emite una onda ultrasónica a través de la lechada, por lo que existirá un tiempo de viaje de esta, la cual se tardará más tiempo en viajar mientras el cemento se encuentra fluido, pero a medida que el cemento adquiere consistencia la onda viajará mucho más rápida. Los datos son enviados a un *software* el cual mediante correlaciones emite valores de tiempo en función de la resistencia a la compresión (Román Castro, 2022, s. p.).

Figura 16 Unidad ultrasónica de resistencia a la compresión ensayo no destructivo

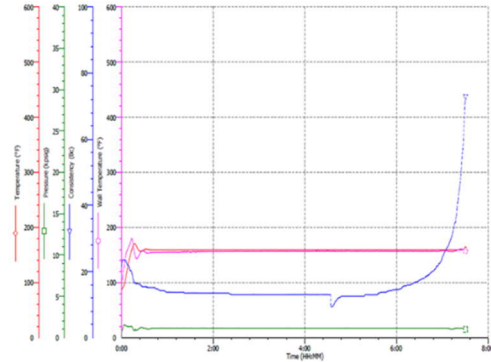


Figura 17 Consistómetro presurizado



Consistómetro presurizado.

Según Macías Aráuz (2007):

El consistómetro presurizado es un equipo que contiene una celda cilíndrica en su interior para colocar la lechada de cemento; esta se mantiene con un movimiento rotativo; provisto de un equipo de paletas fijas, todo el contenido se encuentra en una cámara de alta presión. El consistómetro está provisto con instrumental calibrado para trabajar hasta 40.000 PSI y 600°F, se emplea en los ensayos de tiempo de espesamiento para medir el tiempo durante el cual una lechada en particular permanece en estado fluido bajo ciertas condiciones de laboratorio que simulan las condiciones de pozo.

Estas pruebas resultan de utilidad al comparar varios cementos de pozos petroleros (s. p.).

Consistómetro de presión atmosférica.

Macías Aráuz (2007) indica lo siguiente:

El consistómetro de presión atmosférica, es un aparato en el cual se vierte la lechada de cemento dentro de una celda.

En su parte interior contiene una paleta, que servirá para mantener en movimiento a la lechada de cemento.

El equipo, calibrado a una temperatura comprendida entre 32°C y 200°C, se mantiene calentando aproximadamente por unos 20 minutos; se utiliza para acondicionar lechadas, para realizar los ensayos destinados a determinar la cantidad de agua libre existente en una lechada, esta no debe ser mayor al 5% en la lechada de relleno (superficial) y en la lechada de cola (fondo) al 3%, así como también la cantidad de pérdida por filtrado y las propiedades reológicas de una lechada (s. p.).

Figura 18 Consistómetro atmosférico



Obtención de resultados en prueba de pérdida de filtrado de acuerdo con Hernández Pérez y Ortiz Gómez (2011):

Una vez obtenidas las reologías, podemos realizar la prueba de pérdida de filtrado, utilizando el filtro prensa Fann, en donde se vació la lechada dentro de la copa hasta

la marca establecida, posteriormente se selló y se presurizó con nitrógeno.

De acuerdo con los datos del pozo se obtienen la temperatura y presión que juegan un papel importante para la realización de la prueba de tiempo bombeable (s. p.).

Figura 19 Prensa filtro



Viscosímetro

El viscosímetro Fann es un instrumento versátil que se utiliza en el laboratorio para efectuar ensayos de viscosidad en una posición neutral para determinar la gelificación tixotrópica de los fluidos de perforación, es decir, su reología. Según Villa (s. f.):

Este módulo se usa para evaluar los fluidos tales como fluidos plásticos Bingham. El modelo de la serie 35 es una versión de seis velocidades que se emplea para hacer ensayos a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm sin detener la rotación, se lo hace a temperatura ambiente.

Muestra el esfuerzo de corte continuamente en una escala graduada y permite observar características de viscosidad en función del tiempo (s. p.).

Propiedades fisicoquímicas

- Densidad (gr/cm^3): sirve para mantener estables los fluidos de la formación.
- Viscosidad Marsh (viscosidad de embudo), segundos/lt: sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua.

- c) Viscosidad plástica, centipoises (cps): es la resultante de la fricción mecánica entre sólidos-sólidos. Depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido.
- d) Punto de cedencia (lb/100 ft²): es la fuerza de atracción entre las partículas, en condiciones dinámicas. Una baja viscosidad plástica y un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del agujero.
- e) Resistencia de gel (lb/100 ft²): “Es una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Está relacionada con la capacidad de suspensión del fluido” (González Vivas, 2016, s. p.).
- f) Filtrado API (ml/30 min) a 6.89 bar (100 psi) y 68.90 bar (1000 psi), temperatura ambiente Indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del enjarre hacia las formaciones permeables.

Figura 20 Esquema de cementación de pozo

Esquema de cementaciones

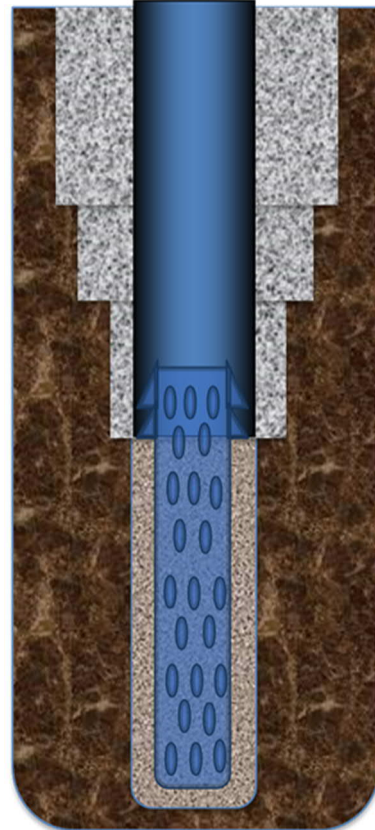
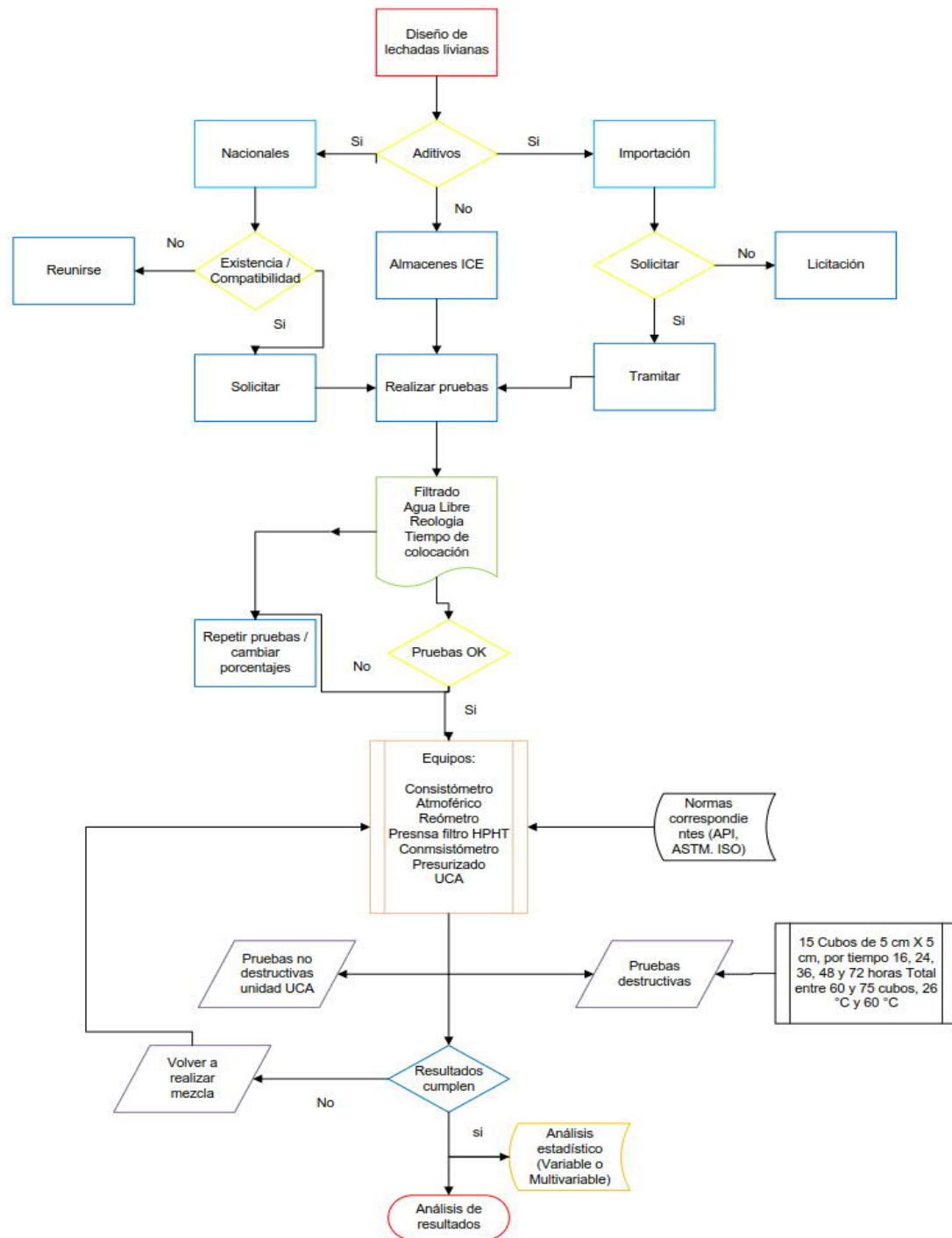


Diagrama #1 Proceso de metodología del diseño de la mezcla



Resultados

Para el proceso de las pruebas se entra en preparación y dosificación de los aditivos. Esto con el fin de ajustar los porcentajes para que den entre los parámetros necesarios para aplicarse en la cementación si los resultados señalan datos confiables para el tratamiento de esta.

Como solo se contaba con 5 moldes de 3 cubos cada uno, es decir, un total de 15 cubos, se preparó la muestra y se colocó de acuerdo con el procedimiento de mezclado establecido.

De acuerdo con lo anotado en la metodología, para el primer objetivo que era “Determinar el cumplimiento de las condiciones necesarias para el diseño de mezcla de lechadas de los aditivos, tanto, nacionales como internacionales”, las compañías nacionales no tenían aditivos para poder utilizarse con cementos tipos petroleros y para condiciones de temperatura y presión de trabajo que se requería, por lo tanto, se procedió a trabajar con los aditivos que se tenía en bodegas y realizar las pruebas necesarias para optimizar los porcentajes de uso para las condiciones de pozo, objetivo #2

Posteriormente se inició con el proceso de pruebas de resistencia a la compresión, para corroborar si la mezcla cumplía con los parámetros mínimos requeridos en el objetivo #3

Al iniciar, fallaron 3 cubos por tiempo de fragua de una sola mezcla. Sin embargo, los datos que se obtuvieron eran muy diferentes entre sí, por lo que se aumentó a 15 cubos por muestra y por tiempo de fraguado, donde los rangos eran de 16, 24, 36, 48 y 72 horas, por lo cual, el tiempo para tener los resultados se incrementó.

Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de lodos y cementos de la Unidad de Ingeniería de Perforación.

Al inicio de las pruebas se utilizaba la máquina de prueba de cubos del laboratorio de lodos y cementos de Ingeniería. Sin embargo, esta presentó un problema con una tarjeta electrónica, por lo que fue necesario suspender las pruebas y buscar un laboratorio de cementos donde se contara con una máquina disponible para el fallo de cubos.

Después de tener el sitio disponible, se dio a la tarea de buscar la forma de poner las muestras a temperatura de 60 °C de curado API RP 10 B, sección 7.4.3. Por lo tanto, se adquirió un recipiente, el cual controla la temperatura del agua sin entrar en contacto directo con la base, logrando mantener por tres días la temperatura.

Por otro lado, se encontró un lugar donde se tenía flujo de agua geotérmica con temperatura constante a 60 °C. Esto se aprovechó para colocar los moldes y recolectar, de acuerdo con el tiempo para realizar las pruebas de fallado de cubos.

Una de las condiciones principales para este proyecto era diseñar la mezcla liviana y sin bentonita, verificando una mejora en la resistencia a la compresión. Debido a que la lechada base con 1 % a 2 % de bentonita (extendedor) no alcanzaba resistencias a la compresión aceptables y diera problemas futuros con el estado mecánico del pozo.

Esta condición se da porque cuando se baja la tubería de revestimiento, esta alcanza un peso colgado de 96.4 t para la que quedaba a 950 m.

El valor de flotación es $VF = 1 - \text{densidad del fluido (lb/gal)} / 65.5$

Nota: 65.5 es la densidad del acero

Por esto, VF para una lechada de $1,62 \text{ gr/cm}^3$ (13,5 lb/gal) =

$$VF = 13,5/65,5 = 0,7939$$

Si se multiplica el peso total por el VF, el peso flotado es de:

$$\text{Peso total} = 96,4 \times 0,7939$$

$$\text{Peso total flotado} = 76,53 \text{ t}$$

Si se tiene un cemento con una densidad de $1,87 \text{ gr/cm}^3$ ($15,6 \text{ lb/gal}$) el $VF = 0,23$.

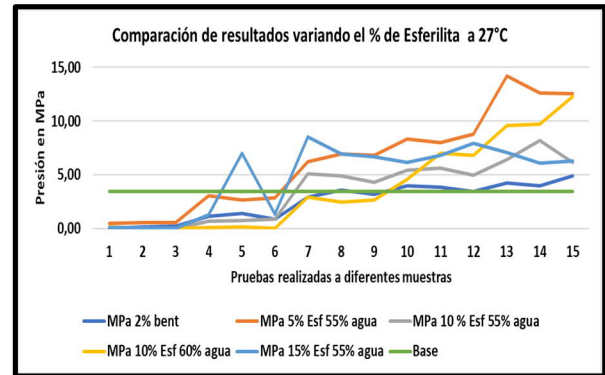
Entonces el peso total flotado de toda la longitud de la tubería es $= 96,4 \times 0,23 = 22,95 \text{ t}$. Por esto, se debe tener mucho cuidado al cementar, porque si el VF tiende a ser 0, el cemento puede levantar la tubería y tender a sacarla.

Volviendo al punto anterior, cuando se cementó el peso de la tubería una vez colocado el cemento tendría una tensión de casi 77 t. Cuando el cemento haya terminado el tiempo de fragua y sea necesario cortar la tubería para continuar con el proceso de perforación, esta tenderá a contraerse y si el cemento no tiene las características de compresión mínimas necesarias, pueden crearse microfracturas y presentarse problemas de canalización y expansión térmica en la tubería.

Por eso, se realiza este proyecto para mejorar las condiciones de la lechada. Esto al aumentar su resistencia a la compresión en menor tiempo y determinar el tiempo óptimo para cortar y continuar con los trabajos de perforación.

Al considerar lo anterior, se toman como base los datos de la lechada utilizada anteriormente. Esto ayuda a comparar los datos anteriores a los que se obtienen con las pruebas y tomar las decisiones correspondientes. Para esto, se realizaron varias muestras, de tres cubos cada una de 5 cm por lado, y se obtuvo el siguiente resultado.

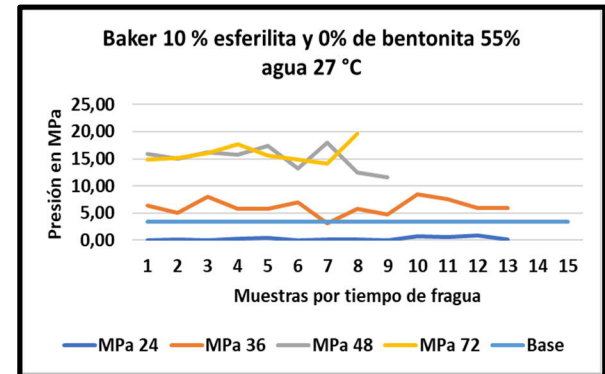
Figura 21 Pruebas de ensayos destructivos, realizadas utilizando diferentes porcentajes de aditivos



En la figura 21 se aprecia que, a temperatura ambiente, $27 \text{ }^\circ\text{C}$, las muestras no alcanzan datos confiables. Se puede apreciar que la muestra base con el 2 % de bentonita no supera los 5 MPa en las 72 horas, todas con densidades similares. Además, aunque se redujo a 0 % de bentonita no se logran alcanzar los datos por encima de la línea base, que son 10 MPa, entre las 48 y 72 horas.

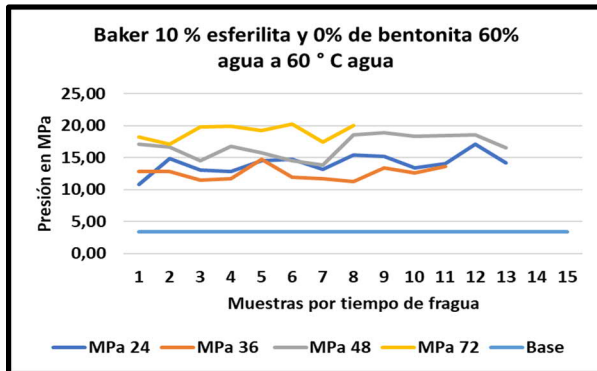
Para esta otra prueba se contó con 15 cubos por muestra al 10 % de esferilita y 0 % de bentonita.

Figura 22 Ensayos de pruebas de compresión con diseño 10 % esferilita, 0 % bentonita y a $27 \text{ }^\circ\text{C}$



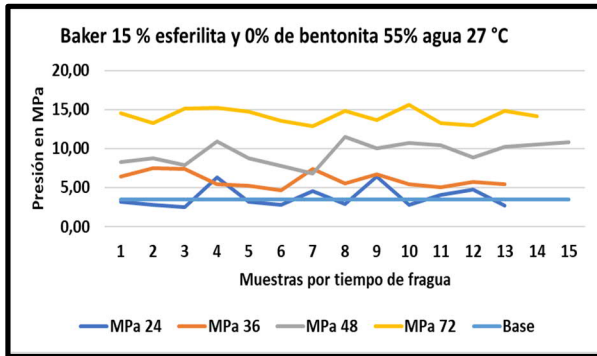
Como se observa, se logra alcanzar la resistencia a la compresión deseada después de las 48 horas.

Figura 23 Ensayos de pruebas de compresión con diseño 10 % esferilita, 0 % bentonita y a 60 °C



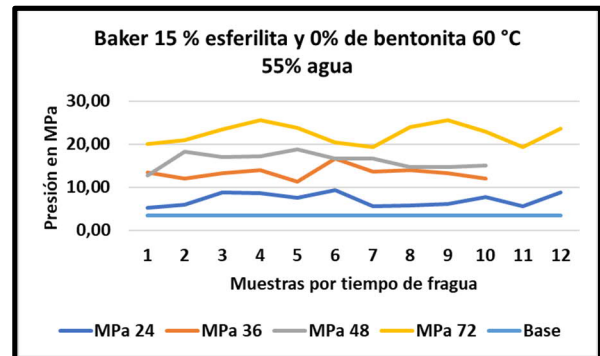
Asimismo, se logra alcanzar la resistencia deseada después de las 24 horas de realizar las pruebas.

Figura 24 Ensayos de pruebas de compresión con diseño 15 % esferilita, 0 % bentonita y a 27 °C



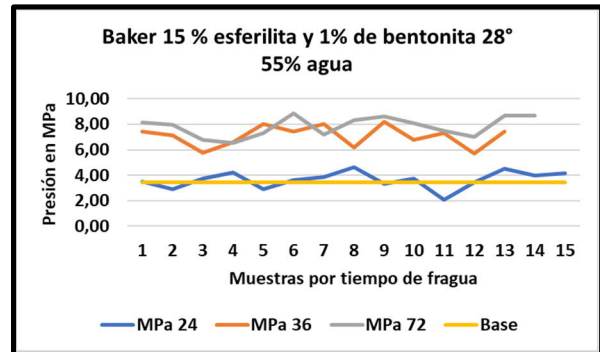
Para este otro caso se logran resultados similares en donde la resistencia a la compresión superior a los 10 MPa se obtiene después de las 48 horas. En este caso, se incrementa el porcentaje de esferilita al 15 %, por lo que también se incrementa el porcentaje de agua de la mezcla.

Figura 25 Ensayos de pruebas de compresión con diseño 15 % esferilita, 0 % bentonita y a 60 °C



Para este caso en donde se logra tener la muestra a 60 °C, pero con presión atmosférica, la resistencia deseada se logra después de las 24 horas. En la figura 26 se utiliza el mismo porcentaje de esferilita, pero se agrega 1 % de bentonita.

Figura 26 Ensayos de pruebas de compresión con diseño 10 % esferilita, 1 % bentonita y a 28 °C



Según la figura 26, ni al tener las 72 horas se logra alcanzar la resistencia a la compresión deseada. Por lo tanto, se observa que el uso de la bentonita altera por completo a corto plazo la resistencia a la compresión de la mezcla.

Para la parte estadística se presentaron algunas de las muestras que dan valores muy diferentes a los demás, tanto para arriba como para abajo. Por este motivo, para los gráficos anteriores no se consideraron entre los valores confiables, así como se presentan estos cuadros de pruebas no destructivas de las muestras bajo

diferentes condiciones de porcentaje de bentonita y esferilita.

Tabla 10 datos de prueba de cemento 15% esferilita 1% bentonita.

Tipo de mezcla	15% esf, 80% Agua, 1% bentonita	
Muestra	#1	#2
Filtrado (cm ³)	28	32
Agua libre (%)	0	0
Tiempo Bombeble (hr:min)	02:10	02:59
Reología		
Lectura 300	255	258
Lectura 200	190	198
Lectura 100	115	110
Viscosidad plástica (cp)	210	222
Punto de cedencia (lb/100 pie ²)	47,7	38,16
Resistencia a la compresión (MPa)	4,7	4,82
Densidad (gr/cm³)	1,56	1,56
Tiempo de prueba (hr)	24	45
Mezcla en condiciones, no muestra separación		

En esta mezcla se observa que la resistencia máxima a la compresión fue de 4.7 MPa en 24 horas siendo 3,5 MPa el mínimo, por lo que, bajo condiciones normales de pozo, la misma cumple

Tabla 11 datos de prueba 15 % esferilita y 1% bentonita

Tipo de mezcla	15% esf, 68% Agua, 1% bentonita	
Muestra	#1	#2
Filtrado (cm ³)	250	250
Agua libre (%)	0	0
Tiempo Bombeble (hr:min)	03:14	00:00
Reología		
Lectura 300	153	155
Lectura 200	110	112
Lectura 100	68	68
Viscosidad plástica (cp)	127	130,5
Punto de cedencia (lb/100 pie ²)	27	25,97
Resistencia a la compresión (MPa)	4,09	4,19
Densidad (gr/cm³)	1,67	1,67
Tiempo de prueba (hr)	45	45
0,05% menos de retardante, se revisa muestra, porcentajes similares a la anterior pero esta se deshidrata		

En esta mezcla, la lechada se deshidrató en menos de 5 minutos, aunque tuvo una resistencia a la compresión de 4,09 en 45 horas

Tabla 12 datos de prueba 5% esferilita 0% bentonita

Tipo de mezcla	5% esf, 55 % Agua, 0 % bentonita	
Muestra	#1	#2
Filtrado (cm ³)	40	44
Agua libre (%)	0	0
Tiempo Bombeble (hr:min)	03:30	03:32
Reología		
Lectura 300		
Lectura 200	260	245
Lectura 100	150	140
Viscosidad plástica (cp)	47,7	38,16
Punto de cedencia (lb/100 pie ²)	47,7	38,16
Resistencia a la compresión (MPa)	9,96	9,92
Densidad (gr/cm³)	1,8	1,8
Tiempo de prueba (hr)	72	72
Mezcla en condiciones, no muestra separación		

En esta no se utilizó bentonita, teniendo una mezcla sin sedimentación y con resistencia a la compresión de 7,55 MPa en 24 horas, aunque cumple con este valor, se tuvo que ajustar el porcentaje de reductor de filtrado y volver a realizar.

