



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

PREDISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO UTILIZADAS PARA POZOS GEOTÉRMICOS DE ALTA ENTALPIA

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍA RENOVABLE

Laurens Fernando Rodríguez Ortiz

Roxana Gabriela Nieto Saldarriaga

Director:

José David Vela Peña

Co-Director:

Andrés Mauricio Pérez Gordillo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energía Renovable

AGRADECIMIENTOS

ii

Quisiéramos comenzar expresando un sincero agradecimiento al director de tesis, el Ing. Jose Vela, cuya experiencia y apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Nuestra gratitud también va al Laboratorio de tecnologías para optimización de perforación y completamiento /Área Experimental de cementos del Icpet en cabeza del Ing. Diego Suarez, cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para la culminación de esta tesis. Apreciamos profundamente el ambiente de aprendizaje que nos ofrecieron.

Español

El proyecto busca establecer compuestos óptimos para una lechada de cemento que considere la degradación térmica causada por la retrogresión del cemento, garantizando el aislamiento hidráulico, la protección de acuíferos superficiales y una prolongada vida útil de los pozos geotérmicos. Para ello, se plantea realizar evaluaciones experimentales cemento Portland Clase G Grado HSR (por sus siglas en inglés High Sulfate Resistance) nacional con diferentes porcentajes de Silica M325, midiendo las propiedades físicas del cemento por afectación de la alta temperatura propia de pozos geotérmicos.

Las propiedades mecánicas evaluadas incluyen la resistencia a la compresión, el módulo de Young, relación de Poisson y la permeabilidad, tanto antes como después de la exposición a altas temperaturas, identificando la mejor lechada que sufra menor degradación por efectos de las altas temperaturas.

Adicionalmente, se revisa el potencial geotérmico en Colombia para el aprovechamiento en la generación de electricidad y el estado del marco legal que regula los pozos geotérmicos en el país.

Inglés

The project aims to establish optimal compounds for a cement slurry that considers thermal degradation caused by cement retrogression, ensuring hydraulic isolation, the protection of surface aquifers, and a prolonged service life of geothermal wells. For this purpose, experimental evaluations are proposed for local Grade HSR Class G Portland cement with different percentages of M325 Silica, measuring the physical properties affected by the high temperatures of geothermal wells.

The mechanical properties evaluated include compressive strength, Young's modulus, and permeability, both before and after exposure to high temperatures, seeking the slurry that undergoes the least degradation due to high temperatures.

Additionally, review the geothermal potential in Colombia for electricity generation and the status of the legal framework regulating geothermal wells in the country.

TABLA DE CONTENIDO

iv

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS	2
	2.1 Objetivo general.....	2
	2.2 Objetivos específicos	2
	2.2.1 Conocer el estado de arte de las lechadas de cemento para pozos geotérmicos.	2
	2.2.2 Analizar el estado legal de la normativa que rige en Colombia para el desarrollo de pozos geotérmicos.	2
	2.2.3 Análisis en el laboratorio de la Formulación de lechadas de cemento para pozos geotérmicos con insumos de mercado colombiano.....	2
III.	PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	3
IV.	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
V.	METODOLOGÍA.....	16
VI.	RESULTADO Y DISCUSIÓN.....	19
	6.1 Geotérmica en Colombia	19
	6.1.1 Potencial Geotérmico en Colombia	19
	6.2 Análisis del Marco Legal Colombiano para Pozos Geotérmicos	22
	6.3 Análisis de laboratorio	25
	6.3.1 Caracterizar Lechada de Cemento	26
	6.3.2 Propiedades mecánicas del cemento	39
	6.3.3 Resultado de Pruebas no destructivas	39
	6.3.4 Resultado pruebas resistencia a la compresión destructiva	44
	6.3.5 Análisis de resultados de permeabilidad.....	45
VII.	CONCLUSIONES	49
VIII.	REFERENCIAS.....	50
IX.	APÉNDICE.....	54