Teniendo los resultados, tanto de ensayos no destructivos como destructivos, continuamos con el análisis estadístico de todas las muestras destructivas realizadas.

Tabla 13 Condiciones de mezcla de laboratorio

REPORTE LABORATORIO CEMENTO (BH)					
Fecha inicio:	10-01-2023				
Fecha final:	18-01-2023				
Operación:	Lech Liviana; 15% esf, 80% agua, c/bentonita				
Preparación:	Laboratorio de fluidos de perforación				
Agua:	PGB 25				
Laboratorista:	Juan Jose Palacios/Orlando Hernández				
Temperatura de circulación, °C:	55				
Temp. estática de fondo, °C:	80				
DISEÑO DE LECHADA					
Material	Porcentaje %	Peso kg	Volumen l	Muestra 0,6L gr	Volumen cm ³
Cemento G	100,0	50,00	15,93	500,00	159,25
H. Silica	35,00	17,50	6,65	175,00	66,50
Esferilita	15,00	7,50	10,77	75,00	107,66
Latex	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bentonita	1,00	0,50	0,23	5,00	2,27
Static F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FP-6L	0,09	0,05	0,05	0,45	0,46
ASA-301L	0,55	0,28	0,30	2,75	3,01
Ultra-7	1,50	0,75	0,71	7,50	7,15
CD-32L	0,35	0,18	0,15	1,75	1,48
R-21L	0,30	0,15	0,13	1,50	1,29
Agua	80,00	40,00	40,00	400,00	400,00
Totales		116,90	74,91	1168,95	749,06
Rendimiento lech (L/saco):	74,91				
Densidad Lechada (lb/gal):	13,00				
Densidad Lechada (g/cm ³):	1,56				
Req. Agua (L):	40,00				

Tabla 14 Resultados de mezcla en laboratorio

Continuando con los resultados de la tabla anterior, donde se muestran los datos de reología, filtrado, resistencia a la compresión y tiempo bombeable.

RESULTADOS MUESTRA #1			
Reología			
Lect. 300 RPM		255	
Lect. 200 RPM		190	
Lect. 100 RPM		115	
Visc. Plast., cps		210	
Punto Ced., lb/100 p ²		47,70	
Permeabilidad de la lechada, cm³			
Filtrado, cm ³		28	
Agua Libre, %		0	
Consistencia			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont.
SP ₃ , °C		Tiempo 4, min	
SP ₄ , °C		Tiempo 5, min	
100 Bc, H:mm		2,10	
Resistencia a la compresión			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont
0,35 MPa, h:mm		4:17	
3,44 MPa, h:mm		12:21	
4,70 MPa, h:mm		24:00	
Comentarios:			
Lechada fluida, homogénea, no hay sedimentación			

RESULTADO MUESTRA #2			
Reología			
Lect. 300 RPM		258	
Lect. 200 RPM		192	
Lect. 100 RPM		110	
Visc. Plast., cps		222	
Punto Ced., lb/100 p ²		38,16	
Permeabilidad de la lechada, cm³			
Filtrado, cm ³		32	
Agua Libre, %		0	
Consistencia			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont.
SP ₃ , °C		Tiempo 4, min	
SP ₄ , °C		Tiempo 5, min	
100 Bc, H:mm		2:39	
Resistencia a la compresión			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont
0,35 MPa, h:mm		4:06	
3,44 MPa, h:mm		11:47	
4,19 MPa, h:mm		45:00	
Comentarios:			
Lechada fluida, homogénea, no hay sedimentación			

Gráfico 1 Comportamiento de compresión de la lechada en condiciones de simulación de pozo

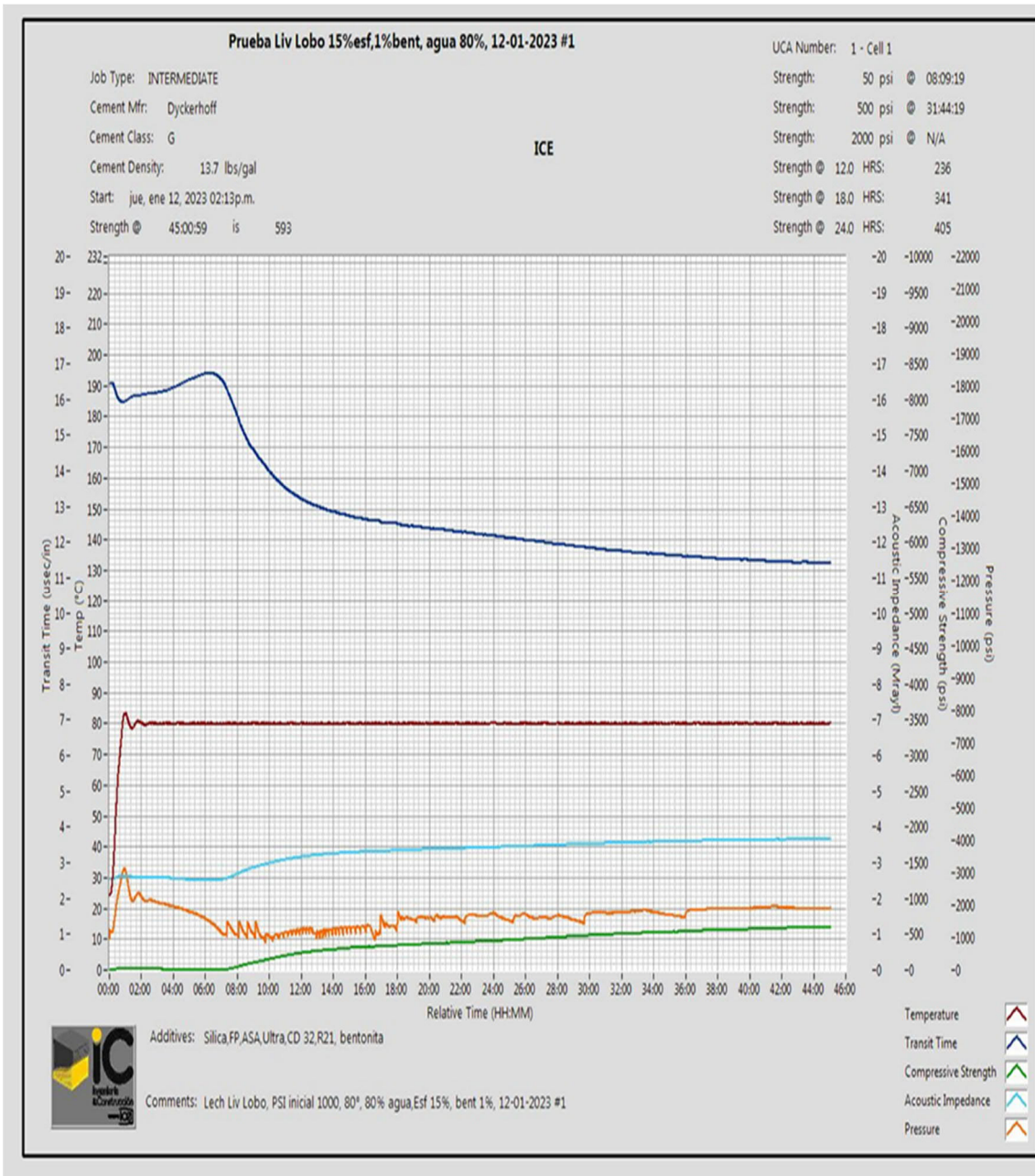


Tabla 15 Condiciones de lechada de cemento

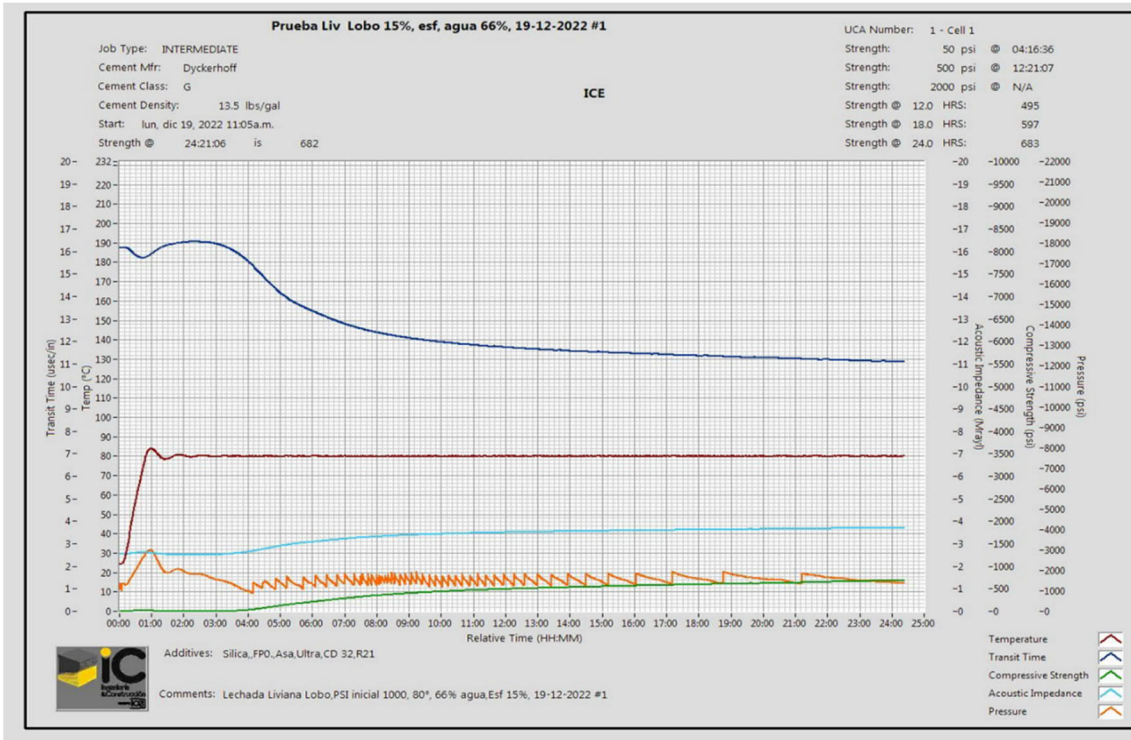
REPORTE LABORATORIO CEMENTO (BH)					
Fecha inicio:	19-12-2022				
Fecha final:	23-12-2022				
Operación:	Lech Liviana; 15% esf, 66% agua, c/bentonita				
Preparación:	Laboratorio de fluidos de perforación				
Agua:	PGB 25				
Laboratorista:	Juan Jose Palacios/Orlando Hernández				
Temperatura de circulación, °C:	55				
Temp. estática de fondo, °C:	80				
DISEÑO DE LECHADA					
Material	Porcentaje %	Peso kg	Volumen l	Muestra 0,6L gr	Volumen cm ³
Cemento G	100,0	50,00	15,93	500,00	159,25
H. Silica	35,00	17,50	6,65	175,00	66,50
Esferillita	10,00	5,00	7,18	50,00	71,77
Latex	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bentonita	1,00	0,50	0,23	5,00	2,27
Static F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FP-6L	0,09	0,05	0,05	0,45	0,46
ASA-301L	0,55	0,28	0,30	2,75	3,01
Ultra-7	1,43	0,72	0,68	7,15	6,82
CD-32L	0,30	0,15	0,13	1,50	1,27
R-21L	0,25	0,13	0,11	1,25	1,08
Agua	66,00	33,00	33,00	330,00	330,00
Totales		107,31	64,25	1073,10	642,42
Rendimiento lech (L/saco):	64,25				
Densidad Lechada (lb/gal):	13,91				
Densidad Lechada (g/cm ³):	1,67				
Req. Agua (L):	33,00				

Tabla 16 Resultados de la muestra

RESULTADOS MUESTRA #1			
Reología			
Lect. 300 RPM		153	
Lect. 200 RPM		110	
Lect. 100 RPM		68	
Visc. Plast., cps		127,5	
Punto Ced., lb/100 p ²		27,03	
Permeabilidad de la lechada, cm³			
Filtrado, cm ³	250 cm ³ en 5 min		
Agua Libre, %	0		
Consistencia			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont.
SP ₃ , °C		Tiempo 4, min	
SP ₄ , °C		Tiempo 5, min	
100 Bc, H:mm		3:14	
Resistencia a la compresión			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont.
0,35 MPa, h:mm		8:09	
3,44 MPa, h:mm		31:44	
4,08 MPa, h:mm		45:00	
Comentarios:			
Lechada fluida, homogénea, no hay sedimentación, se deshidrató en 5 min			

RESULTADO MUESTRA #2			
Reología			
Lect. 300 RPM		155	
Lect. 200 RPM		112	
Lect. 100 RPM		68	
Visc. Plast., cps		130,5	
Punto Ced., lb/100 p ²		25,97	
Permeabilidad de la lechada, cm³			
Filtrado, cm ³	250 cm ³ en 5 min		
Agua Libre, %	0		
Consistencia			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont.
SP ₃ , °C		Tiempo 4, min	
SP ₄ , °C		Tiempo 5, min	
100 Bc, H:mm		0:00	
Resistencia a la compresión			
Presión inicial, PSI		1000	
SP ₀ , °C	27	Tiempo 1, min	40
SP ₁ , °C	80	Tiempo 2, min	300
SP ₂ , °C	80	Tiempo 3, min	cont.
0,35 MPa, h:mm		7:10	
3,44 MPa, h:mm		31:17	
4,82 MPa, h:mm		45:00	
Comentarios:			
Lechada fluida, homogénea, no hay sedimentación, se deshidrató en 5 min			

Gráfico 2 Resultado de la resistencia a la compresión en condiciones de pozo



En estas dos gráficas se puede evidenciar que, aunque se tengan condiciones de presión y temperatura de pozo, la resistencia a la compresión alcanza los 3,4 MPa (500 psi), alrededor de las 40 horas. Por lo tanto, en esta

prueba se evidencia que el uso de la bentonita afecta directamente la fuerza compresiva, así como la capacidad de adherencia de la mezcla.

Figura 27 Pruebas realizadas a lechadas con el 1 % de bentonita para una cementación de pozo, hechas con aditivos de una marca, la cual presenta problemas de deshidratación, pero las demás características dentro del rango, por lo que no se puede utilizar por problemas de deshidratación.

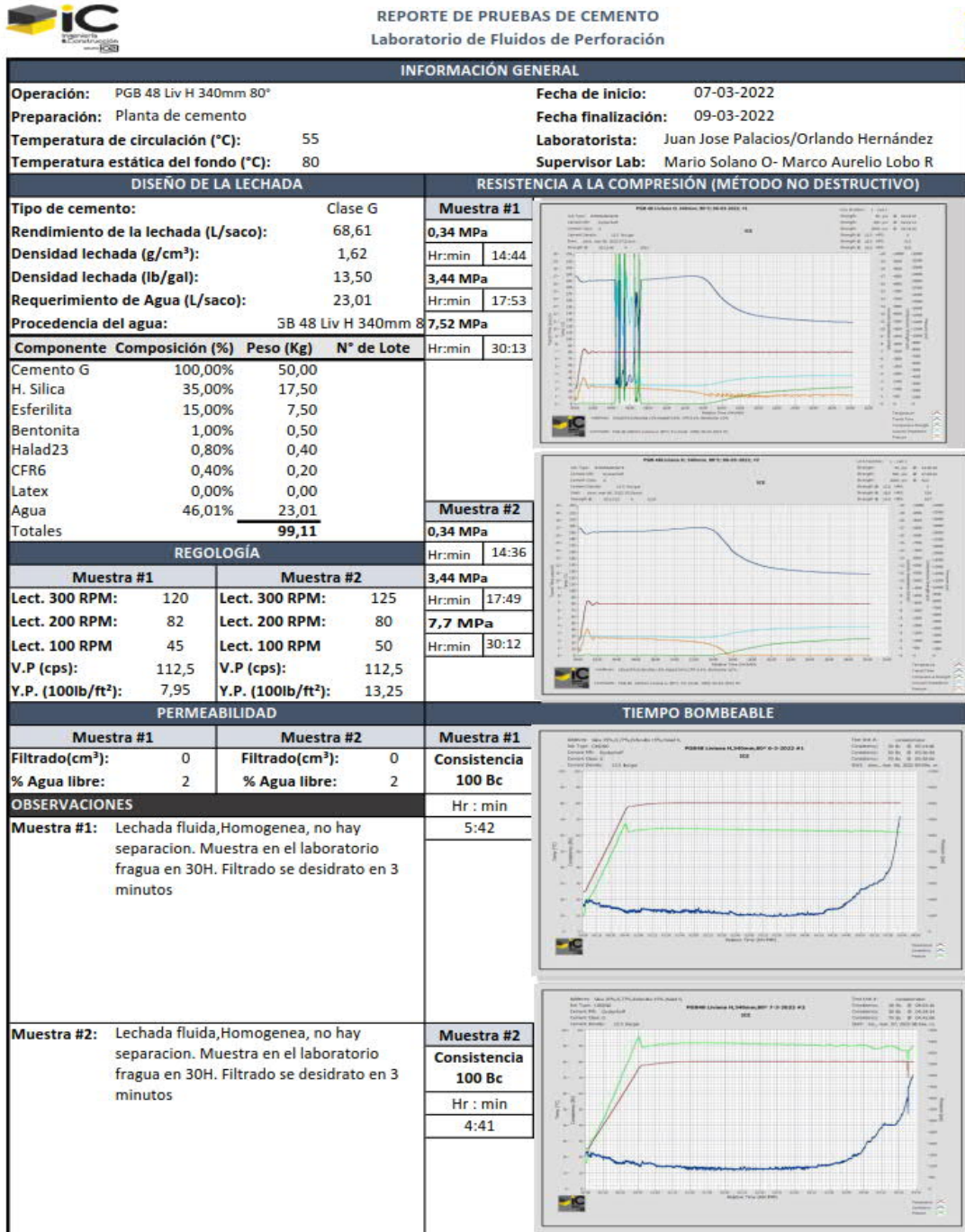


Figura 28 Prueba realizada con el 1 % de bentonita

INFORMACIÓN GENERAL			
Operación: Lechada Liviana BH 80°C, PGB #48		Fecha de inicio: 01-03-2022	
Preparación: Laboratorio de fluidos de perforación		Fecha finalización: 03-03-2022	
Temperatura de circulación (°C): 80		Laboratorista: Orlando Hernández Diaz/ Juan Jose Palac	
Temperatura estática del fondo (°C): 80		Supervisor Lab: Mario Solano/Marco Lobo R.	
DISEÑO DE LA LECHADA		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MÉTODO NO DESTRUCTIVO)	
Tipo de cemento:	Clase G	UCA Muestra #1	
Rendimiento de la lechada (L/saco):	67,78	0,34 MPa	
Densidad lechada (g/cm³):	1,62	Hr:min	10:43
Densidad lechada (lb/gal):	13,50	3,45 MPa	
Requerimiento de Agua (L/saco):	32,32	Hr:min	14:12
Procedencia del agua:	PGB	5,63 MPa	
Componente	Composición (%)	Peso (Kg)	N° de Lote
Cemento G	100,00%	50,00	
H. Silica	35,00%	17,50	
Esferilita	15,00%	7,50	
Latex	0,00%	0,00	
Bentonita	1,00%	0,50	
Static F	0,00%	0,00	
FP-6L	0,09%	0,05	
ASA-301L	0,40%	0,20	
Ultra-7	2,50%	1,25	
CD-32L	0,42%	0,21	
R-21L	0,25%	0,13	
Agua	64,64%	32,32	
Totales		109,65	
REGOLOGÍA		UCA Muestra #2	
Muestra #1	Muestra #2	0,34 MPa	
Lect. 300 RPM: 245	Lect. 300 RPM: 242	Hr:min	9:42
Lect. 200 RPM: 170	Lect. 200 RPM: 160	3,45 MPa	
Lect. 100 RPM: 95	Lect. 100 RPM: 92	Hr:min	12:32
V.P (cps): 225	V.P (cps): 225,0	6,32 MPa	
Y.P. (100lb/ft²): 21,20	Y.P. (100lb/ft²): 18,02	Hr:min	30:00
PERMEABILIDAD		TIEMPO BOMBEABLE	
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #1	
Filtrado(cm³): 88	Filtrado(cm³): 86	Consistencia	
% Agua libre: 0	% Agua libre: 0	100 Bc	
OBSERVACIONES		Hr : min	
Muestra #1: Lechada fluida, no se observo separacion.		5:00:36	
Muestra #2: Lechada fluida, no se observo separacion, fraguo en +- 15,0 Hr..		Muestra #2	
		Consistencia	
		100 Bc	
		Hr : min	
		6:03:17	

Prueba realizada con 1 % bentonita, 80 °C y de la segunda compañía, lo que da buenos resultados a las 30 h alcanza las 6,3 MPa (917 psi), bajo condiciones normales de pozo.