LISTA DE TABLAS

v

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos dependiendo de la temperatura [°C].....	4
Tabla 2. Composición propuesta de las lechadas.....	17
Tabla 3. Resultado para las Lechada 1 - 0% Sílice.....	27
Tabla 4. Resultado para las Lechada 2 - 35 % Sílice.....	29
Tabla 5. Resultado para las Lechada 3 - 45 % Sílice.....	32
Tabla 6. Resultado para las Lechada 4 - 50 % Sílice.....	34
Tabla 7. Comparativo de resultados a diferente % Sílice	36
Tabla 8. Formulación lechada 3 de 45% Harina de sílice.....	37
Tabla 9. Equipos y Metodologías Empleadas medición propiedades mecánicas	40
Tabla 10. Comparativo Propiedades Mecánicas a 350 °F	44
Tabla 11. Prueba de resistencia a la compresión destructiva a 350 °F	44
Tabla 13. Resultado de Permeabilidad 0% y 45 % Sílice.....	47

LISTA DE FIGURAS

vi

Figura 1. Diseño esquemático de la cementación pozo [14]	5
Figura 2. Capacidad instalada de generación de energía geotérmica [20].....	8
Figura 3. Modulo Young.....	11
Figura 4. Relación de Poisson.....	12
Figura 5. Cinturón de Fuego del Pacífico [27]	20
Figura 6. Mapa Gradiente Geotérmico de Colombia.....	21
Figura 7. Etapas de Desarrollo de una planta geotérmica*.....	25
Figura 8. Prueba de Mezclabilidad y Prueba de Densidad y - 0% Sílice.....	27
Figura 9. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 1 0% Sílice - Muestra 1	28
Figura 10. Prueba de Mezclabilidad y Filtrado HTHP - 35% Sílice	30
Figura 11. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 2 35 % Sílice - Muestra 1	30
Figura 12. Prueba de Mezclabilidad y Densidad – 45 % Sílice.....	32
Figura 13. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 3 45 % Sílice - Muestra 1.	33
Figura 14. Prueba de Mezclabilidad y Filtrado HTHP – 50% Sílice.....	35
Figura 15. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 4 50% Sílice - Muestra 1	35
Figura 16. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la 0% Sílice - Muestra control a 500 °F.....	38
Figura 17. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la 45% Sílice a 500 °F.....	39
Figura 18. Modulo Young´s de la Lechada 0% - 45% Sílice a 350 °F.....	41
Figura 19. Relación Poisson´s de la Lechada 0% - 45% Sílice a 350 °F.....	42
Figura 20. Modulo Compresibilidad de la Lechada 0% - 45% Sílice 350 °F.....	43
Figura 21. Prueba de resistencia al corte de cemento a 350 °F	45

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la energía renovable geotérmica permite utilizar el calor del interior de la Tierra para obtener electricidad, ofreciendo una alternativa a los combustibles fósiles. Para lograr este fin, se debe realizar un proceso de perforación de pozos, que permite tener acceso a los yacimientos térmicos para su aprovechamiento.

Los pozos geotérmicos representan un desafío para el cemento por las condiciones de alta temperatura que ejerce una marcada influencia sobre las propiedades mecánicas del cemento. El objetivo de esta investigación es identificar la formulación de lechada de cemento que mejor resista la degradación térmica, garantizando así la integridad del pozo y el aislamiento hidráulico; para poder determinar la mejor lechada se realizaron pruebas de laboratorio para evaluación del cemento Portland con distintos porcentajes de Silica, se midieron las diferentes propiedades físicas que nos permitan identificar la mezcla que presenten menor degradación térmica y evaluar estas propiedades a diferentes temperaturas para simular las condiciones de un pozo geotérmico.

La energía geotérmica en Colombia presenta un alto potencial debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico por lo cual la investigación documental se centró en entender el estado del arte de las lechadas de cemento y el potencial geotérmico en Colombia, así como en analizar la normativa legal vigente.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Establecer compuestos de una lechada de cemento que reduzcan la degradación térmica por efectos de retrogresión del cemento y asegure el aislamiento hidráulico, protección de acuíferos superficiales y vida útil del pozo geotérmico.

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1 Conocer el estado de arte de las lechadas de cemento para pozos geotérmicos.
- 2.2.2 Conocer el potencial geotérmico de Colombia y analizar el estado legal de la normativa que rige en Colombia para el desarrollo de pozos geotérmicos.
- 2.2.3 Analizar en el laboratorio la formulación de lechadas de cemento para pozos geotérmicos con insumos disponibles en el mercado colombiano.

III. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La geotermia se relaciona con el calor almacenado en el interior de la Tierra, y la energía geotérmica es la derivada del aprovechamiento de este calor que fluye desde el interior de nuestro planeta hacia la superficie [1]. Esta fuente de energía renovable corresponde a una energía inmensa y casi inagotable, cuyo potencial se usa para generar electricidad y otras aplicaciones de uso directo. La energía geotérmica es un recurso limpio y renovable que ofrece una alternativa real y más limpia a los combustibles fósiles [2]. Tiene gran disponibilidad permanente, ya que es independiente de las condiciones climáticas. En cuanto al recurso geotérmico, Colombia cuenta con una posición geográfica privilegiada y una geología favorable, dado que parte del territorio se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura natural del subsuelo, cerca de la superficie, es anómalamente alto y se manifiesta con la actividad volcánica actual [3]. El interés de abordar este tema se da porque es un recurso interesante para la generación de energía a través de la perforación de pozos geotérmicos con el fin de obtener vapor o fluidos geotérmicos (agua) destinados para la generación de energía eléctrica. El problema específico que abordaremos en este proyecto está relacionado con el diseño de la lechada de cemento para un pozo geotérmico, entendiendo que las altas temperaturas representan un reto para que la lechada cumpla sus funciones de aislamiento, adherencia, distribución uniforme en el anular para garantizar un adecuado sello hidráulico efectivo y de esta manera evitar contaminación de acuíferos superficiales o migración no controlada de fluidos a la superficie.

Los recursos geotérmicos generalmente se clasifican en rangos de temperatura entre 80°C y por encima de 300°C. En general los recursos por encima de 150°C son utilizados para generación de energía eléctrica. A continuación, se presenta las escalas por temperatura realizadas por diferentes autores.

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos dependiendo de la temperatura [°C]

	Muffler & Cataldi [4]	Hochstein [5]	Benderitter & Cormy [6]	Nicholson [7]	Axelsson & Gunnlaugsson [8]
Baja Entalpia	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	≤ 150 °C	≤ 190 °C
Media Entalpia	90 – 150 °C	125 – 225 °C	100 – 200 °C	-	-
Alta Entalpia	> 150 °C	> 225 °C	> 200 °C	> 150 °C	> 190 °C

Adicionalmente, los recursos geotérmicos pueden ser clasificados también de la siguiente manera:

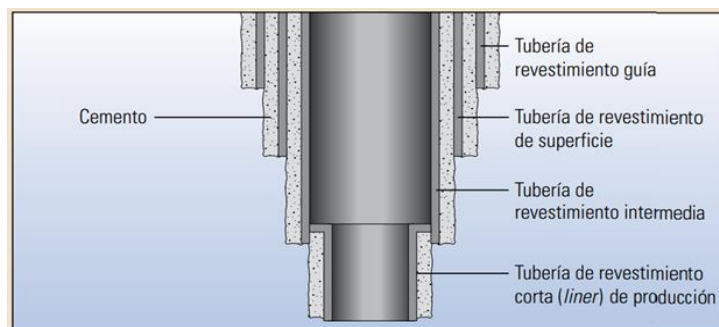
- a) Sistemas dominados por vapor con temperaturas hasta 240°C.
- b) Sistemas dominados por agua caliente con temperaturas hasta 350°C.
- c) Recursos provenientes de roca caliente con temperaturas hasta 650°C.