Baker 15 % esferilita y 1% de bentonita 28° 55% agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	24	3,48	0,67	3,63	18,57	3,50	1,65
2		2,88				3,50	
3		3,77				3,50	
4		4,20				3,50	
5		2,88				3,50	
6		3,60				3,50	
7		3,88				3,50	
8		4,64				3,50	
9		3,32				3,50	
10		3,72				3,50	
11		2,05				3,50	
12		3,43				3,50	
13		4,52				3,50	
14		3,96				3,50	
15		4,15				3,50	
1	48	7,44	1,09	6,80	16,04	3,50	1,65
2		7,16				3,50	
3		5,80				3,50	
4		4,68				3,50	
5		6,60				3,50	
6		8,04				3,50	
7		7,44				3,50	
8		8,04				3,50	
9		6,16				3,50	
10		5,15				3,50	
11		8,24				3,50	
12		6,76				3,50	
13		7,33				3,50	
14		5,72				3,50	
15		7,44				3,50	
1	72	8,16	1,67	7,84	21,28	3,50	1,65
2		8,00				3,50	
3		6,76				3,50	
4		6,57				3,50	
5		7,33				3,50	
6		8,85				3,50	
7		7,20				3,50	
8		4,28				3,50	
9		8,33				3,50	
10		8,60				3,50	
11		8,08				3,50	
12		7,52				3,50	
13		12,24				3,50	
14		7,04				3,50	
15		8,68				3,50	

Promedio	3,63
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	0,67
Valor superior	3,97
Valor inferior	3,29

Promedio	6,80
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	1,09
Valor superior	7,35
Valor inferior	6,25

Promedio	7,84
Muestra	15
Alfa	0,05
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	1,67
Valor superior	8,69
Valor inferior	7,00

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 60% agua a 60 ° C agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	24	9,08	2,33	13,43	17,33	3,50	1,72
2		10,79				3,50	
3		14,92				3,50	
4		13,04				3,50	
5		12,92				3,50	
6		14,52				3,50	
7		14,72				3,50	
8		13,16				3,50	
9		15,44				3,50	
10		15,20				3,50	
11		8,72				3,50	
12		13,41				3,50	
13		14,14				3,50	
14		17,16				3,50	
15		14,20				3,50	
1	36	12,92	1,06	12,60	8,40	3,50	1,72
2		12,88				3,50	
3		11,47				3,50	
4		11,76				3,50	
5		14,72				3,50	
6		12,00				3,50	
7		11,76				3,50	
8		11,32				3,50	
9		13,47				3,50	
10		12,64				3,50	
11		13,64				3,50	
1	48	17,16	2,17	16,18	13,43	3,50	1,72
2		16,72				3,50	
3		14,52				3,50	
4		11,88				3,50	
5		19,21				3,50	
6		16,76				3,50	
7		15,80				3,50	
8		14,56				3,50	
9		13,84				3,50	
10		18,56				3,50	
11		18,88				3,50	
12		18,40				3,50	
13		18,52				3,50	
14		18,60				3,50	
15		16,52				3,50	
1	72	23,53	3,34	18,72	17,85	3,50	1,72
2		18,20				3,50	
3		17,08				3,50	
4		19,84				3,50	
5		19,92				3,50	
6		19,28				3,50	
7		20,28				3,50	
8		17,44				3,50	
9		13,16				3,50	
10		23,48				3,50	
11		13,72				3,50	
12		23,12				3,50	
13		20,01				3,50	
14		14,12				3,50	

Promedio	13,43
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	2,33
Valor superior	14,61
Valor inferior	12,25

Promedio	12,60
Muestra	11
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	1,06
Valor superior	13,22
Valor inferior	11,97

Promedio	16,18
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	2,17
Valor superior	17,27
Valor inferior	15,08

Promedio	18,72
Muestra	14
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	3,34
Valor superior	20,47
Valor inferior	16,97

Baker 15% esferilita y 0% de bentonita 60° C, 55% agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	24	5,33	1,74	7,67	22,65	3,50	1,65
2		6,04				3,50	
3		8,89				3,50	
4		8,64				3,50	
5		10,00				3,50	
6		10,00				3,50	
7		7,64				3,50	
8		9,33				3,50	
9		5,56				3,50	
10		5,77				3,50	
11		6,24				3,50	
12		7,81				3,50	
13		5,68				3,50	
14		9,29				3,50	
15		8,81				3,50	
1	36	12,77	2,24	15,53	14,42	3,50	1,65
2		18,33				3,50	
3		17,04				3,50	
4		17,29				3,50	
5		13,37				3,50	
6		18,77				3,50	
7		16,64				3,50	
8		12,16				3,50	
9		14,81				3,50	
10		14,64				3,50	
11		15,04				3,50	
1	48	13,56	3,45	14,84	23,22	3,50	1,65
2		12,12				3,50	
3		13,28				3,50	
4		19,56				3,50	
5		14,08				3,50	
6		11,40				3,50	
7		20,41				3,50	
8		19,08				3,50	
9		16,64				3,50	
10		13,60				3,50	
11		9,43				3,50	
12		13,96				3,50	
13		13,36				3,50	
14		12,12				3,50	
15		20,01				3,50	
1	72	20,05	3,98	20,84	19,09	3,50	1,65
2		20,92				3,50	
3		15,36				3,50	
4		23,40				3,50	
5		25,57				3,50	
6		23,92				3,50	
7		20,41				3,50	
8		16,56				3,50	
9		19,32				3,50	
10		24,05				3,50	
11		25,57				3,50	
12		22,92				3,50	
13		19,44				3,50	
14		11,60				3,50	
15		23,61				3,50	

Promedio	7,67
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	1,74
Valor superior	8,55
Valor inferior	6,79

Promedio	15,53
Muestra	11
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	2,24
Valor superior	16,86
Valor inferior	14,21

Promedio	14,84
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	3,45
Valor superior	16,59
Valor inferior	13,10

Promedio	20,84
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	3,98
Valor superior	22,86
Valor inferior	18,83

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	24	3,20	1,35	3,78	35,77	3,50	1,65
2		2,80				3,50	
3		2,52				3,50	
4		6,32				3,50	
5		3,24				3,50	
6		2,80				3,50	
7		4,60				3,50	
8		2,87				3,50	
9		6,40				3,50	
10		2,84				3,50	
11		4,08				3,50	
12		4,72				3,50	
13		2,72				3,50	
1	36	6,40	0,98	6,00	16,40	3,50	1,65
2		7,48				3,50	
3		7,44				3,50	
4		5,48				3,50	
5		5,20				3,50	
6		4,64				3,50	
7		7,44				3,50	
8		5,51				3,50	
9		6,68				3,50	
10		5,48				3,50	
11		5,00				3,50	
12		5,76				3,50	
13		5,44				3,50	
1	48	8,28	1,41	9,48	14,87	3,50	1,65
2		8,76				3,50	
3		7,88				3,50	
4		10,95				3,50	
5		8,72				3,50	
6		7,81				3,50	
7		6,80				3,50	
8		11,47				3,50	
9		10,04				3,50	
10		10,68				3,50	
11		10,43				3,50	
12		8,85				3,50	
13		10,24				3,50	
14		10,56				3,50	
15		10,80				3,50	
1	72	14,52	0,92	14,18	6,49	3,50	1,65
2		13,24				3,50	
3		15,16				3,50	
4		15,24				3,50	
5		14,76				3,50	
6		13,52				3,50	
7		12,84				3,50	
8		14,80				3,50	
9		13,64				3,50	
10		15,56				3,50	
11		13,28				3,50	
12		12,96				3,50	
13		14,84				3,50	
14		14,12				3,50	

Promedio	3,78
Muestra	13
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	1,35
Valor superior	4,51
Valor inferior	3,04

Promedio	6,00
Muestra	13
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	0,98
Valor superior	6,53
Valor inferior	5,46

Promedio	9,48
Muestra	15
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	1,41
Valor superior	10,20
Valor inferior	8,77

Promedio	14,18
Muestra	14
Alfa	0,1
Intervalo de confianza	1,96
Desviación estándar	0,92
Valor superior	14,66
Valor inferior	13,70

Prueba base con 15 % esferilita, 2% de bentonita, 27 °C							
Muestra	Horas Curado	MPa	Desv Esta	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	18	0,00	0,11	0,12	86,96	3,50	1,69
2		0,18					
3		0,20					
4		1,12					
5	24	1,37	0,25	1,12	22,33	3,50	
6		0,87					
7		2,93					
8	36	3,61	0,34	3,25	10,46	3,50	
9		3,20					
10		3,96					
11	48	3,83	0,27	3,75	7,11	3,50	
12		3,45					
13		4,21					
14	72	3,98	0,50	4,37	11,33	3,50	
15		4,93					
Prueba base con 5 % esferilita, 0% de bentonita, 27°C							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	18	0,50	0,03	0,54	6,28	3,50	1,81
2		0,56					
3		0,56					
4		3,06					
5	24	2,69	0,18	2,87	6,39	3,50	
6		2,87					
7		6,25					
8	36	6,94	0,37	6,68	5,55	3,50	
9		6,84					
10		8,30					
11	48	8,03	0,37	8,37	4,45	3,50	
12		8,76					
13		14,23					
14	72	12,62	0,96	13,12	7,30	3,50	
15		12,52					
Prueba base con 10 % esferilita, 0% de bentonita, 60% agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	18	0,04	0,02	0,01	173,21	3,50	1,72
2		0,00					
3		0,00					
4		0,66					
5	24	0,77	0,10	0,76	12,47	3,50	
6		0,85					
7		5,12					
8	36	4,91	0,44	4,77	9,23	3,50	
9		4,27					
10		5,43					
11	48	5,60	0,34	5,32	6,40	3,50	
12		4,94					
13		6,40					
14	72	8,20	1,12	6,92	16,13	3,50	
15		6,15					
Prueba base con 10 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	18	0,15	0,08	0,06	121,85	3,50	1,70
2		0,00					
3		0,04					
4		0,08					
5	24	0,12	0,06	0,07	83,44	3,50	
6		0,01					
7		2,91					
8	36	2,46	0,23	2,68	8,45	3,50	
9		2,67					
10		4,55					
11	48	7,04	1,38	6,14	22,50	3,50	
12		6,84					
13		9,59					
14	72	9,75	1,50	10,53	14,24	3,50	
15		12,26					

Análisis de los resultados

Durante el proceso de las pruebas, como se comentó al principio, por razones de estar en un proceso de concurso para compra de aditivos para cementación de pozos, no fue posible solicitar el envío de aditivos con anticipación a diferentes casas internacionales, para evaluar cada uno de estos, hacer una comparación y tener un resultado todavía más investigativo en cuanto a la calidad de los aditivos. Esto porque al estar en proceso de recepción de ofertas y licitación, se puede interpretar que se estaría beneficiando algún proveedor, debido a que en los carteles de licitación se solicita el envío de aditivos para valorarlos.

Para el caso de las pruebas y análisis de los aditivos, se evidenció que es necesario contar con las herramientas y equipos adecuados, como una mezcladora de mayor capacidad, para realizar las pruebas de compresión destructivas. Además, adquirir cámaras de curado que simulen presión y temperatura, así como a presión atmosférica y temperatura ambiente, valorando todas las posibles causas de error en las pruebas. Lo anterior debido a que el volumen de la batidora alcanza solamente para mezclar máximo 600 g de cemento. Al llenar los cubos es necesario llevar a cabo tres veces la mezcla y en los aditivos líquidos, la medida en ml puede variar en una pequeña cantidad, lo que da campo a errores no voluntarios, como agregar un porcentaje un poco mayor al de diseño.

Por el momento, las pruebas realizadas son un inicio para mejorar el proceso de calidad en los acabados de pozo y que los problemas a corto y largo plazo sean reducidos sustancialmente.

Durante el proceso en el que se inició con las pruebas de resistencia a la compresión destructivas, en cubos de 5 cm x 5 cm, la máquina de prueba falló cuando una de las tarjetas se sobrecalentó. Esto produjo una ampliación del tiempo para desarrollar este estudio, por lo que es importante tener cualquier repuesto necesario para poner a trabajar estos equipos en caso de un inconveniente.

Los moldes utilizados en su totalidad son 5 para un total de 15 cubos, los cuales pueden ser una cantidad mínima para arrojar datos que sean comparativos. Para otro estudio de estas características es necesario contar con una cantidad adicional de estos para chorrear las muestras que se analizan el mismo día y que al realizar las pruebas correspondan a la misma muestra.

Para este ensayo se tenía que preparar una muestra para cada prueba. Por ejemplo, para realizar las muestras de 24, 36, 48 y 72 horas, se chorreaba una y hasta que esta presentara consistencia apropiada se podía desmontar para llevar a cabo la que seguía y así con las demás. Esto que incrementó también los tiempos de estudio en el muestreo y análisis.

En cuanto a los resultados, se puede identificar que, al utilizar la bentonita como aditivo, este afecta directamente las capacidades mecánicas del cemento, debido a que funciona como un extendedor (contaminante). Por lo que, puede afectar a corto plazo las capacidades mecánicas de los pozos, tendiendo a presentar más problemas e incrementar los costos por reparación.

En cuanto a los resultados de la lechada liviana sin uso de bentonita, al variar la esferilita entre el 10 % y 15 % se identifica que su resistencia de 10 MPa (500 psi) se alcanza después de las 48 horas a temperatura ambiente y en menos de 24 horas a temperatura de 60 °C.

Las temperaturas en el espacio anular no son constantes y entre más profundidad más caliente es. Por esto, al realizar las cementaciones, se debe contemplar un tiempo mínimo de 48 horas después de cada proceso de cementación para continuar con el siguiente paso. Esta condición se tiene que evaluar en las futuras intervenciones de pozo.

Otro punto, antes de realizar otro estudio como este, es contar con los aditivos de diferentes compañías en el sitio. Lo anterior con el fin de ahorrar tiempo de transporte y de

incorporación al país y que no se tengan procesos de licitación en el momento de realizarlo.

Los resultados en cuanto a las pruebas de pérdida de filtrado, agua libre, reología y tiempo de colocación con los porcentajes de aditivos establecidos trabajaron adecuadamente y tiene los valores entre los necesarios para un buen comportamiento de la lechada. Sin embargo, las características de la resistencia a la compresión varían considerablemente cuando las muestras se someten a temperatura. Esto también se relaciona con el porcentaje de reductor de tiempo de fragua, así como el uso de bentonita afecta incluso con exposición a temperatura los tiempos de fragua y, por ende, la capacidad de compresión de la muestra.

Las variantes en los demás datos como filtrado, agua libre y reología, son parte importante del estudio. Sin embargo, para este caso solo se tomaron estos valores de tiempo bombeable, resistencia a la compresión y densidad.

Si cambia alguna de estas características afecta directamente la capacidad de la lechada. Con estas pruebas se ha podido demostrar que la bentonita afecta de manera directa la capacidad de la resistencia a la compresión en corto plazo, lo que afecta la adherencia y lo que ayuda a la formación de microfisuras, en los pozos geotérmicos afecta al no tener características de compresión deseadas, y por los procesos de cambios de temperatura que se dan así como la posibilidad de la formación de canales en la zona anular, permitiendo el ascenso de gas H_2S o CO_2 , afectando a largo plazo la degradación del cemento, provocando daños de salida de flujos geotérmicos por el espacio anular, y aumento en la elongación de la tubería, por reducción en la adherencia.

Para cada una de las muestras a 24, 36, 48 y 72 horas se moldearon 15 cubos de 5 cm x 5 cm. Sin embargo, en algunos se presentaron deformaciones o rupturas al desmontar, por lo que de las 15 se bajaba a 14, 13 u menor.

Es importante mencionar que en algunos casos los valores variaban, tanto para arriba como para abajo, afectando el promedio

recomendado. Por este motivo, estos no se tomaron para el análisis.

Al bajar la resistencia a la compresión, por ende, baja la resistencia a la tensión. Es muy conocido que el cemento no soporta tensión, por lo que su capacidad de tensión (adherencia) se reduce notablemente al bajar la compresión.

Aunque el uso de bentonita para reducir la densidad en cementación de pozos es muy utilizado en pozos petroleros, las condiciones de calidad en cementaciones de pozos geotérmicos pueden verse afectadas a corto y largo plazo. Al no utilizarla y verificando en las gráficas se tiene una ganancia en cuanto a la resistencia a compresión, lo que genera una mejor calidad en el proceso.

Análisis estadístico.

En cuanto al análisis estadístico, se valoran tres puntos importantes como:

1. Desviación estándar
2. Promedio de resistencia a la compresión.
3. Coeficiente de variación (CV).

El conjunto de estos tres puntos ayuda a identificar si los objetivos se cumplieron.

Se puede observar que la resistencia a la compresión varía notablemente con la exposición del cemento a la temperatura.

Cuando se desarrollan los procesos de cementación estos se deben ejecutar en una sola maniobra, es decir, toda la columna bombeada desde el fondo hasta la superficie.

Aunque la temperatura disminuye desde el fondo hasta la superficie, las condiciones de bombeabilidad para profundidades de 950 m no deben ser menores de 5 horas. Esto se debe a que, si se presenta algún inconveniente o problema en el equipo, se debe tener tiempo suficiente para continuar bombeando una vez reparado y desplazar, si fuese necesario, y que la mezcla se mantenga en condiciones reológicas y líquidas aceptables.

Es importante mencionar que, en los resultados de una misma muestra, se presentan datos dispersos, que varían, tanto hacia arriba como hacia abajo en la resistencia a la compresión. Como se mencionó en párrafos anteriores, la posible causa puede ser el proceso de llenado de los cubos, una pequeña variante en el porcentaje de los aditivos y al desmontar los cubos de los moldes.

En general, las muestras sometidas a temperatura de 60 °C con uso de bentonita al 1 % no alcanzan los valores de resistencia a la compresión de 10 MPa (500 psi) en 48 horas, menos todavía en 72 horas con temperatura de 26 °C.

Aunque su densidad sea cercana a los 1.56 gr/cm³ (13 lb/gal) de esta mezcla, la densidad alcanzada con la mezcla sin bentonita, pero con 15 % de esferilita alcanza los 1.62 gr/cm³ (13.5 lb/gal) y la resistencia a la compresión de 10 MPa (500 psi) se alcanza entre las 36 y 48 horas a 27 °C, mientras que las expuestas a temperatura de 60 °C la resistencia se alcanza entre las 18 y 24 horas.

Por lo tanto, las muestras de cemento con aditivos y sin bentonita, se aceptan para los procesos de cementación de pozos. Como, por ejemplo:

Figura # 29 Lechada base 15 % esferilita y 0% bentonita, temperatura 27 °C

Prueba base con 15% esferilita y 0% de bentonita 55% agua							
Muestra	Horas Fragua	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	18	0,10	3,55	0,07	5010,53	3,50	1,62
2		0,07					
3		0,04					
4	24	1,28	3,30	3,21	103,05	3,50	
5		7,02					
6		1,31					
7	36	8,51	0,99	7,38	13,43	3,50	
8		6,95					
9		6,67					
10	48	6,17	0,90	6,98	12,83	3,50	
11		6,83					
12		7,94					
13	72	7,08	0,53	6,48	8,23	3,50	
14		6,07					
15		6,29					

En el análisis se pueden observar las diferencias entre los coeficientes de variación y desviación estándar.

Hipótesis

El uso de la bentonita como aditivo extendedor en lechadas livianas afecta la resistencia a la compresión de la mezcla.

Primero, se realiza una comparación de las lechadas que se utilizan usualmente en cementación de pozos para partir del hecho que la resistencia a la compresión se ve reducida en la lechada de cemento al utilizar bentonita.

En este proceso, al verificar los valores de resistencia a la compresión en las mezclas que se utilizan se identifica que la mezcla tarda más tiempo en adquirir una resistencia a la compresión superior a los 10 MPa, después de 48 horas de fragua en pruebas no destructivas en condiciones de pozo.

Se realiza un cambio en la dosificación de los aditivos y se logra obtener una lechada de baja densidad de 1.65 gr/cm³, sin presentar sedimentación, sin utilizar bentonita y obteniendo resistencia a la compresión de 10 MPa en condiciones de temperatura de pozo alrededor de las 24 horas, mientras que con baja temperatura entre 36 y 48 horas.

Se puede apreciar que los valores de los resultados de las pruebas en algunos casos salen dispersos, como es el caso de la muestra #5 a 24 horas con 7 MPa, muestra #7 a 36 horas con 8,51 MPa. Esto se puede deber a las condiciones de mezclado en el sitio, debido a que no es un laboratorio como tal, sino que fue necesario adaptarlo para realizar las condiciones de mezclado.

Otro de los factores que pudo afectar en estos datos pudo ser que, para llenar los moldes, es decir, 15 cubos, era necesario hacer 3 mezclas, por el volumen de la batidora. Esto pudo afectar alguna condición de medida de alguno de los materiales mezclados.

También, las condiciones de curado, que no correspondían a un ambiente controlado, tanto a temperatura ambiente como temperatura de 60 °C.

Otro factor que pudo llevar a esta variación es el desmontaje de los cubos. Estos se debían

desarmar cuando las muestras presentaran consistencia, para mezclar las otras y esta condición físicamente pudo alterar las condiciones de resistencia.

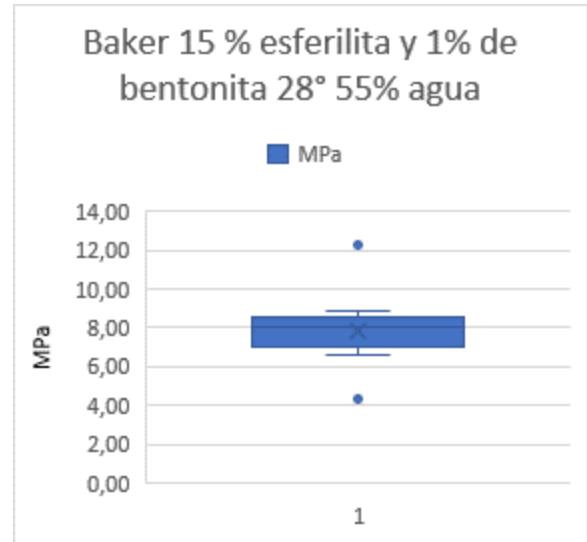
Sin embargo, los resultados son satisfactorios y, claramente, identifican que la bentonita afecta de manera directa la resistencia a la compresión.

En cuanto al análisis estadístico de las muestras tomadas, al no tenerse un parámetro de número de muestras necesarias para obtener un valor aceptable del promedio de la resistencia a la compresión según tiempo y diseño, se toma como base para este estudio un análisis no probabilístico. Lo anterior al no existir un procedimiento de acuerdo con la muestra que se seleccionó y que en los documentos que se mencionan como mínimo para muestreo en concreto es de 15 especímenes y para morteros de 3. Este es un valor aceptable en caso de presentarse un error del 25 %, así como tipo de muestreo finito, con un porcentaje de error del 3% , muestras 60 a 75 unidades, y un nivel de confianza de un 95%, **Metodología de la Investigación social cuantitativa, diseño de muestra página 15.**

En cuanto a los resultados y su análisis, se estimó un intervalo de confianza del 90 %, lo que equivale a un valor Z de 1.96. Con esto se toman entre los parámetros los valores más cercanos a la media. Esto ayuda a identificar los datos de falla, los cuales alcanzaron valores muy cercanos a la variable de la media.

Como los datos dependen del tiempo de fragua, diseño de mezcla, curado y temperatura, los parámetros por muestra dependen de las 24, 36, 48 y 72 horas de fragua. Es importante mencionar que, en alguno de los resultados, en los gráficos de cajas y bigotes, se evidencian datos que quedan fuera del área de los cuartiles, lo que demuestra un dato que ha salido de los parámetros en un rango aceptable, como la tabla "Baker 15 % esferilita y 1 % de bentonita 28° 55 % agua tercera tabla cubos a 72 horas".

Figura 30 Análisis cajas y bigotes lechada 15% esferilita y 1% bentonita a temperatura ambiente



En la figura 30 los dos datos que se salen de la secuencia, como los puntos 12.24 y 4.28,

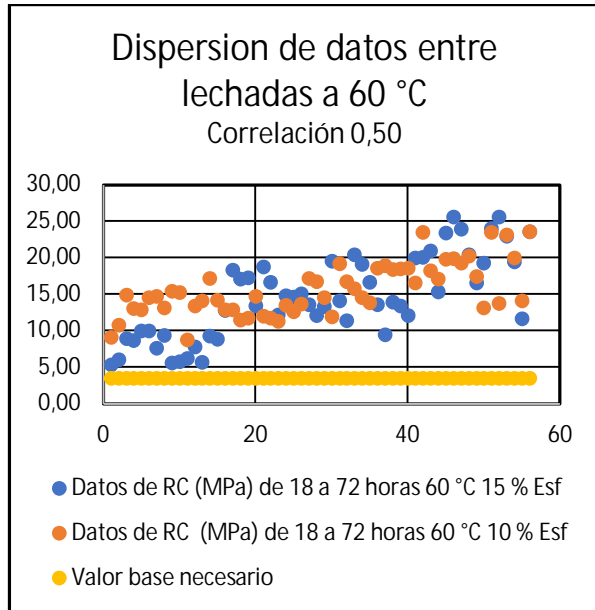
siendo el promedio 7.84, con un valor 1.5 mayor y mayor que el promedio. Por lo tanto, estos valores pueden ser un error al trabajar con el mezclado o con el proceso de llenado de los moldes.

Los porcentajes del coeficiente de varianza oscilan entre 8 % y 23 %. Esto indica que los datos varían alrededor de un 15 % en cuanto a la desviación estándar y el promedio.

Por otro lado, de los resultados se puede afirmar que están entre los valores esperados. En cada una de las pruebas no se pueden comparar los resultados por muestra, debido a que, para las diferentes horas de fraguado y temperatura, sus condiciones son distintas, por lo que se analizan sobre todo cuando las resistencias a la compresión sobrepasan los 10 MPa. En este punto se tiene lo recomendado según la norma.