Los pozos correspondientes a los grupos a) y b) son recursos de tipo hidrotermales convectivos, los cuales son explotados comercialmente en el mundo en mayor porcentaje, y los del grupo c) son los relacionados con roca seca caliente y los provenientes directamente de magma [9]. El proceso de perforación de pozos geotérmicos es primordial para el desarrollo y masificación de esta fuente de energía renovable, representando un desafío en el diseño del pozo por las condiciones de alta temperatura y presión presentes en este tipo de pozos. El correcto diseño de la lechada de cementación permite extender el ciclo de vida de un proyecto de generación eléctrica con recursos geotérmicos [10]; por esta razón, se planteó investigar el prediseño de una lechada de cemento para evitar las degradaciones por efectos de la temperatura.

Uno de los mayores problemas al cementar pozos geotérmicos es la pérdida de resistencia del cemento por la exposición a altas temperaturas, que genera cambios en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, el módulo de Young estático y la relación de Poisson [11]. La adherencia es un factor no menos importante en el diseño de la lechada de cementación y está relacionado en cómo se comporta este sólido en la interfaz revestimiento – cemento - formación. Dicha adherencia puede verse afectada por choques térmicos, durante el proceso de producción de vapor [12].

Otro de los retos a enfrentar es el bombeo y desplazamiento de la lechada durante el trabajo de cementación, ya que este estará afectado por cambios de temperatura durante este proceso, lo que puede generar cambios súbitos de las propiedades, como tiempo de bombeabilidad, fragüe prematuro o deshidratación y posibles pérdidas de circulación, generando problemas de aislamiento hidráulico o estabilidad estructural del pozo [13].

Figura 1. Diseño esquemático de la cementación pozo [14]



La figura anterior muestra el esquema de la cementación de un pozo donde se observa el aislamiento hidráulico del cemento ubicado entre la tubería y la roca, evitando que se presente migraciones de los fluidos entre las zonas productivas del pozo y previene la migración de fluidos hacia la superficie. Además, la cementación provee un anclaje y sustentación del revestimiento en el pozo y protege la tubería contra la corrosión que puedan generar los fluidos de formación. Si el diseño de la lechada seleccionada no puede asegurar estos objetivos, la vida útil del pozo puede verse comprometida, así como la promesa de producción del proyecto [14].

La lechada de cemento se utiliza para prevenir migración de fluidos producidos en el subsuelo hacia superficie y que pueden contaminar zonas de agua superficial o, en el peor caso, contaminación superficial [14]. En pozos geotérmicos, el diseño de la lechada de cemento es más compleja, ya que estará sujeta a cambios extremos por la alta temperatura de los fluidos que serán producidos. Uno de los problemas más complejos es la pérdida de resistencia del cemento, debido a estas condiciones [11]. Por eso se requieren

pruebas de laboratorio que indiquen el comportamiento de estas lechadas cuando se exponen a altas temperaturas. Dichas pruebas deben ser diseñadas para determinar las propiedades mecánicas de este sólido, como son resistencia a la compresión, módulo de Young estático y relación de Poisson. Otro factor no menos importante es la adherencia, que nos indica cómo será el comportamiento del cemento en la interfase entre el revestimiento – cemento – formación y el efecto térmico en la lechada a cambios extremos de temperatura y la integridad del pozo durante su vida productiva [10]

IV. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Es conocido que, el consumo masivo de energía fósil está causando un daño irreversible en el medio ambiente a nivel mundial, como efecto invernadero y polución [15]. La necesidad de introducir nuevas fuentes energéticas que sean limpias a las necesidades diarias se hace imperativo para mitigar los daños ya generados. Con base en esta problemática, se requiere garantizar el acceso a combustibles limpios para reducir las altas emisiones de CO₂, haciendo uso de energías renovables tales como solar, eólica, y geotérmica. Estas energías ofrecen un camino sustentable hacia la descarbonización [16].

La energía geotérmica, ofrece varias ventajas con relación a energías limpias y renovables, ya que tiene baja emisión de CO₂, es altamente eficiente y genera energía estable que no depende de los cambios climáticos [17].

La energía geotérmica se considera un recurso renovable porque explota el calor interior de la Tierra, que se considera abundante, una vez utilizada y enfriada el agua producida, se reinyecta al yacimiento. Este recurso puede aprovecharlo muchos países del mundo ubicados en lugares geológicamente favorables. Colombia tiene una posición geográfica privilegiada y una geología favorable, ya que parte del territorio se ubica en el Cinturón de Fuego del Pacífico.

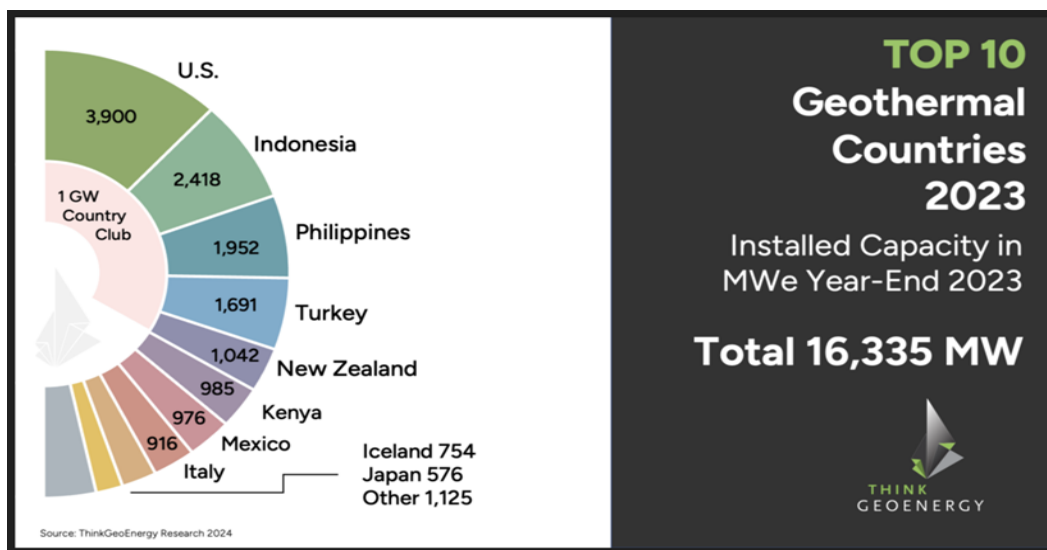
En la mayoría de los casos, para poder aprovechar este recurso, es necesario perforar pozos, algunas veces a miles de metros de profundidad en el subsuelo. Estos pozos requieren tuberías enterradas, que sirven para proteger el pozo perforado, transportar el recurso hacia la superficie y evitar contaminación o migración de los fluidos producidos con acuíferos superficiales.

Mantener el sello hidráulico es una de las partes más importantes en la planeación, ejecución y vida de un pozo geotérmico. Por tal motivo el trabajo de cementación del revestimiento es tan importante, ya que es de esta manera se realiza el cierre del espacio entre el pozo y la tubería o revestimiento [10]. El cemento es la barrera principal que no

permite que haya flujo de fluidos a lo largo de este espacio. La eficiencia de sello del cemento depende de las condiciones del pozo, y de la composición química del cemento como tal [18]. La producción del pozo durante toda su vida puede presentar variaciones de presión y temperatura, que son las variables más comunes que pueden impactar las condiciones mecánicas de la integridad de un pozo. Cuando se pierde la integridad de un pozo, es porque alguna de las barreras, en este caso el cemento, permiten el paso o migración de fluidos a lo largo del espacio entre el pozo y la tubería, pudiendo generar afectaciones ambientales y económicas. Es por tal motivo que el diseño apropiado de una lechada de cemento para pozos geotérmicos es tan importante [10].

El potencial de generación de energía geotérmica a nivel mundial está entre 70 GW a 80 GW [19]. Sin embargo, solo tenemos una capacidad instalada del 20 % de las reservas geotérmicas conocidas en todo el mundo; las cuales se explotan para la producción eléctrica, lo que genera solo 16 GW. Los 10 principales países con mayor capacidad instalada actualmente se pueden apreciar en la figura a continuación

Figura 2. Capacidad instalada de generación de energía geotérmica [20]



Como se aprecia en la figura el país con mayor capacidad instalada es Estados Unidos con 3.900 MW, seguido por Indonesia y Pilipinas [20].