En cuanto a la dispersión de datos:

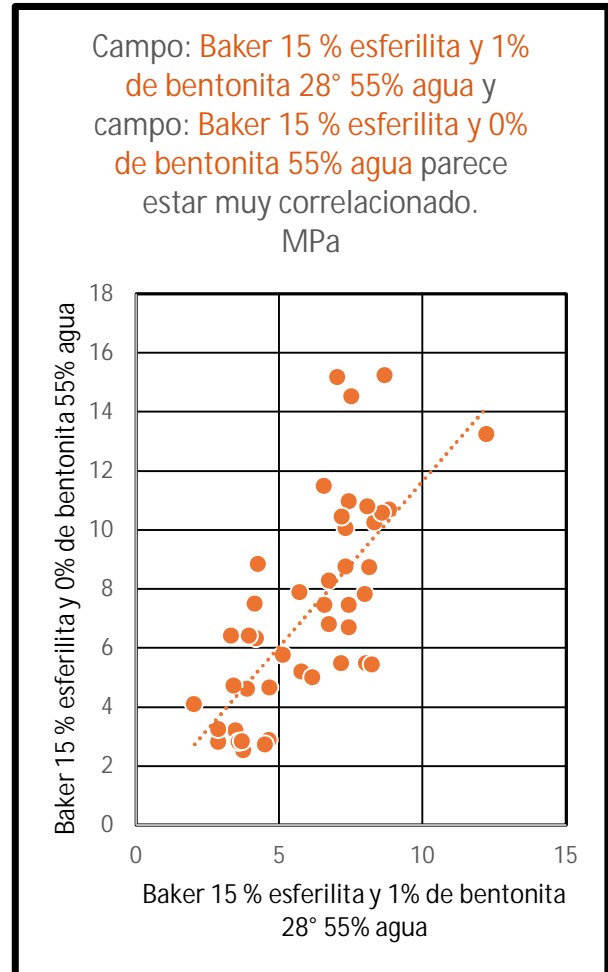
Figura 31 Análisis de dispersión de datos de lechadas al 10% y 15% de esferilita a 60 °C



Con lechadas con diferente porcentaje de esferilita, pero sometidas a la misma temperatura, presentan una correlación moderada positiva de 0.5, más cerca de +1, tendiendo a ser una correlación poco dispersa con relación a los resultados.

Para las muestras de lechadas con temperaturas de 28 °C se muestra a continuación la gráfica de correlación entre estas.

Figura 32 Correlación de 15 % esferilita al 0% y 1% de bentonita



Para la figura 32 donde las muestras se someten a temperaturas de 28 grados, los datos no se tienen tan dispersos, más bien se aprecia una gran correlación entre estos, al presentar un coeficiente de correlación del 0.7. Por este motivo, se considera que están muy relacionados entre sí, por lo que el proceso de muestreo y resultados se mantiene dentro de lo aceptable.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- En Costa Rica no se cuenta con proveedores nacionales que suministren los aditivos con características adecuadas para utilizar con los cementos tipo petroleros y ni en procesos de alta temperatura y presión en pozos geotérmicos.
- Los aditivos cumplieron con las expectativas acerca de su caracterización y porcentajes utilizados, ya que después de realizar varias pruebas con cambios en sus porcentajes se logra tener la combinación adecuada que nos dan los resultados de pruebas dentro de los parámetros requeridos para la cementación, de tal forma, que los valores de las pruebas no destructivas en el diseño previo de la lechada dieron resultados satisfactorios, como, por ejemplo.

Porcentaje agua libre = 0

Tiempo Bombeable \leq 6 hrs.

Pérdida de agua (filtrado) \leq 50

Resistencia a la compresión \geq 3.44 MPa en 24 hrs.

- El uso de la bentonita en las lechadas livianas como antisedimentante, afecta negativamente la capacidad de resistencia a la compresión, afectando las características mecánicas de estas, obteniendo resultados de resistencia a la compresión a 26 °C. < a 10 MPa en 72 hrs.
- Eliminar la bentonita y cambiarla por otros aditivos antisedimentantes, mejora positivamente la resistencia a la compresión de las lechadas livianas a corto plazo.
- En el análisis estadístico se determina que los especímenes evaluados sin bentonita tienen mejor resistencia a la

compresión tanto a 26 °C como a 60 °C de temperaturas.

Como se muestra en la figura 31 a las 72 horas superan los 20 MPa, mientras en las tablas 14 y 15, la resistencia no pasa los 5 MPa a las 45 horas con el 1% de bentonita a condiciones de pozo.

- El análisis de dispersión muestra que, aunque se presentan algunos datos fuera de los rangos mínimos y máximos con relación al promedio, como por ejemplo, en las tablas 40, 41 y 42 de la prueba "Baker 15 % esferilita y 1% de bentonita 28° C 55% agua", en Anexos, se observan a 24 horas 2,05 MPa muestra 11) mínimo y 4,64 MPa (muestra 8) máximo, con promedio 3,63 MPa, 48 horas 8,24 MPa (muestra 11) máximo y 5,15 MPa (muestra 10) mínimo con promedio 6,80 MPa, y a 72 horas 12,24 MPa (muestra 13) máximo y 4,28 MPa (muestra 8) mínimo con promedio 7,84 MPa, datos que se salen de los demás valores obtenidos, pero no se afectan los datos globales, teniendo un coeficiente de correlación de 0.7, por lo que el proceso se da como aceptable, sin embargo, para tener un mejor parámetro de comparación, podríamos utilizar las fórmulas y tablas de la especificación ACI 318-05S capítulo 5 y ACI 214RS-11.
- Los resultados obtenidos de agua libre 0% y filtrado < 50 cm³ son menores a los establecidos en La Norma API 10 A, B e ISO 10426, para el caso de geotermia por las condiciones de temperatura que se manejan, no se permite agua libre y el filtrado no mayor a 50 cm³.
- De las normas no hay una especificación para el número mínimo de cubos por mezcla de lechada, por lo que para tener un mejor parámetro de datos, se tomaron como mínimo 15 cubos por muestra, teniendo muestras a 18, 24, 36, 48 y 72 horas, siendo un parámetro de muestreo

dentro de lo establecido estadísticamente, por mezcla y por tiempo de fragua en horas, tomando entre 45 y 75 cubos por muestra.

- Tomando en consideración los resultados de compresión y tiempo bombeable, se deberán realizar los ajustes correspondientes para cada tipo y profundidad de pozo en cuanto al gradiente geotérmico, así como el porcentaje del reductor de tiempo de fragua, basado en la temperatura estática de fondo de pozo, debido a que, si no se consideran, los tiempos de espera por tiempo de fragua en zonas someras podrían ser mucho mayores.

- Tomando en cuenta que las mezclas se realizaron en una zona en donde las condiciones eran no controladas, los resultados obtenidos, reflejan datos de resistencia a la compresión dentro del rango, con resistencia a la compresión superior a los 3.44 MPa antes de las 24 hrs.
- Los gráficos de caja permiten visualizar mejor el comportamiento global de los datos, lo que permite verificar la varianza, pero no así la dispersión de estos o la tendencia.

Recomendaciones

1. Aunque con el trabajo se ha logrado evidenciar que con el diseño de una lechada liviana sin el uso de un extendedor como la bentonita se mejoran las condiciones de resistencia a la compresión, es recomendable seguir implementando en estudios de laboratorio de cementos, para mejorar las lechadas y los procesos de diseños de mezcla, tanto con ensayos no destructivos como destructivos. Esto reduce los tiempos no productivos por espera de fragua, excesivos en los pozos geotérmicos.
2. Por el momento no se cuenta con aditivos para cementación de pozos en geotermia en Costa Rica, por lo tanto, es recomendable tratar de tener un acercamiento con los proveedores de aditivos en el ámbito nacional y verificar la posibilidad de que ellos tengan de este tipo de aditivos a disposición nacional. Con esto se reducen los efectos de daño de aditivos por tiempo, así como la posibilidad de presentar problemas durante los procesos de cementación, eso también ayudaría a reducir los materiales en bodega y reducción de inventarios.
3. En relación con el cemento, es recomendable revisar en el ámbito nacional si existe la posibilidad de probar los cementos tipos V, VII y VIII y cuán económicamente aceptable es para las plantas nacionales producir la cantidad requerida. Con esto se pueden realizar los estudios necesarios y verificar si este tipo de cemento puede utilizarse en condiciones de temperatura, presión y ataque de gases como CO₂ y H₂S, para cementaciones geotérmicas. Para esta parte, se tendría que verificar si los cementos nacionales, junto con un aditivo que les ayude a mejorar la resistencia al ataque de los azufres y carbonatos, pueden tener un diseño aceptable en las lechadas de cemento, lo que puede producir un trabajo adicional a la investigación en este campo.
4. Otro punto importante para considerar es la implementación de un procedimiento para la toma de muestras durante los procesos de cementación. Se tiene todo el proceso antes de la cementación, pero no se da trazabilidad una vez realizado el proceso de las lechadas bombeadas.

5. Al realizar los cambios en los aditivos de cementación y mejorar las condiciones de la lechada, esta con un incremento del 15 % en la esferilita, se alcanzan resistencias a la compresión de 10 MPa (500 psi) entre 24 y 36 horas. Esto ayuda con la reducción de tiempos de espera para continuar con las labores de acabado de pozo y perforación.
6. Un control de calidad en la adherencia y colocación del cemento como es CBL (*cement bond logging*, por sus siglas en inglés), determina la calidad de la adherencia de la cementación. Una vez finalizado el proceso de cementación, es importante realizar una prueba de adherencia.
7. Aunque una vez realizadas las cementaciones es muy difícil repararlas, el control continuo de la expansión térmica de pozos ayuda a evaluar con el tiempo si las características del pozo se mantienen o degradan y poder planear una intervención de pozo para verificar su estado.
8. Es importante contar con cámaras de curado para realizar las pruebas destructivas en condiciones de pozo, valorando las condiciones de compresión de las lechadas de cemento.
9. Con estas condiciones de resultados se debe continuar con el análisis de los aditivos y mejora en control de calidad de las lechadas. Esto puede ser para utilizarlas en tapones de cemento y evitar canalización por H₂S y CO₂, de forma de asegurar una vida útil de pozo mayor y reducir los problemas futuros.
10. En Costa Rica no se tienen proveedores nacionales de aditivos que distribuyan los tipos necesarios para este proceso. Por lo tanto, se debe mantener en bodega por periodos de uno a 2 años los aditivos necesarios para la cementación de pozos y sacar a concurso de manera constante su compra. Sin embargo, se ha tenido un acercamiento con los proveedores de aditivos para ver la posibilidad de suministrarlos en el ámbito nacional, lo que solucionaría el problema de almacenamiento y deterioro por tiempo de bodega.

Referencias bibliográficas

- American Concrete Institute. (2005). *ACI 318S-05, Requisitos de Reglamento para concreto Estructural*.
- American Concrete Institute. (2017). *ACI 214RS-11, Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto*.
- Adriano Santos, L. (2018). *Diseño de lechadas de cemento y operaciones de cementación de pozos*.
<https://pdfcookie.com/documents/pdfcookie-j26751yrdpl4>
- Amat Rodrigo, J. (2016). *ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias*.
https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova
- American Petroleum Institute. (2005). *API 10 A/ISO 10426-1, Specification for Cements and Materials for Well Cementing*, Twenty-third Edition.
- American Petroleum Institute. (2013a). *API 10 B-2. Recommended Practice for Testing Well Cements*, 2nd Edition.
- American Petroleum Institute. (2013b). *API RP 10 B-2. Recommended Practice for Testing Well Cements*, 2nd Edition.
- American Petroleum Institute. (2022). *API SPEC 10 A. Cements and Materials for Well Cementing*, 25th Edition.
- ASTM International. (2022). *Designación: E11 20. Especificación estándar para tela de tamiz de prueba de alambre tejido y tamices de prueba*.
<https://www.studocu.com/co/document/universidad-del-norte-colombia/mecanica-de-suelos/standard-specification-for-woven-wire-test-sieve-cloth-and-test-sievesenes/37534862>
- Baroid. (s. f.). *Manual de fluidos de perforación*.
<https://es.scribd.com/document/46471324/Manual-de-Fluidos-de-Perforacion-BAROID>
- Carrasco Avendaño, J. (2020). *Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/155554/Carrasco%20-%20Modelos%20predictivos%20aplicados%20a%20la%20resistencia%20a%20compresi%c3%b3n%20del%20hormig%c3%b3n%20de%20un%20proyect....pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Ceballos, S. (2018). *Desafíos de la perforación de pozos geotérmicos en la cordillera occidental de los andes ecuatorianos*.
<https://1library.co/document/y4w473kq-desafios-perforacion-pozos-geotermicos-cordillera-occidental-andes-ecuatorianos.html>
- Cemex. (s. f.). *Hablando de Cementos Portland*.
<https://www.cemex.com.pe/-/hablando-de-cementos-portland>
- Dyckerhoff, Co. (2020). *Safety Data Sheet*.
https://www.dyckerhoff.com/documents/209745/1090752/SDS_Dyckerhoff%20Clas

- s%20K_HT%20Blend_Basic%20Blend_L
engerich.pdf
- Dyckerhoff, Co. (s. f.). *Dyckerhoff Well Cement HT Basic Blend*.
https://www.dyckerhoff.com/documents/209745/1442411/HT_BasicBlend_Lengerich.pdf
- Eurolab. (s. f.). *Métodos de prueba estándar ASTM C114 para análisis químico de cemento hidráulico*.
<https://www.laboratuar.com/es/testler/astm-testleri/astm-c114-hidrolik-cimentonun-kimyasal-analizi-icin-standart-test-yontemleri/>
- Figueroa García, E. (2019). *Análisis del comportamiento a compresión del concreto ligero reemplazando el agregado grueso por perlas de poliestireno expandido*.
https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/4853/Enmanuel_Tesis_bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Garzón, D. (2022). *Halliburton Cementing Tables*.
<https://www.scribd.com/document/554020242/e-Anexo-Halliburton-Cementing-Tables>
- Gómez, L. y Tarquino, K. (2018). *Diseño de una lechada de cemento espumado, cómo base para una cementación primaria, para yacimientos con bajos gradientes de fractura*.
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6687/1/5131648-2018-1-IP.pdf>
- Gómez, S. (2015). *Cementación de pozos profundos*.
<https://www.buenastareas.com/ensayos/Cementacion-De-Pozos-Profundos/7262083.html>
- González Vivas, J. (2016). *Propiedades físicas de los fluidos de perforación*.
<http://juanjgonzalezv.blogspot.com/2016/03/propiedades-fisicas-de-los-fluidos-de.html>
- Hernández Pérez, J. y Ortiz Gómez, E. (2011). *Adición de compuestos químicos para la cementación de pozos petroleros en la etapa de producción, Región Poza Rica-Altamira*.
https://www.academia.edu/18153256/Tesis_completa_1
- IBM Corporation. (2021). *Análisis multivariante de varianza (MANOVA)*.
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/beta?topic=statistics-multivariate-analysis-variance-manova>
- IHS Markit Standards Store. (s. f.). *Standard Specification for Processing Additions for Use in the Manufacture of Hydraulic Cements*.
https://global.ih.com/doc_detail.cfm?input_search_filter=ASTM&item_s_key=00014701&item_key_date=770530&input_doc_number=C465&input_doc_title=&org_code=ASTM
- Inteco. (2019). *Solicitudes aprobadas de nuevos proyectos de normas técnicas AGOSTO*

2019.
<https://www.inteco.org/web/content/1493051>
- Inteco. (s. f.). *INTE C161:2019*.
<https://www.inteco.org/shop/inte-c161-2019-ceniza-volante-de-carbon-y-puzolana-natural-en-crudo-o-calcinada-para-uso-en-concreto-especificacion-5504#attr=>
- Inteco. (s. f.). *INTE C57:2020. Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas). Método de ensayo*. <https://www.inteco.org/shop/inte-c57-2020-resistencia-a-la-compresion-de-morteros-de-cemento-hidraulico-usando-especimenes-cubicos-de-50-mm-2-pulgadas-metodo-de-ensayo-8027#attr=>
- Katende, A.; Lu, Y.; Bunger, A. y Radonjic, M. (s. f.). *Experimental quantification of the effect of oil based drilling fluid contamination on properties of wellbore cement*. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S1875510020301827>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (s. f.). *Catálogo de ensayos del Laboratorio de Concretos*.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2364/Catalogo%20LAC.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Liu, K.; Cheng, X.; Zhang, X.; Guo, X. y Zhuang, J. (2018). *Design of low-density cement optimized by cellulose-based fibre for oil and natural gas wells*. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0032591018305126>
- Liu, K.; Yang, Y.; Zhang, X.; Zhu, K.; Wang, J.; Li, L.; Qiang, T.; Ruirui, M.; Cheng, X. y Zhang, X. (s. f.). *Time-varying characteristics and mechanisms of hydrostatic pressure*. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0032591021002072>
- Lopez, P; Roldán, S. (2015) *Metodología de la investigación Social Cuantitativa*. https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2017/185163/metinvsoccaa_cap2-4a2017.pdf
- Macías Aráuz, D. (2007). *Cementación de un casing de producción del pozo Shushufindi - DM 29 A doble etapa*. <https://es.scribd.com/doc/298803159/Bj>
- Román Castro, D. (2022). *Perforaciones II*. <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-privada-del-valle/mecanica-de-suelos-i/labo3-perfo-ii-practice-of-compression/37322049>
- Villa, L. G. (s. f.). *Producción I*. <https://pdfcoffee.com/calculos-de-cementacion-pdf-free.html>
- Yang, Y.; Wang, K.; Zhang, H.; Xu, S.; Zhang, W.; Han, Y. y Li, Y. (s. f.). *Investigation on the preparation, properties, and microstructure of high thermal conductive cementing material in 3500 m-deep geothermal well*. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0032591018305126>

com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S
0375650521002765

Yousuf, N.; Olayiwola, O.; Guo, B. y Liu, N. (s. f.).

*Comprehensive review on the loss of
wellbore integrity due to cement failure
and available remedial methods.*

<https://www-sciencedirect->

com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S
0920410521007786

Zaldivar, D. (2017). *Aplicación de cementos
especiales en lechadas ligeras para evitar
pérdida de circulación durante la*

cementación.

[http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/
bitstream/132.248.52.100/12554/1/tesis_
aplicaci%c3%93n%20de%20cementos%
20especiales%20en%20lechadas%20lige
ras%20para%20evitar%20p%c3%89rdida
%20de%20circulaci%c3%93n%20durante
%20la%20cementaci%c3%93n.pdf](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/12554/1/tesis_aplicaci%c3%93n%20de%20cementos%20especiales%20en%20lechadas%20ligeras%20para%20evitar%20p%c3%89rdida%20de%20circulaci%c3%93n%20durante%20la%20cementaci%c3%93n.pdf)

Apéndices

Figura 33 Prueba de aditivos de la compañía Baker cuando se compraron por primera vez


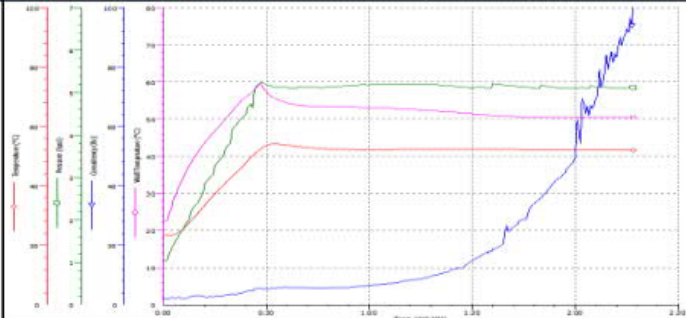
		REPORTE DEL CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO				
Manual de Documentos Locales México						
DATOS GENERALES						
FECHA:	Junio 19, 2017	CLASE DE CEMENTO:	G			
BASE:	Paraiso, Tabasco	GRADO DE CEMENTO:	N/E			
FABRICANTE:	N/E	FECHA DE FABRICACIÓN:	N/E			
# LOTE:	N/E	LUGAR DE MANUFACTURA:	Costa Rica			
NORMA DE REFERENCIA: API ESPECIFICACIÓN 10A (ISO 10426-1) EDICIÓN 1 DE JUNIO DE 2011						
SECCIÓN 7.2.4		SECCIÓN 7.2.5				
PESO DE CEMENTO (g):	792 ± 0.5	MEZCLADO 1 (r/min):	4000 (+/-200) r/min			
PESO DEL AGUA (g):	349 ± 0.5	MEZCLADO 2 (r/min):	12000 (+/-500) r/min			
PRUEBAS Y RESULTADOS						
TIPO DE PRUEBA	PROCEDIMIENTO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	RESULTADOS DEL PROVEEDOR	RESULTADOS DEL LABORATORIO DE PP	UNIDAD DE MEDIDA	ACEPTACIÓN
FLUIDO LIBRE	SECCIÓN 8.0	≤ 5.9	N/E	4.75	%	SI
ESFUERZO COMPRESIVO @ 38 °C	SECCIÓN 9.0	MR 300	N/E	276.83	psi	SI
ESFUERZO COMPRESIVO @ 60 °C	SECCIÓN 9.0	MR 1500	N/E	2216.96	psi	SI
TIEMPO BOMBEABLE	SECCIÓN 10.0	90-120	N/E	135	min	SI
CONDICIONES DE PRUEBA			GRÁFICA DE TIEMPO BOMBEABLE (SECCIÓN 10.0)			
PRESIÓN INICIAL:	1000	psi				
PRESIÓN FINAL:	5160	psi				
TEMPERATURA INICIAL:	27	°C				
TEMPERATURA FINAL:	52	°C				
RAMPA:	25	min				
OBSERVACIONES						
La muestra tiene los requerimientos mínimos que emite la norma API spec 10A.						
Nombre del técnico quien realiza la prueba:			Ing. Marcelino Pavon Lara/TSU. Wilber Valenzuela			
Nombre de quien realiza el reporte:			Ing. Mar Y. Castro G.			
VoBo. Supervisor de laboratorio:			Ing. Carlos Cahulich.			

Figura 34 Tabla B-1 “Requisitos físicos y de desempeño para cementos compuestos para pozos”

Table B.1—Physical and Performance Requirements for Composite Well Cements

Composite Well Cement Class				K	L
Mix water as per manufacturer's requirements				a	a,b
Free-fluid content, maximum, percent (Section 8)				5.9	5.9 ^c
Compressive Strength Test	Schedule Number	Final Curing Temperature	Curing Pressure	Minimum Compressive Strength	
Curing time: 8 h		°C (°F)		MPa (lbf/in. ² /lbf/in. ²)	
(Section 9)	NA ^d	60 (140)	atmospheric	3.5 (500)	NA
Compressive Strength Test	Schedule Number	Final Curing Temperature	Curing Pressure	Minimum Compressive Strength	
Curing time: 24 h		°C (°F)		MPa (lbf/in. ² /lbf/in. ²)	
(Section 9)	NA	38 (100)	atmospheric	NA	1.7 (250)
Thickening-time Test	Specification Test Schedule Number	Maximum Consistency (15 to 30 minutes stirring period)		Thickening Time (minimum/maximum)	
		B _c ^e		minutes	
(Section 10)	4 (Table 9)	30		NA	90/NA
(Section 10)	5 (Table 10)	30		70/140	NA
^a The manufacturer shall indicate on certificates of conformance the design mix water percentage for the composite well cement and which performance tests are performed. ^b Mix water percentage by slurry density desired. The manufacturer shall indicate on certificates of conformance the slurry density at the design mix water percentage and at which performance tests are performed. ^c Free-fluid may be adjusted by use of bentonite (see B.2.1.3) or other water-adsorbing materials. ^d NA indicates "not applicable." ^e Bearden units of consistency, B _c , obtained on a pressurized consistometer as defined in Section 10 and calibrated in accordance with Annex C.					