Para el aprovechamiento de este recurso geotérmico, se requiere una serie de procesos de ingeniería que van desde la identificación del potencial geotérmico con estudios geológicos, la extracción de fluidos a través de la perforación de pozos geotérmicos y el desarrollo de una central de generación eléctrica. Por el potencial geotérmico existente en Colombia, se ha presentado un creciente interés en el desarrollo de esta fuente de energía y el interés particular para desarrollar este trabajo es enfocarnos en la perforación de pozos geotérmicos en específico en la lechada de cemento para pozos geotérmicos; dado que la calidad del cemento de un pozo define la vida útil de este.

Como plantea Erik B. Nelson:

La cementación primaria es un procedimiento crítico dentro del proceso de construcción de pozos. La cementación proporciona un sello hidráulico que establece el aislamiento zonal, lo que impide la comunicación de los fluidos entre las zonas productivas del pozo y previene la migración [21, p. 63] de los fluidos hacia la superficie. La cementación provee un anclaje y sustentación del revestimiento en el pozo y protege la tubería contra la corrosión que puedan generar los fluidos de formación. Si el diseño de la lechada seleccionada no puede asegurar estos objetivos, la vida útil del pozo puede verse comprometida, así como la promesa de producción del proyecto [21].

Es importante resaltar que cuando los cementos son expuestos a altas temperaturas presentan cambios en sus características de composición química que pueden comprometer las propiedades mecánicas del mismo y por lo tanto sus funciones principales afectando su integridad; a continuación, se presentan los efectos que pueden generarse por la exposición a altas temperatura:

Retrogresión de la resistencia:

Cuando el cemento Portland es expuesto a temperaturas mayores a 230°F (110°C) se empieza a generar un fenómeno conocido como retroceso de la resistencia que puede definirse como un cambio en los productos de hidratación como por ejemplo en el gel

amorfo C-S-H, este fenómeno se debe a que el cemento Portland es básicamente silicato de calcio siendo el silicato tricálcico y el silicato dicálcico los compuestos más abundantes. Estos compuestos al estar en presencia de agua se hidratan formando un gel de silicato de calcio hidratado llamado “gel CSH”, el cual es el responsable del desarrollo de la resistencia mecánica y de la estabilidad dimensional del cemento endurecido a temperaturas ordinarias. A mayores temperaturas el gel CSH sufre una transformación que trae como consecuencia la disminución de la resistencia a la compresión y el incremento de la permeabilidad del cemento endurecido [22].

Retracción del cemento

Es el cambio de volumen tridimensional del material que tiene lugar tanto en estado fresco como endurecido y cuya causa no obedece a una carga externa al mismo, la retracción del cemento puede clasificarse en 2 tipos química y volumétrica.

Retracción química: Es un proceso que ocurre durante la reacción de hidratación del cemento. El volumen de productos de hidratación formados durante esta reacción es menor que sus reactivos, cemento y agua [14].

Retracción volumétrica: Es una reducción del volumen externo que ocurre durante la hidratación del cemento y su período más crítico es el tiempo posterior al fraguado, es una respuesta mecánica a las tensiones y a los cambios de presión intersticial generados por la retracción química [14]

Las propiedades descritas de retracción del cemento están directamente relacionadas con propiedades mecánicas del cemento del Módulo Young y Relación de Poisson por lo cual definimos a continuación:

El módulo de Young (E): Mide la rigidez de un material y se define como la relación entre el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y la deformación unitaria (cambio relativo en la longitud) en la dirección de la fuerza aplicada. Para el caso de una lechada de cemento, este

valor indica cuán resistente es el material a la deformación elástica bajo una carga. Matemáticamente, se expresa como:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{dL/L}$$

Donde:

σ Es el esfuerzo (Pa)/ Fuerza aplicada sobre unidad de área

ε Es la deformación unitaria / Cambio de la longitud perpendicular a la fuerza.