Figura 35 “Cuadros de la sección “Cementing Materials and Admixtures, Physical Properties and water requirements, Halliburton Cementing Tables, Páginas 20, 21 y 28”

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight lbs/cuft	Specific Gravity	Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
			gals/lb	cu ft/lb				
MicroSand	38	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		0.05
Perlite (0 psi)	8	0.67	0.1792	0.0240	100	Dry		0.5
Perlite (3000 psi)		2.2	0.0546	0.0073	100	Dry		
Perlite Six (0 psi)	38	1.575	0.0762	0.0102	100	Dry		0.158
Perlite Six (3000 psi)		2.4	0.0500	0.0067	100	Dry		
NF-3		0.981	0.1224	0.0164	100	Liquid	Water	
NF-4		1.01	0.1189	0.0159	100	Liquid	Water	
NF-4E		0.998	0.1203	0.0161	100	Liquid	Water	
NF-5		0.94	0.1277	0.0171	100	Liquid	Water	
SA-541	47	1.4	0.0857	0.0115	100	Dry		none
Spherelite (0 psi)	25	0.685	0.1753	0.0234	100	Dry		0.95
Spherelite (500 psi)		0.759	0.1582	0.0211	100	Dry		
Spherelite (1000 psi)		0.785	0.1529	0.0204	100	Dry		
Spherelite (2000 psi)		0.828	0.1450	0.0194	100	Dry		
Spherelite (3000 psi)		0.864	0.1389	0.0186	100	Dry		
Spherelite (4000 psi)		0.902	0.1331	0.0178	100	Dry		

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight lbs/cuft	Specific Gravity	Absolute Volume		Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements gals/lb
			gals/lb	cu ft/lb				
Spherelite (5000 psi)		0.943	0.1273	0.0170	100	Dry		
Spherelite (6000 psi)		0.98	0.1225	0.0164	100	Dry		
SSA-1 (Silica Flour)	70	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		0.049
SSA-2 (Coarse Silica)	100	2.65	0.0453	0.0061	100	Dry		none
Sea Water		1.025	0.1171	0.0157		Liquid		
Salt (dry)	71	2.17	0.0553	0.0074	100	Dry		
Salt (in Solution)								
6% - 0.5 lb/gal		1.041	0.0372	0.0050	6	Dry		
12% - 1.0 lb/gal		1.078	0.0391	0.0052	12	Dry		
18% - 1.5 lb/gal		1.112	0.0405	0.0054	18	Dry		
24% - 2.0 lb/gal		1.145	0.0417	0.0056	24	Dry		
Sat.- 3.1 lb/gal		1.2	0.0458	0.0061	37.2	Dry		
Sand								none
35% porosity	106.6	2.63	0.0456	0.0061	100	Wet		
39% porosity	100	2.63	0.0456	0.0061	100	Dry		
Super CBL	56.9	2.6	0.0462	0.0062	100	Dry		none

**CEMENTING MATERIALS AND ADMIXTURES
PHYSICAL PROPERTIES AND WATER REQUIREMENTS**

Material	Bulk Weight Kg/m3	Specific Gravity	Absolute Volume L/Kg	Activity %	Dry/Liquid	Liquid Base	Water Requirements L/Kg
SA-541	753	1.4	0.7156	100	Dry		none
Spherelite (0 psi)	400	0.685	1.4625	100	Dry		7.927
Spherelite (500 psi)		0.759	1.3199	100	Dry		
Spherelite (1000 psi)		0.785	1.2762	100	Dry		
Spherelite (2000 psi)		0.828	1.2099	100	Dry		
Spherelite (3000 psi)		0.864	1.1595	100	Dry		
Spherelite (4000 psi)		0.902	1.1106	100	Dry		
Spherelite (5000 psi)		0.943	1.0624	100	Dry		
Spherelite (6000 psi)		0.98	1.0222	100	Dry		
SSA-1 (Silica Flour)	1121	2.65	0.3780	100	Dry		0.409
SSA-2 (Coarse Silica)	1602	2.65	0.3780	100	Dry		none
Sea Water		1.025	0.9774		Liquid		
Salt (dry)	1137	2.17	0.4617	100	Dry		

Figura 36 “Cuadros de la sección Cemento H, Halliburton Cementing Tables, Páginas 10 y 11”

Page 10

METRIC UNITS
CLASS H CEMENT WITH SPHERELITE
SLURRY PROPERTIES

SPHERELITE Kg./Sk.	Water L./Sk.	Surface Density Kg./L.	Density @ 20.68 MPa Kg./L.	Density @ 20.68 MPa L./Sk.
8.8	24.4	1.47	1.56	49.27
24.6	36.9	1.20	1.32	79.00
80.3	101.1	0.96	1.08	207.56

COMPRESSIVE STRENGTH — PSI

Density @ 20.68 MPa Kg./L.	Curing Time Hours	Cured Under 20.68 MPa at Temp.		
		43°C	77°C	110°C
1.56	12	3.38*	10.20	13.10
	24	6.83*	10.34	13.18
	36	11.65*	19.31	14.20
1.32	12	1.45*	3.45	6.55
	24	2.14*	5.79	7.86
	36	4.76*	11.52	6.89
1.08	12	0.07*	0.55	1.10
	24	0.14*	1.10	1.24
	36	0.41*	1.93	2.34

*Contained 2% calcium chloride

THERMAL CONDUCTIVITY OF CLASS H CEMENT WITH SPHERELITE

SPHERELITE Kg./Sk.	L./Sk.	Water Kg./L.	Density @ 13.79 MPa L./Sk.	Yield @ 13.79 MPa Wet*	Thermal Conductivity, k
					(W/m °C) Dry**
0	16.3	1.97	30.02	1.30	—
6.8	19.9	1.68	40.49	0.81	0.33
15.9	25.7	1.44	58.33	0.69	0.28
24.0	33.7	1.32	75.89	0.66	0.22
37.2	51.1	1.20	109.30	0.54	0.22
47.2	66.2	1.14	136.77	0.42	0.21
65.8	97.7	1.08	190.57	0.40	0.14

* Samples cured 7 days at 33°C in water.
** Wet samples subsequently dried 3 days at 110°C

SPHERELITE — CLASS H CEMENT
LIGHTWEIGHT ADMIXTURE
Basic Composition: Class H cement, 13.6 Kg./Sk.; Diacel D, 0.7 Kg./Sk.;
CFR-2, 1.4 Kg./Sk. ECONOLITE, 2.7 Kg./Sk. CaCl₂

SPHERELITE Kg./Sk.	Water L./Sk.	Density @ 6.89 MPa Kg./L.	Yield @ 6.89 MPa L./Sk.	24 Hr. Comp. Strength at 60°C, 6.89 MPa (MPa)
0	54.5	1.50	76.74	9.51
4.5	56.8	1.44	84.67	7.79
11.3	65.9	1.34	102.51	5.03
22.7	72.7	1.26	123.74	2.90
34.0	81.8	1.20	147.25	2.34
45.4	90.8	1.15	170.75	1.86
60.7	122.6	1.05	260.51	0.90

NOTE — This data is presented only to demonstrate the performance of SPHERELITE. These compositions are not necessarily recommended as optimal compositions for field use. Generally, combinations of lightweight cement additives are used together to give optimal slurry performance (i.e., pumpability, strength and cost) for specific applications.

It is also important to note that the physical properties of SPHERELITE cement slurries are pressure dependent. SPHERELITE compositions are, therefore, designed on the basis of maximum downhole pressure.

EFFECTIVE DENSITY OF SPHERELITE IN CEMENT SLURRY AT VARIOUS PRESSURES

Pressure (MPa)	SPHERELITE			SPHERELITE		
	Density Kg./L.	Abs. Vol. L./Kg.		Density Kg./L.	Abs. Vol. L./Kg.	
Atm	0.685	1.460		34.5	0.947	1.056
1.4	0.741	1.350		41.4	0.986	1.014
3.4	0.761	1.314		55.2	1.072	0.933
6.9	0.786	1.272		68.9	1.154	0.867
13.8	0.830	1.205		82.7	1.235	0.810
20.7	0.866	1.155		96.5	1.316	0.760
27.6	0.906	1.104		103.4	1.355	0.738

Page 9

ENGLISH UNITS
CLASS H CEMENT WITH SPHERELITE
SLURRY PROPERTIES

SPHERELITE Lb./Sk.	Water Gal./Sk.	Surface Density Lbs./Gal.	Density @ 3000 PSI Lb./Gal.	Density @ 3000 PSI Cu. Ft./Sk.
21.5	6.45	12.3	13.0	1.74
54.3	9.74	10.0	11.0	2.79
177.0	26.7	8.0	9.0	7.33

COMPRESSIVE STRENGTH — PSI

Density @ 3000 PSI Lb./Gal.	Curing Time Hours	Cured Under 3000 PSI at Temp.		
		110°F	170°F	230°F
13	12	480*	1480	1900
	24	990*	1500	1910
	36	1690*	2800	2090
11	12	210*	500	950
	24	310*	840	1140
	36	690*	1670	1000
9	12	10*	80	160
	24	20*	160	180
	36	60*	280	340

*Contained 2% calcium chloride

THERMAL CONDUCTIVITY OF CLASS H CEMENT WITH SPHERELITE

SPHERELITE Lbs./Sk.	Gal./Sk.	Water Lb./Gal.	Density @ 2000 PSI Cu.Ft./Sk.	Yield @ 2000 PSI Wet*	Thermal Conductivity, k
					(BTU·H· Ft. °F) Dry**
0	4.3	16.4	1.06	0.75	—
15	5.0	14.0	1.43	0.47	0.19
35	6.8	12.0	2.06	0.40	0.16
53	8.9	11.0	2.68	0.38	0.13
82	13.5	10.0	3.86	0.31	0.13
104	17.5	9.5	4.83	0.24	0.12
145	25.8	9.0	6.73	0.23	0.08

*Samples cured 7 days at 90°F in water.
**Wet samples subsequently dried 3 days at 230°F

SPHERELITE — CLASS H CEMENT
LIGHTWEIGHT ADMIXTURE
Basic Composition: Class H cement, 30 Lb./Sk.; Diacel D, 1.5 Lb./Sk.;
CFR-2, 3 Lb./Sk. ECONOLITE, 6 Lb./Sk. CaCl₂

SPHERELITE Lbs./Sk.	Water Gal./Sk.	Density @ 1000 PSI Lb./Gal.	Yield @ 1000 PSI Cu.Ft./Sk.	24 Hr. Comp. Strength at 140°F, 1000 PSI (PSI)
0	14.4	12.5	2.71	1380
10	15.0	12.0	2.99	1130
25	17.4	11.2	3.62	730
50	19.2	10.5	4.37	420
75	21.6	10.0	5.20	340
100	24.0	9.6	6.03	270
200	32.4	8.8	9.20	130

NOTE — This data is presented only to demonstrate the performance of SPHERELITE. These compositions are not necessarily recommended as optimal compositions for field use. Generally, combinations of lightweight cement additives are used together to give optimal slurry performance (i.e., pumpability, strength and cost) for specific applications.

It is also important to note that the physical properties of SPHERELITE cement slurries are pressure dependent. SPHERELITE compositions are, therefore, designed on the basis of maximum downhole pressure.

EFFECTIVE DENSITY OF SPHERELITE IN CEMENT SLURRY AT VARIOUS PRESSURES

Pressure (PSI)	SPHERELITE			SPHERELITE		
	Density g./ml.	Abs. Vol. Gal./Lb.		Density g./ml.	Abs. Vol. Gal./Lb.	
Atm	0.685	0.1753		5000	0.947	0.1268
200	0.741	0.1620		6000	0.986	0.1217
500	0.761	0.1578		8000	1.072	0.1120
1000	0.786	0.1527		10,000	1.154	0.1041
2000	0.830	0.1447		12,000	1.235	0.0972
3000	0.866	0.1396		14,000	1.316	0.0912
4000	0.906	0.1325		15,000	1.355	0.0884

Tabla 17 Factor de modificación para desviación estándar

TABLA 5.3.1.2 — FACTOR DE MODIFICACIÓN PARA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA CUANDO SE DISPONE DE MENOS DE 30 ENSAYOS

Número de ensayos*	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra [†]
Menos de 15	Emplee la tabla 5.3.2.2
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

* Interpolarse para un número de ensayos intermedios.

[†] Desviación estándar de la muestra modificada, s_s , para usar en la determinación de la resistencia promedio requerida f'_{cr} de 5.3.2.1.

Tabla 18 Resistencia promedio a la compresión

TABLA 5.3.2.1 — RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (5-1) y (5-2) $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (5-1) $f'_{cr} = f'_c + 2.33s_s - 3.5$ (5-2)
$f'_c > 35$	Usar el mayor valor obtenido con las ecuaciones (5-1) y (5-3) $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (5-1) $f'_{cr} = 0.90f'_c + 2.33s_s$ (5-3)

Anexos

ADITIVOS

Acelerantes

“Reducen el tiempo de fraguado de una lechada y permiten que esta adquiera la necesaria resistencia a la compresión en un espacio de tiempo práctico” (Baroid, s. f., s. p.).

Cloruro de calcio.

Concentración de uso de 0.5 % al 2 % máximo

Silicato de sodio.

Se usa entre el 1 % al 3 % para cementos Portland

Retardantes

Prolongan el tiempo de fraguado de una lechada. Este tiempo de retraso de fragüe permite el bombeo del cemento antes de que produzca endurecimiento. Además, estos aditivos contrarrestan el efecto de la temperatura sobre la lechada de cemento (Baroid, s. f.).

Comercialmente, se tienen diferentes tipos de retardantes, tanto líquidos como en forma sólida.

Extendedores

Se usan para bajar la densidad de una lechada cementante a través de formaciones débiles. Esto contribuye con que una lechada más liviana reduce la presión hidrostática y evita daños a la formación (Baroid, s. f.).

Un ejemplo típico son las bentonitas sódicas, el uso en cemento puede ser del 1 % al 3 %. Esto para que no afecte la resistencia a la compresión.

Control agua libre

Estos mantienen fija el agua de las lechadas de bajo peso, extendidas o lechadas pesadas. Son aditivos muy importantes, puesto que, si no se controla la pérdida de agua, las propiedades de la lechada cambiarían. Con esto se aumenta el gel y se deshidrata, sobre todo en condiciones de alta temperatura como las profundidades en pozos geotérmicos.

Dispersantes

De acuerdo con Baroid (s. f.) reducen la viscosidad de la lechada, lo que es muy importante para el bombeo y cohesión de esta. La correcta dispersión de una lechada da como resultado:

Mayor y más temprana resistencia a la compresión

Mayor control sobre la pérdida de filtrado

Mayor control sobre el agua libre

Se usa en concentraciones entre 0.2 % al 0.8 %

Antisedimentantes

Los aditivos antisedimentantes:

Mejoran las características mecánicas de la lechada.

Reducen el porcentaje de agua libre, la hacen más estable y protegen de la sedimentación.

Afectan las propiedades mecánicas como la reología y trabajan en rangos de temperatura hasta los 200 °C.

Los porcentajes varían de acuerdo con el fabricante.

Reductores de densidad

Microesferas de cerámica.

Microesferas de cerámica o vidrio

Inertes

Rango de densidad: 8.5 lb/gal a 14.5 lb/gal

Sistema de cemento espumado

Nitrógeno inyectado en la lechada con espumantes

Muy bajas densidades > 6.0 lb/gal

Buenas propiedades mecánicas

Harina sílice

Se usa típicamente a temperaturas mayores de 230 °F (110 °C) para evitar que se reduzca la resistencia a la compresión y la retrogresión química del cemento.

Mejora la resistencia al ataque de sulfatos en profundidades considerables, medios salinos y con altas temperaturas.

La concentración de uso puede variar del 30 % al 35 % con respecto a la masa de cemento.

Antiespumantes

Debido a la velocidad con que se maneja el cemento en las operaciones cuando se mezcla la lechada, el cemento tiende a mantener una gran cantidad de aire. Además, durante la mezcla de agua con aditivos desarrolla presencia de burbujas, por la reducción de la tensión superficial del líquido (Adriano Santos, 2018).

La presencia de burbujas dificulta el trabajo de las bombas de alta presión, lo que genera cavitación. Por este motivo, se usan aditivos antiespumantes cuya concentración oscila entre 0.01 a 0.03 galones/saco.

Cemento

Para el caso de los cementos que se utilizan para pozos geotérmicos, por las condiciones de quimismo y temperatura a los que están expuestos no se consideran los tipos de cemento que se emplean para proyectos superficiales.

Esto porque a manera de condiciones no se tienen pruebas de su calidad y degradación a largo plazo, por el sello hermético que debe tenerse. Por eso, para estos procesos se utilizan los cementos tipo G y H de la norma API 10 a, que tienen resistencia al ataque de sulfatos.

Actualmente, la compañía alemana Dyckerhoff patentó el cemento tipo K, que corresponde al cemento tipo G mezclado con sílice al 35 %. Esto agiliza el tiempo en el proceso de corta al preparar la mezcla en seco de la lechada.

Tabla 19 Prueba base con 15 % esferilita, 2 % bentonita a 27 °C

Prueba base con 15 % esferilita y 2% de bentonita												
Muestra	Fecha	Hora	Horas Curado	Presión	MPa	Desv Esta	Promedio	C.V %	Temp 38°	Temp 60°	Base	Densidad
1	8/10/2022	07:00	18	0,00	0,00	0,11	0,12	86,96	27		3,5	1,69
2	8/10/2022	07:00		1,79	0,18						3,5	
3	8/10/2022	07:00		1,99	0,20						3,5	
4	8/10/2022	13:00	24	11,37	1,12	0,25	1,12	22,33	27		3,5	
5	8/10/2022	13:00		14,01	1,37						3,5	
6	8/10/2022	13:00		8,91	0,87						3,5	
7	9/10/2022	07:00	36	29,92	2,93	0,34	3,25	10,46	27		3,5	
8	9/10/2022	07:00		36,80	3,61						3,5	
9	9/10/2022	07:00		32,68	3,20						3,5	
10	9/10/2022	13:00	48	40,42	3,96	0,27	3,75	7,11	27		3,5	
11	9/10/2022	13:00		39,08	3,83						3,5	
12	9/10/2022	13:00		35,19	3,45						3,5	
13	20/10/2022	07:00	72	42,92	4,21	0,50	4,37	11,33	27		3,5	
14	21/10/2022	07:00		40,63	3,98						3,5	
15	22/10/2022	07:00		50,30	4,93						3,5	

Figura 36 Prueba de compresión

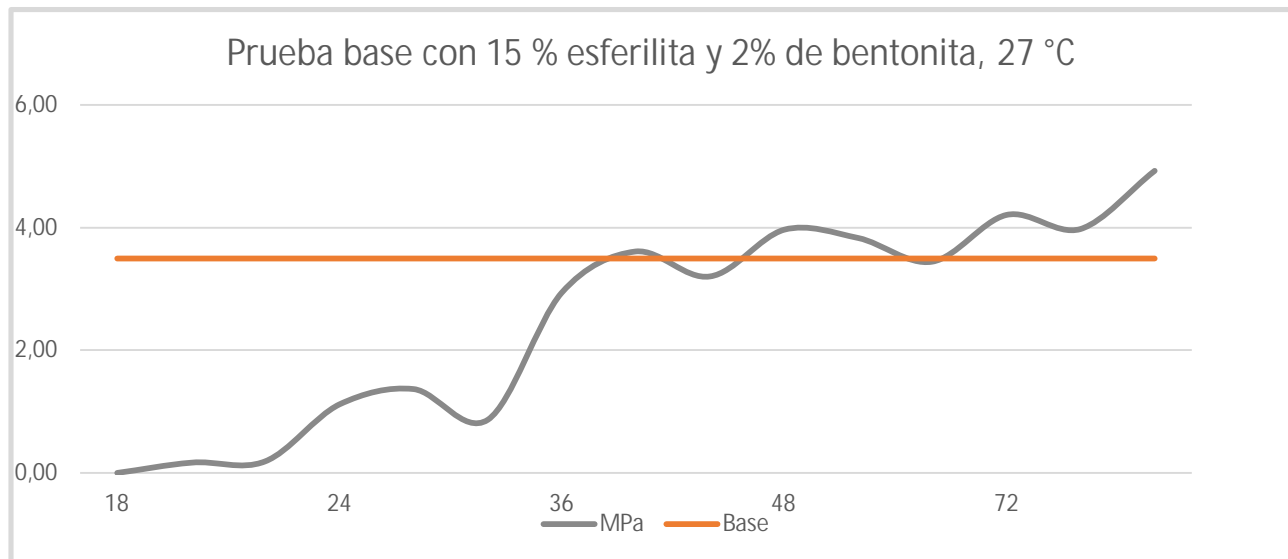


Tabla 20 Prueba base con 5 % esferilita, 0 % bentonita a 27 °C

Prueba base con 5% esferilita y 0% de bentonita											
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad	
1	10/10/2022	10:00	18	5,09	0,50	0,03	0,54	6,28	3,50	1,81	
2	10/10/2022	10:00		5,68	0,56				3,50		
3	10/10/2022	10:00		5,69	0,56				3,50		
4	10/10/2022	15:00	24	31,17	3,06	0,18	2,87	6,39	3,50		
5	10/10/2022	15:00		27,42	2,69				3,50		
6	10/10/2022	15:00		29,28	2,87				3,50		
7	11/10/2022	08:00	36	63,74	6,25	0,37	6,68	5,55	3,50		
8	11/10/2022	08:00		70,72	6,94				3,50		
9	11/10/2022	08:00		69,74	6,84				3,50		
10	12/10/2022	15:00	48	84,69	8,30	0,37	8,37	4,45	3,50		
11	12/10/2022	15:00		81,86	8,03				3,50		
12	12/10/2022	15:00		89,38	8,76				3,50		
13	13/10/2022	15:00	72	145,10	14,23	0,96	13,12	7,30	3,50		
14	13/10/2022	15:00		128,69	12,62				3,50		
15	13/10/2022	15:00		127,72	12,52				3,50		