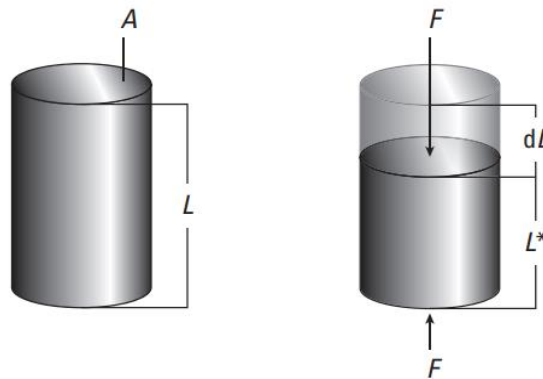


Figura 3. Modulo Young

La Relación de Poisson (ν): Describe cómo un material se deforma en direcciones perpendiculares a la dirección de la carga aplicada. Específicamente, es la relación entre la deformación lateral y la deformación longitudinal. Para una lechada de cemento, esta relación ayuda a entender cómo se expande o contrae lateralmente cuando se aplica una carga axial. Esta se define como:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{lateral}}}{\varepsilon_{\text{longitudinal}}} = -\frac{r^*/r}{L^*/L}$$

Donde:

$\varepsilon_{\text{lateral}}$: Es la deformación lateral / Cambio del radio resultante de la fuerza aplicada.

elongitudinal : Es la deformación longitudinal /Cambio de longitud resultante de la fuerza aplicada.

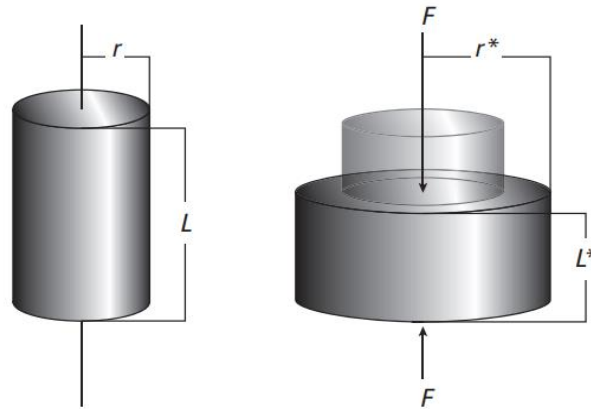


Figura 4. Relación de Poisson

El Módulo de Compresibilidad (K): Mide la resistencia de un material a la compresión uniforme. Es la relación entre el cambio de presión aplicado a un material y la fracción de cambio de volumen resultante. Para una lechada de cemento, este valor indica su capacidad para resistir la compresión sin cambiar significativamente su volumen. Se expresa como:

$$K = -V \frac{dP}{dV}$$

Donde:

V : Es el volumen inicial

dP : Es el cambio de presión

dV : Es el cambio en volumen

Teniendo claros los conceptos explicados a continuación presentamos investigaciones que se han desarrollado sobre la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas de sistemas de cemento que pretende analizar los avances logrados en las investigaciones existentes para evaluar mediante pruebas de laboratorio que simulen las condiciones de fondo, de la lechada desde el inicio de la operación, como en la vida productiva del pozo,

para realizar el mejor diseño de la lechada que cumpla con estos requerimientos. Las pruebas se realizarán de acuerdo con los estándares y prácticas recomendadas de la industria dictada por el Instituto Americano del Petróleo (API). A partir del análisis de los resultados, se llega a una conclusión de la mejor formulación de la lechada de cemento de acuerdo con las condiciones de temperaturas y presión requerida.