Figura 37 Prueba de compresión

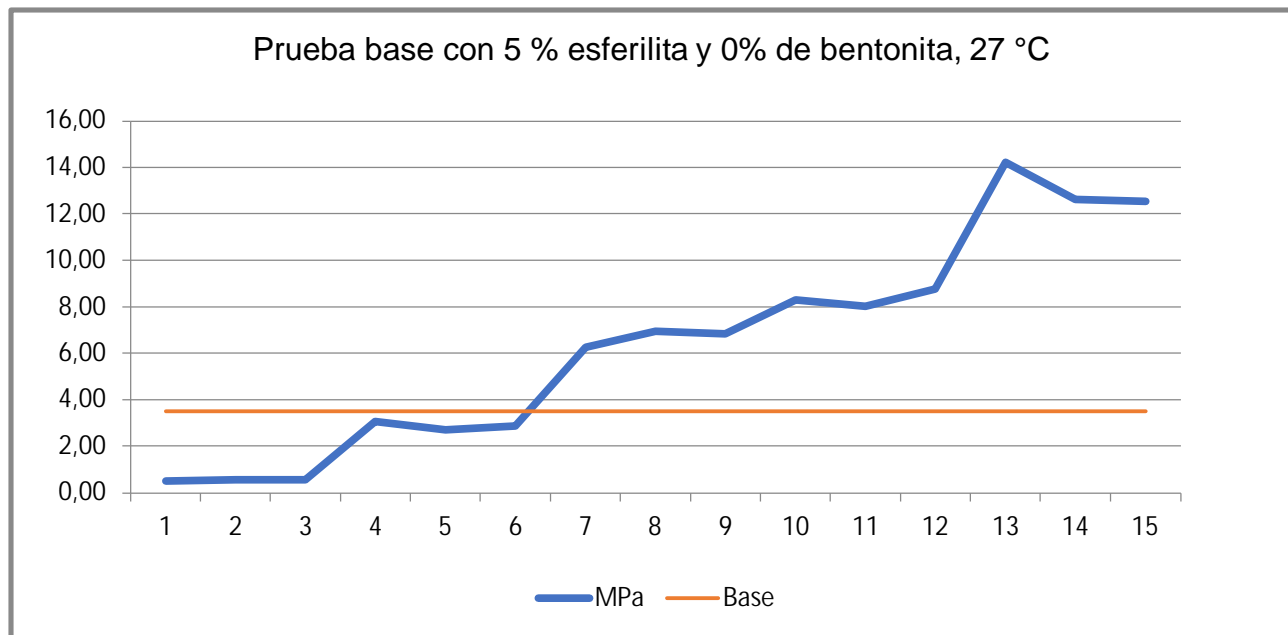


Tabla 21 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita a 27 °C

Prueba base con 10% esferilita y 0% de bentonita										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	13/10/2022	08:00	18	0,41	0,04	0,02	0,01	173,21	3,50	1,72
2	13/10/2022	08:00		0,00	0,00				3,50	
3	13/10/2022	08:00		0,00	0,00				3,50	
4	13/10/2022	14:00	24	6,76	0,66	0,10	0,76	12,47	3,50	
5	13/10/2022	14:00		7,86	0,77				3,50	
6	13/10/2022	14:00		8,69	0,85				3,50	
7	14/10/2022	08:00	36	52,21	5,12	0,44	4,77	9,23	3,50	
8	14/10/2022	08:00		50,07	4,91				3,50	
9	14/10/2022	08:00		43,59	4,27				3,50	
10	14/10/2022	13:00	48	55,38	5,43	0,34	5,32	6,40	3,50	
11	14/10/2022	13:00		57,10	5,60				3,50	
12	14/10/2022	13:00		50,41	4,94				3,50	
13	20/10/2022	07:00	72	65,24	6,40	1,12	6,92	16,13	3,50	
14	21/10/2022	07:00		83,59	8,20				3,50	
15	22/10/2022	07:00		62,76	6,15				3,50	

Figura 38 Prueba de compresión

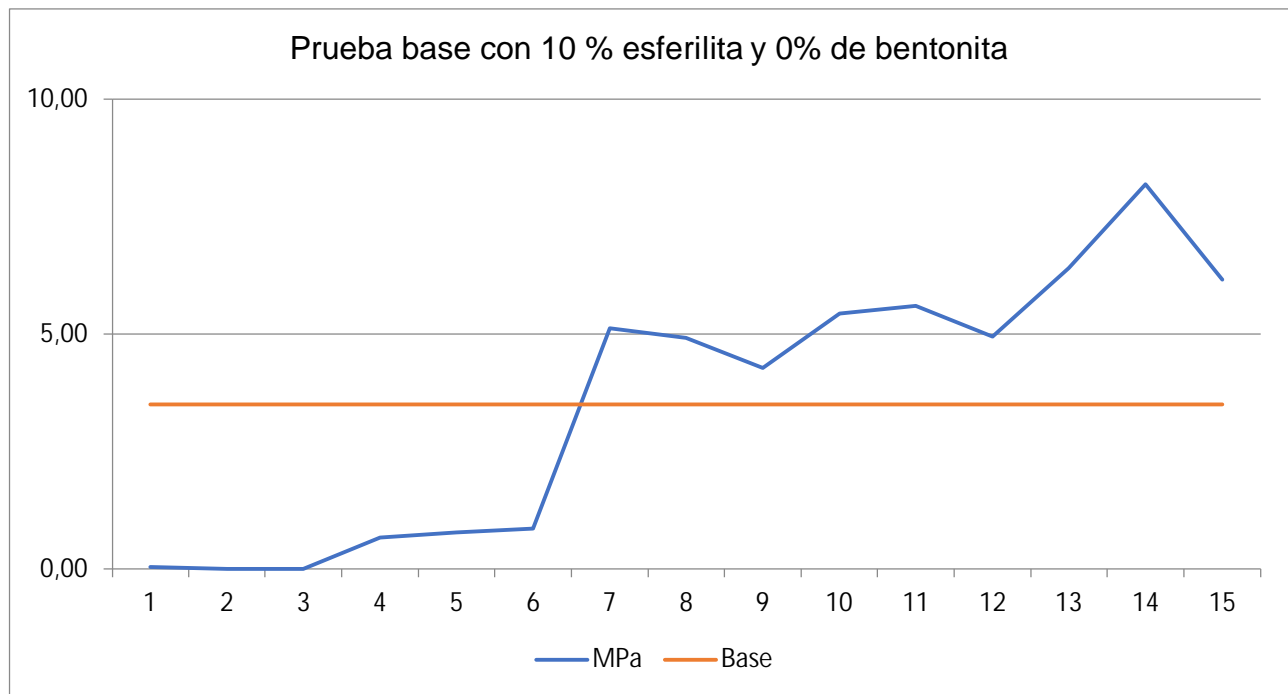


Tabla 22 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C

Prueba base con 10 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	14/10/2022	09:00	18	1,52	0,15	0,08	0,06	121,85	3,50	1,70
2	14/10/2022	09:00		0,00	0,00				3,50	
3	14/10/2022	09:00		0,41	0,04				3,50	
4	14/10/2022	15:00	24	0,83	0,08	0,06	0,07	83,44	3,50	
5	14/10/2022	15:00		1,24	0,12				3,50	
6	14/10/2022	15:00		0,07	0,01				3,50	
7	15/10/2022	08:00	36	29,72	2,91	0,23	2,68	8,45	3,50	
8	15/10/2022	08:00		25,10	2,46				3,50	
9	15/10/2022	08:00		27,24	2,67				3,50	
10	15/10/2022	16:00	48	46,41	4,55	1,38	6,14	22,50	3,50	
11	15/10/2022	16:00		71,79	7,04				3,50	
12	15/10/2022	16:00		69,72	6,84				3,50	
13	17/10/2022	08:00	72	97,79	9,59	1,50	10,53	14,24	3,50	
14	17/10/2022	08:00		99,38	9,75				3,50	
15	17/10/2022	08:00		125,03	12,26				3,50	

Figura 39 Prueba de compresión

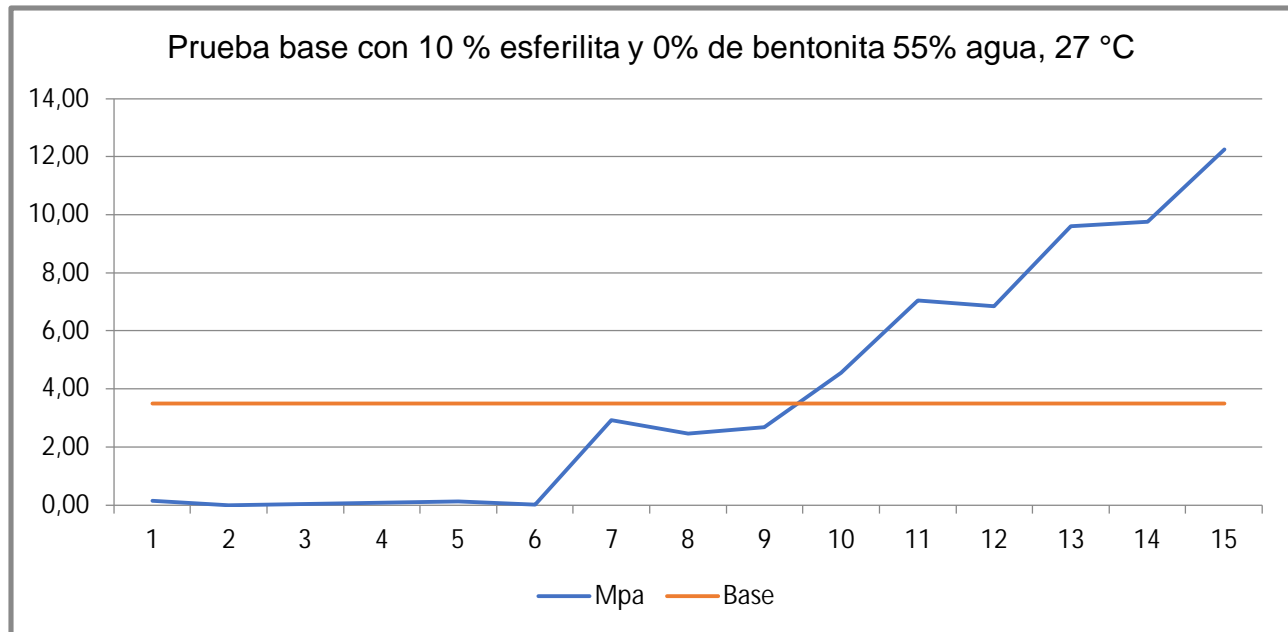


Tabla 23 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C

Prueba base con 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua

Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	15/10/2022	09:00	18	1,02	0,10	0,03	0,07	44,17	3,50	1,62
2	15/10/2022	09:00		0,76	0,07				3,50	
3	15/10/2022	09:00		0,39	0,04				3,50	
4	15/10/2022	15:00	24	13,10	1,28	3,30	3,21	103,05	3,50	
5	15/10/2022	15:00		71,59	7,02				3,50	
6	15/10/2022	15:00		13,38	1,31				3,50	
7	16/10/2022	08:00	36	86,76	8,51	0,99	7,38	13,43	3,50	
8	16/10/2022	08:00		70,90	6,95				3,50	
9	16/10/2022	08:00		68,00	6,67				3,50	
10	16/10/2022	16:00	48	62,90	6,17	0,90	6,98	12,83	3,50	
11	16/10/2022	16:00		69,66	6,83				3,50	
12	16/10/2022	16:00		80,97	7,94				3,50	
13	17/10/2022	16:00	72	72,21	7,08	0,53	6,48	8,23	3,50	
14	17/10/2022	16:00		61,86	6,07				3,50	
15	17/10/2022	16:00		64,14	6,29				3,50	

Figura 40 Prueba de compresión

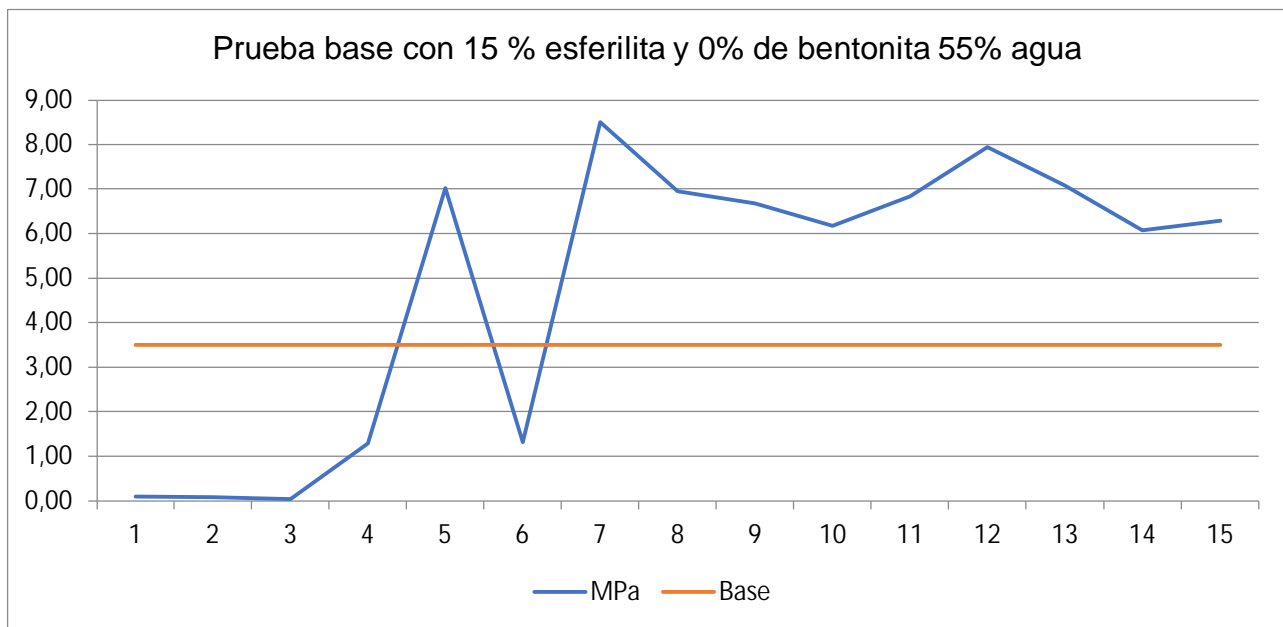


Tabla 24 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 18 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua

Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión (kg/cm2)	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad (gr/cc)
1	19/10/2022	09:00	18	0,28	0,03	1,02	0,50	206,38	3,50	1,72
2	19/10/2022	09:00		1,66	0,16				3,50	
3	19/10/2022	09:00		0,14	0,01				3,50	
4	19/10/2022	09:00		2,90	0,28				3,50	
5	19/10/2022	09:00		4,14	0,41				3,50	
6	19/10/2022	09:00		0,00	0,00				3,50	
7	19/10/2022	09:00		41,24	4,04				3,50	
8	19/10/2022	09:00		0,28	0,03				3,50	
9	19/10/2022	09:00		1,17	0,11				3,50	
10	19/10/2022	09:00		0,62	0,06				3,50	
11	19/10/2022	09:00		0,00	0,00				3,50	
12	19/10/2022	09:00		7,59	0,74				3,50	
13	19/10/2022	09:00		6,48	0,64				3,50	
14	19/10/2022	09:00		8,62	0,85				3,50	
15	19/10/2022	09:00		0,69	0,07				3,50	

Figura 41 Prueba de compresión

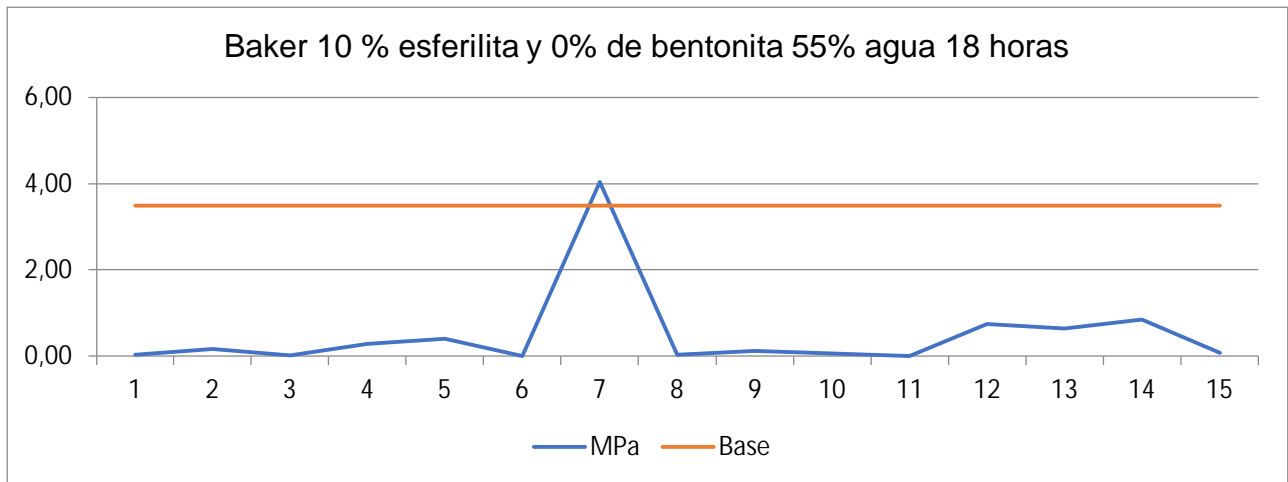


Tabla 25 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 36 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua

Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	25/10/2022	16:00	36	65,262	6,40	1,99	6,73	29,57	3,50	1,72
2	25/10/2022	16:00		51,394	5,04				3,50	
3	25/10/2022	16:00		106,458	10,44				3,50	
4	25/10/2022	16:00		82,393	8,08				3,50	
5	25/10/2022	16:00		58,328	5,72				3,50	
6	25/10/2022	16:00		92,998	9,12				3,50	
7	25/10/2022	16:00		70,972	6,96				3,50	
8	25/10/2022	16:00		31,407	3,08				3,50	
9	25/10/2022	16:00		58,736	5,76				3,50	
10	25/10/2022	16:00		48,946	4,80				3,50	
11	25/10/2022	16:00		85,656	8,40				3,50	
12	25/10/2022	16:00		77,906	7,64				3,50	
13	25/10/2022	16:00		61,183	6,00				3,50	

Figura 42 Prueba de compresión

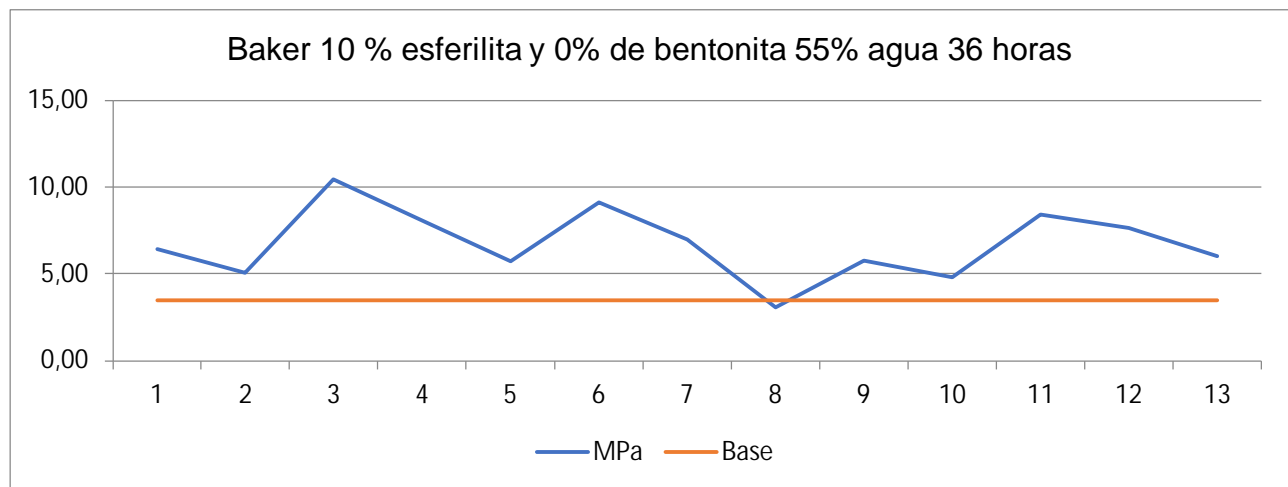


Tabla 26 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 48 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	21/10/2022	16:00	48	162,747	15,96	3,29	13,31	24,73	3,50	1,72
2	21/10/2022	16:00		91,774	9,00				3,50	
3	21/10/2022	16:00		101,564	9,96				3,50	
4	21/10/2022	16:00		152,957	15,00				3,50	
5	21/10/2022	16:00		89,735	8,80				3,50	
6	21/10/2022	16:00		165,602	16,24				3,50	
7	21/10/2022	16:00		160,707	15,76				3,50	
8	21/10/2022	16:00		177,431	17,40				3,50	
9	21/10/2022	16:00		135,418	13,28				3,50	
10	21/10/2022	16:00		98,709	9,68				3,50	
11	21/10/2022	16:00		183,141	17,96				3,50	
12	21/10/2022	16:00		127,261	12,48				3,50	
13	21/10/2022	16:00		117,471	11,52				3,50	

Figura 43 Prueba de compresión

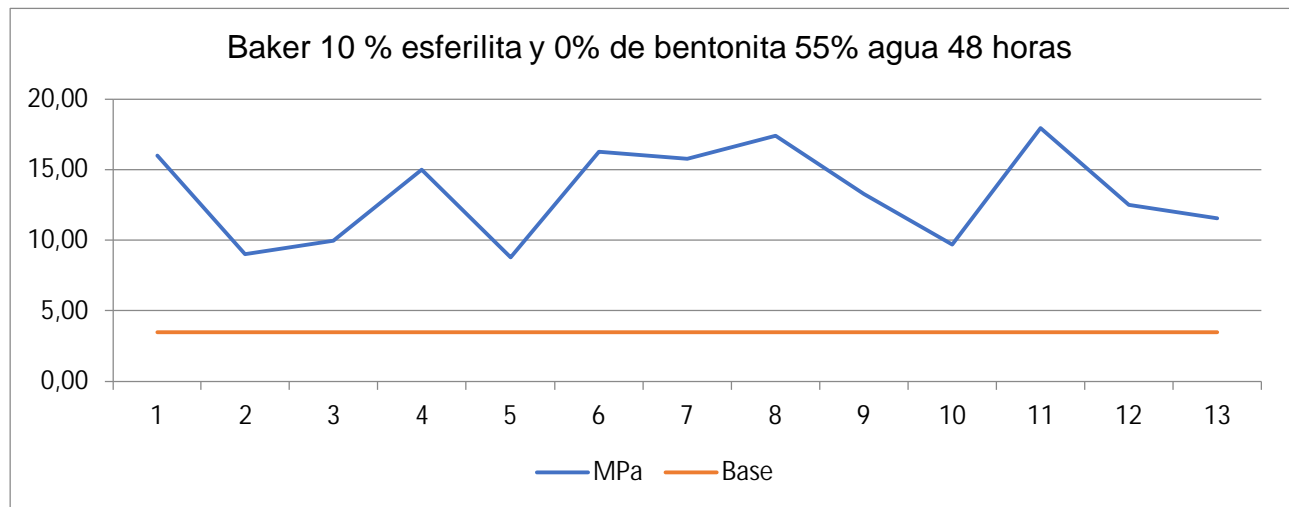


Tabla 27 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 72 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua

Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	20/10/2022	09:00	72	186,40	18,28	1,84	16,24	11,31	3,50	1,76
2	20/10/2022	09:00		151,73	14,88				3,50	
3	20/10/2022	09:00		154,59	15,16				3,50	
4	20/10/2022	09:00		163,15	16,00				3,50	
5	20/10/2022	09:00		179,88	17,64				3,50	
6	20/10/2022	09:00		159,89	15,68				3,50	
7	20/10/2022	09:00		151,33	14,84				3,50	
8	20/10/2022	09:00		143,98	14,12				3,50	
9	20/10/2022	09:00		199,46	19,56				3,50	

Figura 44 Prueba de compresión

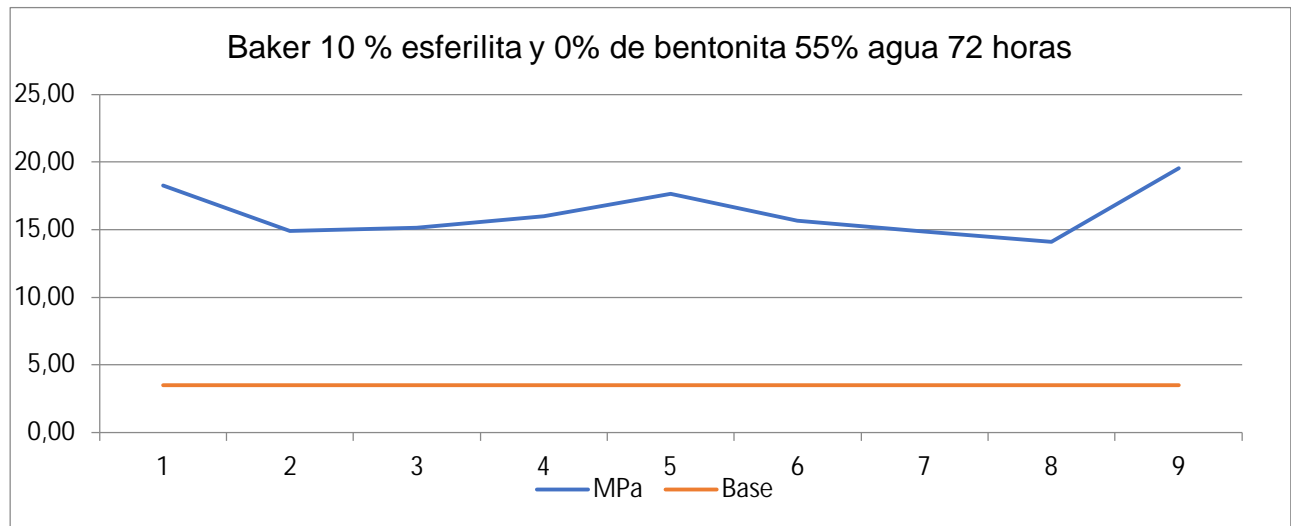


Tabla 28 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 60 % agua a 60 °C a 24 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 60% agua a 60 °C agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión Kg/cm2	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	21/11/2022	12:00	24	92,60	9,08	2,33	13,43	17,33	3,50	1,72
2	21/11/2022	12:00		110,00	10,79				3,50	
3	21/11/2022	12:00		152,10	14,92				3,50	
4	21/11/2022	12:00		133,00	13,04				3,50	
5	21/11/2022	12:00		131,70	12,92				3,50	
6	21/11/2022	12:00		148,10	14,52				3,50	
7	21/11/2022	12:00		150,10	14,72				3,50	
8	21/11/2022	12:00		134,20	13,16				3,50	
9	21/11/2022	12:00		157,40	15,44				3,50	
10	21/11/2022	12:00		155,00	15,20				3,50	
11	21/11/2022	12:00		88,90	8,72				3,50	
12	21/11/2022	12:00		136,70	13,41				3,50	
13	21/11/2022	12:00		144,20	14,14				3,50	
14	21/11/2022	12:00		175,00	17,16				3,50	
15	21/11/2022	12:00		144,80	14,20				3,50	

Figura 45 Prueba de compresión

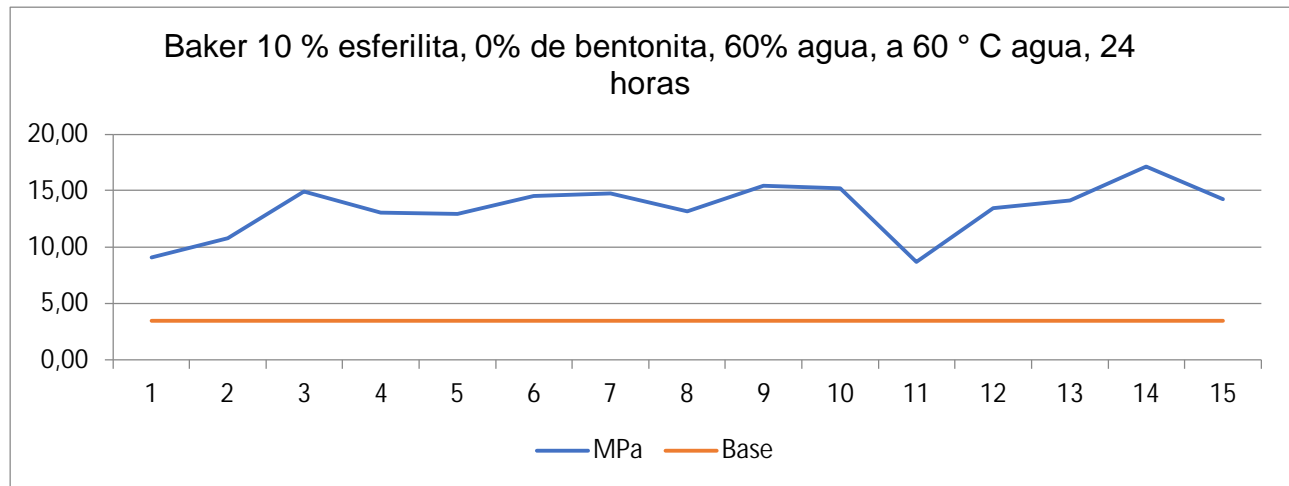


Tabla 29 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 60 % agua a 60 °C a 36 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 60% agua a 60 ° C agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión Kg/cm2	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	23/11/2022	09:30	36	131,70	12,92	1,06	12,60	8,40	3,50	1,72
2	23/11/2022	09:30		131,30	12,88				3,50	
3	23/11/2022	09:30		117,00	11,47				3,50	
4	23/11/2022	09:30		119,90	11,76				3,50	
5	23/11/2022	09:30		150,10	14,72				3,50	
6	23/11/2022	09:30		122,40	12,00				3,50	
7	23/11/2022	09:30		119,90	11,76				3,50	
8	23/11/2022	09:30		115,40	11,32				3,50	
9	23/11/2022	09:30		137,40	13,47				3,50	
10	23/11/2022	09:30		128,90	12,64				3,50	
11	23/11/2022	09:30		139,10	13,64				3,50	

Figura 46 Prueba de compresión

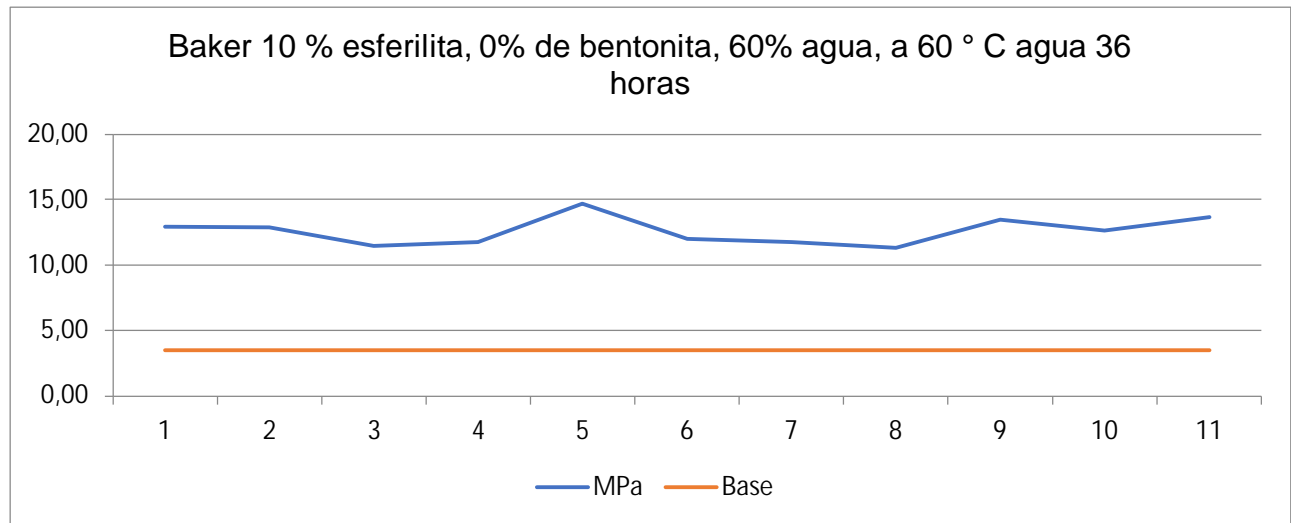


Tabla 30 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 60 % agua a 60 °C a 48 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 60% agua a 60 °C agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión Kg/cm2	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	17/11/2022	16:00	48	175,03	17,16	2,17	16,18	13,43	3,50	1,72
2	17/11/2022	16:00		170,54	16,72				3,50	
3	17/11/2022	16:00		148,10	14,52				3,50	
4	17/11/2022	16:00		121,17	11,88				3,50	
5	17/11/2022	16:00		195,84	19,21				3,50	
6	17/11/2022	16:00		170,95	16,76				3,50	
7	17/11/2022	16:00		161,16	15,80				3,50	
8	17/11/2022	16:00		148,51	14,56				3,50	
9	17/11/2022	16:00		141,17	13,84				3,50	
10	17/11/2022	16:00		189,31	18,56				3,50	
11	17/11/2022	16:00		192,57	18,88				3,50	
12	17/11/2022	16:00		187,68	18,40				3,50	
13	17/11/2022	16:00		188,90	18,52				3,50	
14	17/11/2022	16:00		189,72	18,60				3,50	
15	17/11/2022	16:00		168,50	16,52				3,50	

Figura 47 Prueba de compresión

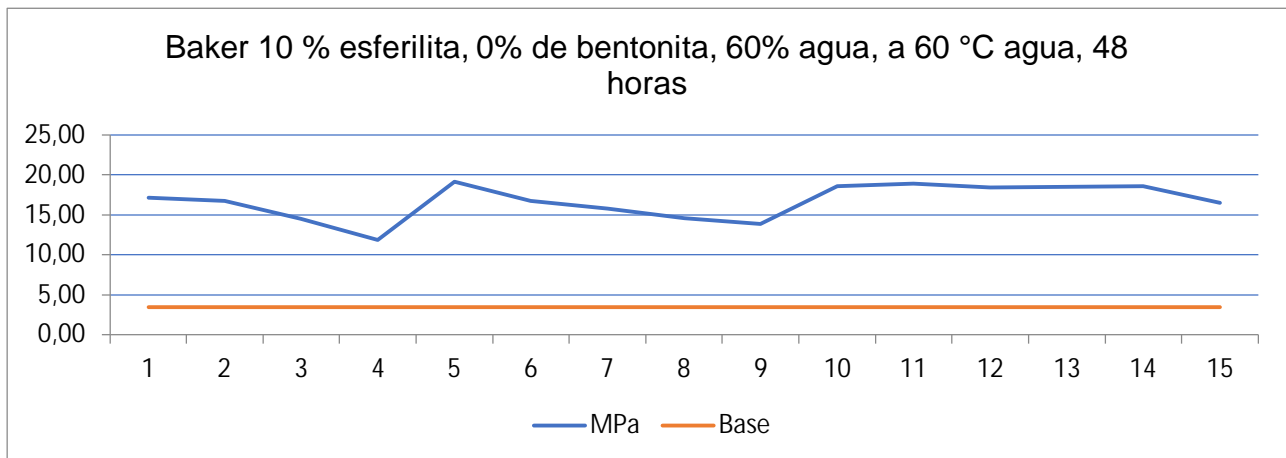


Tabla 31 Prueba base con 10 % esferilita, 0 % bentonita, 60 % agua a 60 °C a 72 horas

Baker 10 % esferilita y 0% de bentonita 60% agua a 60 °C agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión Kg/cm2	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	22/11/2022	11:30	72	239,90	23,53	3,34	18,72	17,85	3,50	1,72
2	22/11/2022	11:30		185,60	18,20				3,50	
3	22/11/2022	11:30		174,20	17,08				3,50	
4	22/11/2022	11:30		202,30	19,84				3,50	
5	22/11/2022	11:30		203,10	19,92				3,50	
6	22/11/2022	11:30		196,60	19,28				3,50	
7	22/11/2022	11:30		206,80	20,28				3,50	
8	22/11/2022	11:30		177,80	17,44				3,50	
9	22/11/2022	11:30		134,20	13,16				3,50	
10	22/11/2022	11:30		239,40	23,48				3,50	
11	22/11/2022	11:30		139,90	13,72				3,50	
12	22/11/2022	11:30		235,80	23,12				3,50	
13	22/11/2022	11:30		204,00	20,01				3,50	
14	22/11/2022	11:30		144,00	14,12				3,50	

Figura 48 Prueba de compresión

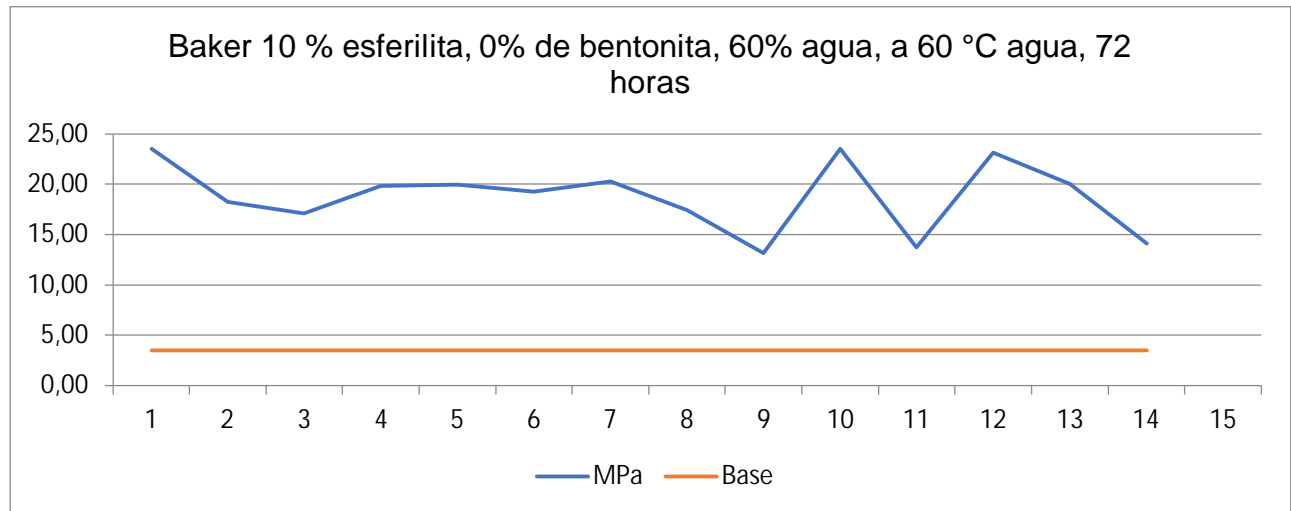


Tabla 32 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 24 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	29/11/2022	14:10	24	32,64	3,20	1,35	3,78	35,77	3,50	1,65
2	29/11/2022	14:12		28,56	2,80				3,50	
3	29/11/2022	14:14		25,70	2,52				3,50	
4	29/11/2022	14:16		64,40	6,32				3,50	
5	29/11/2022	14:18		33,04	3,24				3,50	
6	29/11/2022	14:20		28,56	2,80				3,50	
7	29/11/2022	14:22		46,92	4,60				3,50	
8	29/11/2022	14:24		29,30	2,87				3,50	
9	29/11/2022	14:26		65,28	6,40				3,50	
10	29/11/2022	14:28		28,95	2,84				3,50	
11	29/11/2022	14:30		41,62	4,08				3,50	
12	29/11/2022	14:32		48,14	4,72				3,50	
13	29/11/2022	14:34		27,74	2,72				3,50	
14									3,50	
15									3,50	

Figura 49 Prueba de compresión

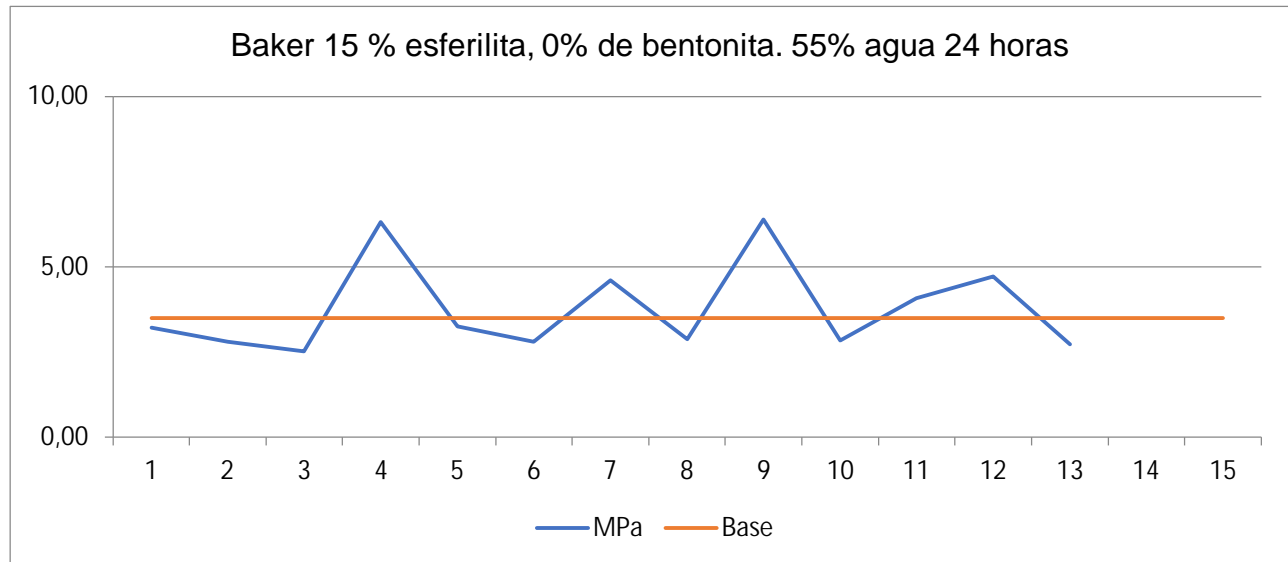


Tabla 33 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 36 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	3/12/2022	08:10	36	65,28	6,40	0,98	6,00	16,40	3,50	1,65
2	3/12/2022	08:12		76,30	7,48				3,50	
3	3/12/2022	08:14		75,88	7,44				3,50	
4	3/12/2022	08:16		55,90	5,48				3,50	
5	3/12/2022	08:18		53,04	5,20				3,50	
6	3/12/2022	08:20		47,32	4,64				3,50	
7	3/12/2022	08:22		75,88	7,44				3,50	
8	3/12/2022	08:24		56,19	5,51				3,50	
9	3/12/2022	08:26		68,13	6,68				3,50	
10	3/12/2022	08:28		55,90	5,48				3,50	
11	3/12/2022	08:30		51,00	5,00				3,50	
12	3/12/2022	08:32		58,75	5,76				3,50	
13	3/12/2022	08:34		55,48	5,44				3,50	

Figura 50 Prueba de compresión

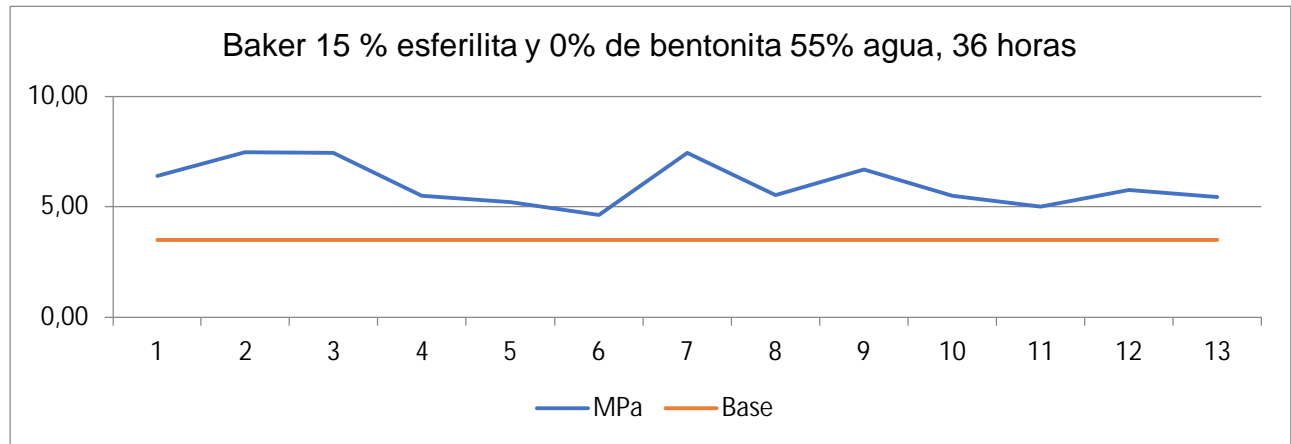


Tabla 34 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 48 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	2/12/2022	10:10	48	84,40	8,28	1,41	9,48	14,87	3,50	1,65
2	2/12/2022	10:12		89,30	8,76				3,50	
3	2/12/2022	10:14		80,30	7,88				3,50	
4	2/12/2022	10:16		111,70	10,95				3,50	
5	2/12/2022	10:18		88,90	8,72				3,50	
6	2/12/2022	10:20		79,60	7,81				3,50	
7	2/12/2022	10:22		69,30	6,80				3,50	
8	2/12/2022	10:24		117,00	11,47				3,50	
9	2/12/2022	10:26		102,40	10,04				3,50	
10	2/12/2022	10:28		108,90	10,68				3,50	
11	2/12/2022	10:30		106,40	10,43				3,50	
12	2/12/2022	10:32		90,20	8,85				3,50	
13	2/12/2022	10:34		104,40	10,24				3,50	
14	2/12/2022	10:36		107,70	10,56				3,50	
15	2/12/2022	10:38		110,10	10,80				3,50	

Figura 51 Prueba de compresión

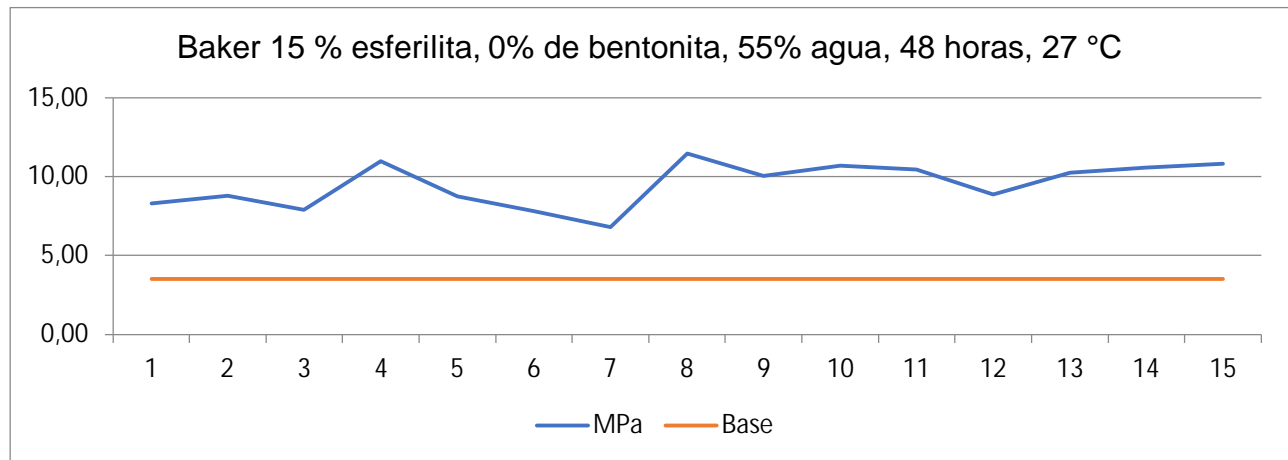


Tabla 35 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 27 °C a 72 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	2/12/2022	15:30	72	148,10	14,52	0,92	14,18	6,49	3,50	1,65
2	2/12/2022	15:32		135,00	13,24				3,50	
3	2/12/2022	15:34		154,60	15,16				3,50	
4	2/12/2022	15:36		155,40	15,24				3,50	
5	2/12/2022	15:38		150,50	14,76				3,50	
6	2/12/2022	15:40		137,90	13,52				3,50	
7	2/12/2022	15:42		130,90	12,84				3,50	
8	2/12/2022	15:44		150,90	14,80				3,50	
9	2/12/2022	15:46		139,10	13,64				3,50	
10	2/12/2022	15:48		158,70	15,56				3,50	
11	2/12/2022	15:50		135,40	13,28				3,50	
12	2/12/2022	15:52		132,10	12,96				3,50	
13	2/12/2022	15:54		151,30	14,84				3,50	
14	2/12/2022	15:56		144,00	14,12				3,50	
15	2/12/2022	15:58							3,50	

Figura 52 Prueba de compresión

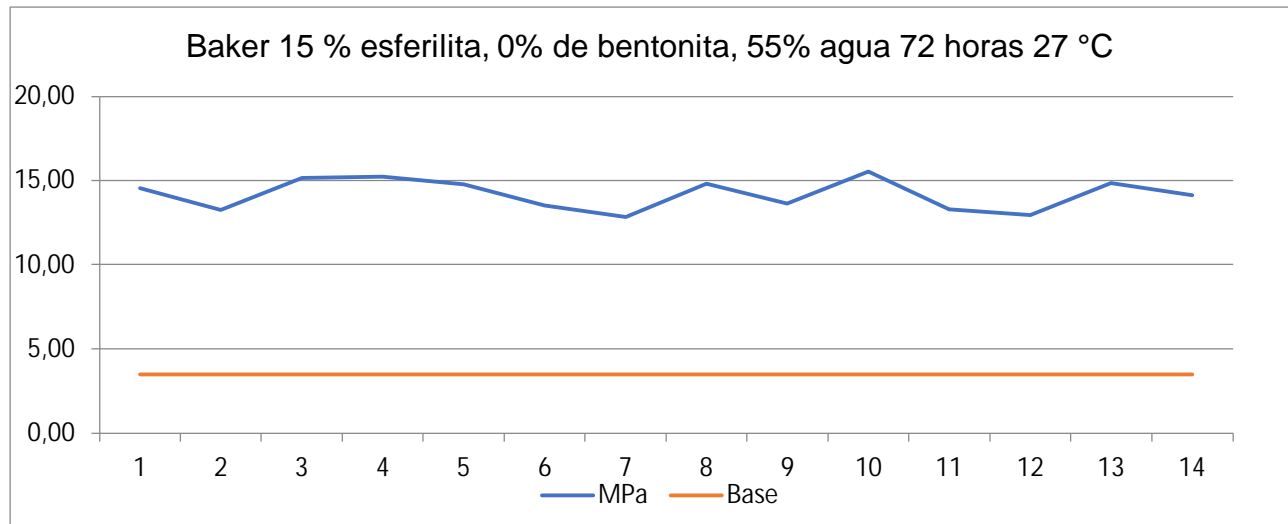


Tabla 36 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 60 °C a 24 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 55% 60° agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	6/12/2022	10:15	24	54,30	5,33	1,74	7,67	22,65	3,50	1,65
2	6/12/2022	10:17		61,60	6,04				3,50	
3	6/12/2022	10:19		90,60	8,89				3,50	
4	6/12/2022	10:21		88,10	8,64				3,50	
5	6/12/2022	10:23		102,00	10,00				3,50	
6	6/12/2022	10:25		102,00	10,00				3,50	
7	6/12/2022	10:27		77,90	7,64				3,50	
8	6/12/2022	10:29		95,10	9,33				3,50	
9	6/12/2022	10:31		56,70	5,56				3,50	
10	6/12/2022	10:33		58,80	5,77				3,50	
11	6/12/2022	10:35		63,60	6,24				3,50	
12	6/12/2022	10:37		79,60	7,81				3,50	
13	6/12/2022	10:39		57,90	5,68				3,50	
14	6/12/2022	10:41		94,70	9,29				3,50	
15	6/12/2022	10:43		89,80	8,81				3,50	

Figura 53 Prueba de compresión

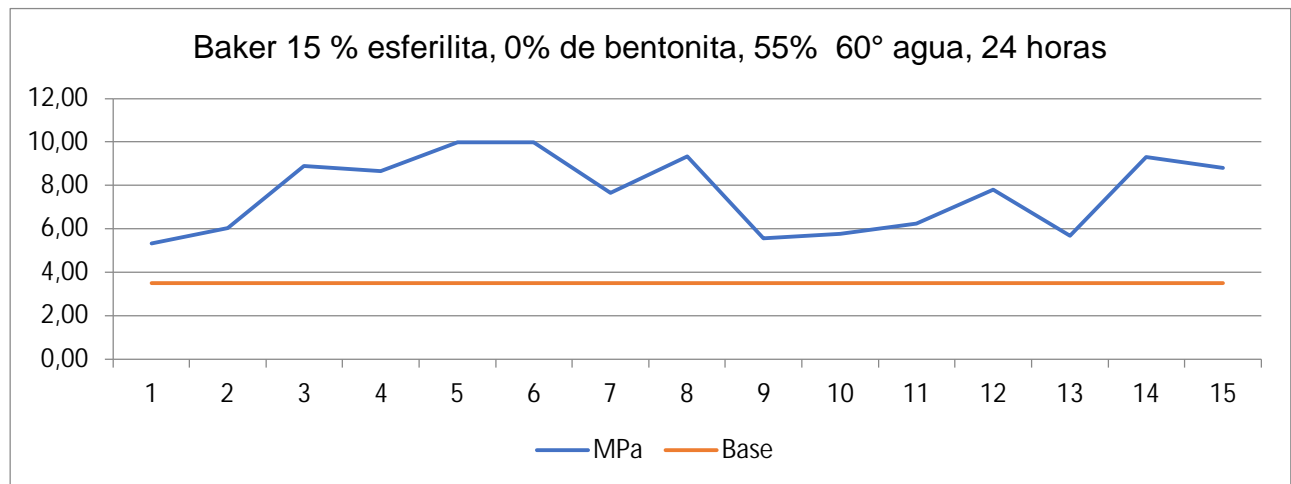


Tabla 37 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 60 °C a 36 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 60° 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	6/12/2022	09:30	36	130,20	12,77	2,24	15,53	14,42	3,50	1,65
2	6/12/2022	09:32		186,90	18,33				3,50	
3	6/12/2022	09:34		173,80	17,04				3,50	
4	6/12/2022	09:36		176,30	17,29				3,50	
5	6/12/2022	09:38		136,30	13,37				3,50	
6	6/12/2022	09:40		191,40	18,77				3,50	
7	6/12/2022	09:42		169,70	16,64				3,50	
8	6/12/2022	09:44		124,00	12,16				3,50	
9	6/12/2022	09:46		151,00	14,81				3,50	
10	6/12/2022	09:48		149,30	14,64				3,50	
11	6/12/2022	09:50		153,40	15,04				3,50	
12										
13										
14										
15										

Figura 54 Prueba de compresión

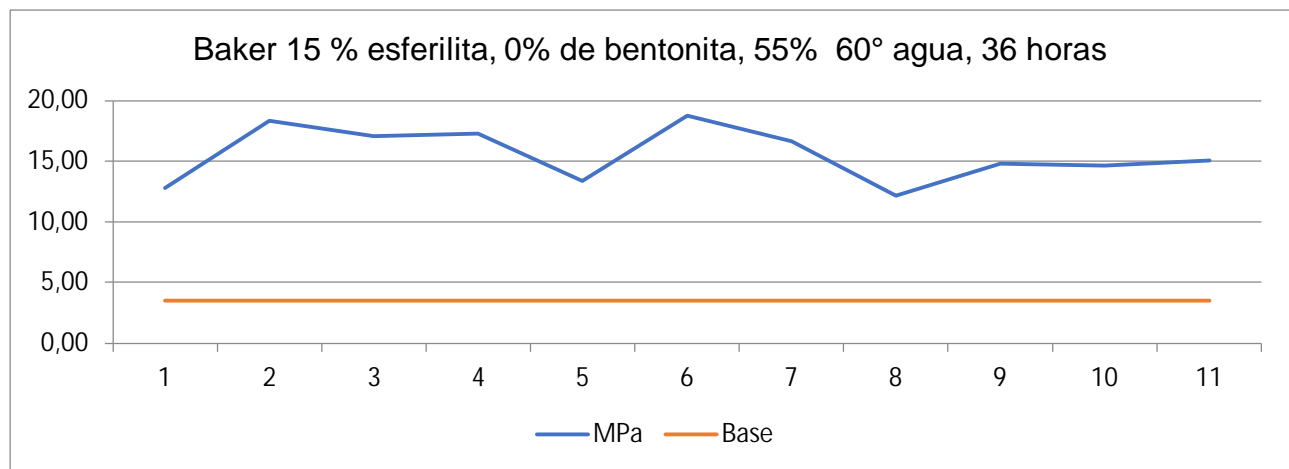


Tabla 38 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 60 °C a 48 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 60 ° 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	Base	C.V %	Densidad
1	5/12/2022	07:07	48	138,30	13,56	3,45	14,84	3.5	23,22	1,65
2	5/12/2022	07:09		123,60	12,12			3.5		
3	5/12/2022	07:11		135,40	13,28			3.5		
4	5/12/2022	07:13		199,50	19,56			3.5		
5	5/12/2022	07:15		143,60	14,08			3.5		
6	5/12/2022	07:17		116,20	11,40			3.5		
7	5/12/2022	07:19		208,08	20,41			3.5		
8	5/12/2022	07:21		194,60	19,08			3.5		
9	5/12/2022	07:23		169,70	16,64			3.5		
10	5/12/2022	07:25		138,70	13,60			3.5		
11	5/12/2022	07:27		96,20	9,43			3.5		
12	5/12/2022	07:29		142,30	13,96			3.5		
13	5/12/2022	07:31		136,20	13,36			3.5		
14	5/12/2022	07:33		123,60	12,12			3.5		
15	5/12/2022	07:35		204,00	20,01			3.5		

Figura 55 Prueba de compresión

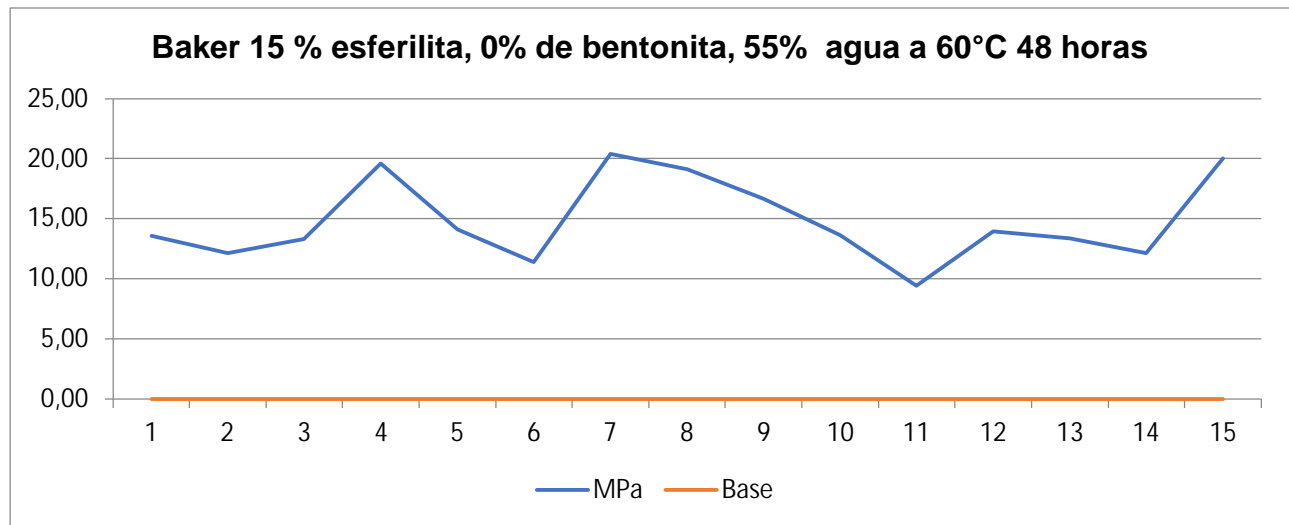


Tabla 39 Prueba base con 15 % esferilita, 0 % bentonita, 55 % agua a 60 °C a 72 horas

Baker 15 % esferilita y 0% de bentonita 60 ° 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	5/12/2022	07:37	72	204,40	20,05	3,98	20,84	19,09	3,50	1,65
2	5/12/2022	07:39		213,30	20,92				3,50	
3	5/12/2022	07:41		156,60	15,36				3,50	
4	5/12/2022	07:43		238,60	23,40				3,50	
5	5/12/2022	07:45		260,70	25,57				3,50	
6	5/12/2022	07:47		243,90	23,92				3,50	
7	5/12/2022	07:49		208,08	20,41				3,50	
8	5/12/2022	07:51		168,90	16,56				3,50	
9	5/12/2022	07:53		197,00	19,32				3,50	
10	5/12/2022	07:55		245,20	24,05				3,50	
11	5/12/2022	07:57		260,70	25,57				3,50	
12	5/12/2022	07:59		233,70	22,92				3,50	
13	5/12/2022	08:01		198,20	19,44				3,50	
14	5/12/2022	08:03		118,30	11,60				3,50	
15	5/12/2022	08:05		240,70	23,61				3,50	

Figura 56 Prueba de compresión

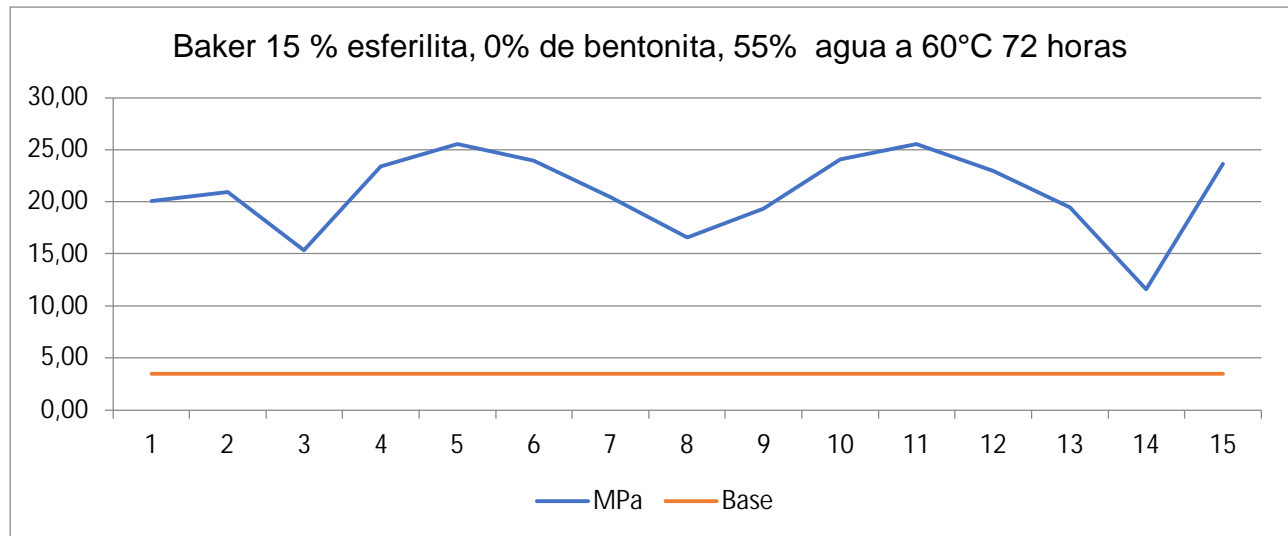


Tabla 40 Prueba base con 15 % esferilita, 1 % bentonita, 55 % agua a 26 °C a 24 horas

Baker 15 % esferilita y 1% de bentonita 28° 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	5/12/2022	10:00	24	35,50	3,48	0,67	3,63	18,57	3,50	1,65
2	5/12/2022	10:02		29,40	2,88				3,50	
3	5/12/2022	10:04		38,40	3,77				3,50	
4	5/12/2022	10:06		42,80	4,20				3,50	
5	5/12/2022	10:08		29,40	2,88				3,50	
6	5/12/2022	10:10		36,70	3,60				3,50	
7	5/12/2022	10:12		39,60	3,88				3,50	
8	5/12/2022	10:14		47,30	4,64				3,50	
9	5/12/2022	10:16		33,90	3,32				3,50	
10	5/12/2022	10:18		37,90	3,72				3,50	
11	5/12/2022	10:20		20,90	2,05				3,50	
12	5/12/2022	10:22		35,00	3,43				3,50	
13	5/12/2022	10:24		46,10	4,52				3,50	
14	5/12/2022	10:26		40,40	3,96				3,50	
15	5/12/2022	10:28		42,30	4,15				3,50	

Figura 57 Prueba de compresión

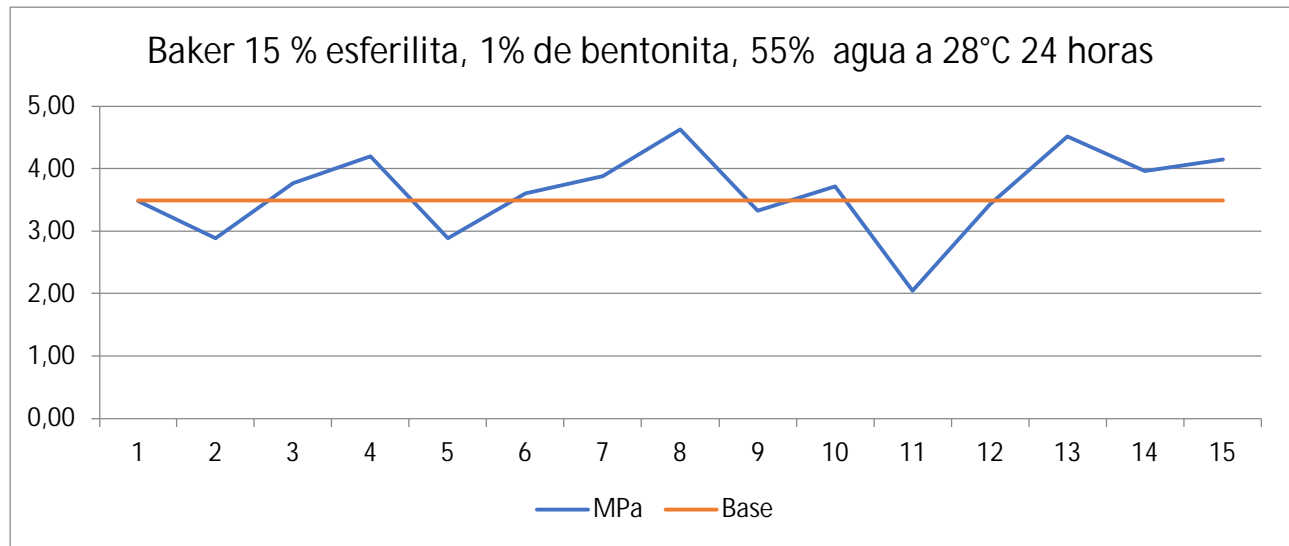


Tabla 41 Prueba base con 15 % esferilita, 1 % bentonita, 55 % agua a 26 °C a 48 horas

Baker 15 % esferilita y 1% de bentonita 28° 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	18/12/2022	11:02	48	75,90	7,44	1,09	6,80	16,04	3,50	1,65
2	18/12/2022	11:04		73,00	7,16				3,50	
3	18/12/2022	11:06		59,10	5,80				3,50	
4	18/12/2022	11:08		47,70	4,68				3,50	
5	18/12/2022	11:10		67,30	6,60				3,50	
6	18/12/2022	11:12		82,00	8,04				3,50	
7	18/12/2022	11:14		75,90	7,44				3,50	
8	18/12/2022	11:16		82,00	8,04				3,50	
9	18/12/2022	11:18		62,80	6,16				3,50	
10	18/12/2022	11:20		52,50	5,15				3,50	
11	18/12/2022	11:22		84,00	8,24				3,50	
12	18/12/2022	11:24		68,90	6,76				3,50	
13	18/12/2022	11:26		74,70	7,33				3,50	
14	18/12/2022	11:28		58,30	5,72				3,50	
15	18/12/2022	11:30		75,90	7,44				3,50	

Figura 58 Prueba de compresión

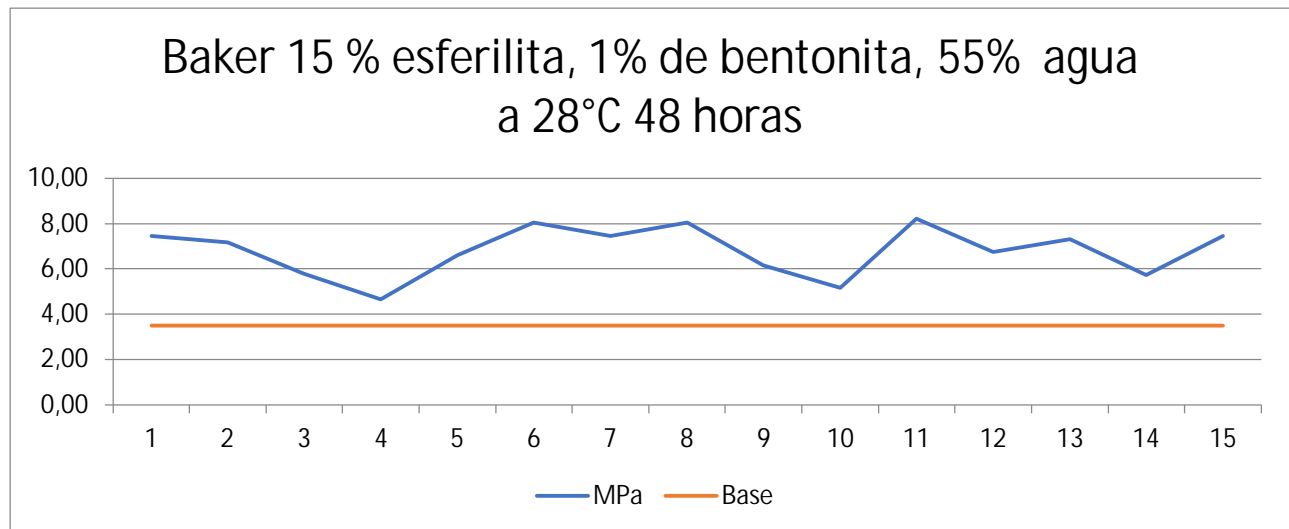


Tabla 42 Prueba base con 15 % esferilita, 1 % bentonita, 55 % agua a 26 °C a 72 horas

Baker 15 % esferilita y 1% de bentonita 28° 55% agua										
Muestra	Fecha	Hora	Horas Fragua	Presión	MPa	Desv Estan	Promedio	C.V %	Base	Densidad
1	18/12/2022	13:00	72	83,20	8,16	1,67	7,84	21,28	3,50	1,65
2	18/12/2022	13:02		81,60	8,00				3,50	
3	18/12/2022	13:04		68,90	6,76				3,50	
4	18/12/2022	13:06		67,00	6,57				3,50	
5	18/12/2022	13:08		74,70	7,33				3,50	
6	18/12/2022	13:10		90,20	8,85				3,50	
7	18/12/2022	13:12		73,40	7,20				3,50	
8	18/12/2022	13:14		43,60	4,28				3,50	
9	18/12/2022	13:16		84,90	8,33				3,50	
10	18/12/2022	13:18		87,70	8,60				3,50	
11	18/12/2022	13:20		82,40	8,08				3,50	
12	18/12/2022	13:22		76,70	7,52				3,50	
13	18/12/2022	13:24		124,80	12,24				3,50	
14	18/12/2022	13:26		71,80	7,04				3,50	
15	18/12/2022	13:28		88,50	8,68				3,50	

Figura 59 Prueba de compresión