A continuación, los estudios de mayor interés para el objetivo de este proyecto, publicaciones más relevantes

Li et al., [23] estudiaron la resistencia del cemento a altas temperaturas para pozos de petróleo modificado con harina de sílice. Las cantidades utilizadas de la sílice varían entre el 40% y el 70% de BWOC, con un tamaño de partículas de 6 μm y 53 μm a unas temperaturas de 716°F, 932°F, 1022°F y 1202°F (380°C, 500°C, 550°C y 650°C). La investigación también presentó las propiedades físicas y mecánicas del cemento como la permeabilidad, la resistencia a la compresión, el módulo de Young y tensión-deformación, cada una de estas propiedades se revisaron antes y después de la exposición a las diferentes temperaturas. Los materiales utilizados fueron: i) Cemento clase G con tamaños de partícula de 19.83 μm . ii) Harina de sílice con un tamaño de 6 μm y 53 μm . iii) Aditivos químicos como el agente de pérdida de fluido (BXF-200L) iv) Agente antiespumante (G603). Luego de la preparación de la muestra bajo la norma API 10B2, realizaron las pruebas de permeabilidad del gas, resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y termogravimétrica. Una vez presentados y analizados los resultados concluyeron que cuando la temperatura cambia entre 716°F (380°C) y 1022°F (550°C) la resistencia a la compresión de la muestra con sílice permaneció estable, el módulo de Young se redujo y con una temperatura de 1202°F (650°C) las dos propiedades disminuyeron.

Pyatina y Sugama [24] realizaron experimentos para determinar la recuperación de la resistencia, el choque térmico, el sellado de grietas y la resistencia a los ácidos compuestos en agua, carbonato alcalino o salmuera geotérmica con una temperatura de 572°F (300°C). Los compuestos que se utilizaron fueron OPC/SiO₂ de alta temperatura, un cemento de

aluminato de calcio con FAF activada con álcali (TSRC), escoria granulada de alto horno activada con álcali (GBFS/SiO₂) y una mezcla de cenizas volantes/cenizas volantes F (FAC/FAF). De igual manera, esta investigación presenta las variaciones del módulo de Young y la resistencia a la compresión teniendo presentes los compuestos ácidos ya nombrados a 572°F (300°C). Dentro del mismo estudio se analizó la resistencia a la compresión de cada uno de los compuestos (OPC/SiO₂, TSRC, GBFS/SiO₂, FAC/FAF) antes de exponerlos al ácido, 14 días después de la exposición al ácido y cuando se realizaron los 5 ciclos de choque térmico. Se concluyó que los compuestos OPC/SiO₂ y TSRC desarrollaron fracturas delgadas, mientras que los otros compuestos que tienden a ser frágiles y muy frágiles presentaron fracturas multidireccionales. En la resistencia a la compresión en los ciclos de choque térmico el TSRC indicó que sólo perdió un 21% de su resistencia, los otros compuestos estuvieron dentro de un rango de 33% y 40%, para el caso del FAC/FAF se evidenció una recuperación del 99% de la resistencia.

Mahmoud y Elkatatny [25] observaron el comportamiento de dos diseños de lechadas, el primer diseño base sin ningún tipo de aditivo y el segundo con adición del 35% en peso de cemento de harina de sílice. Se expusieron los dos sistemas de cemento hasta una temperatura máxima de 302°F (150°C), después se realizaron pruebas para determinar propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson. Concluyeron que la lechada con adición de harina de sílice presenta mejores valores en sus propiedades mecánicas que la de base, y concluyeron que la adición de harina de sílice a un cemento Portland clase G favorece el desarrollo adecuado de las propiedades mecánicas del cemento.

TerHeege et al, [26] Realizaron varias pruebas de laboratorio para entender los cambios en la mineralogía, las propiedades mecánicas y la estructura microscópica del cemento API clase G, en el cual se usó 40% de harina de sílice en peso de cemento con tiempo de exposición de 1-4 semanas, a temperaturas de 140°F-788°F (60°C-420°C) y presiones de 290 psi-2175,6 psi (2MPa-15MPa). El análisis mineralógico se realizó por medio de la difracción de rayos X y espectroscopia de dispersión de energía de rayos X. El módulo de

Young se analizó para conocer las propiedades mecánicas relacionadas a la resistencia a la fractura y resistencia residual mediante experimentos triaxiales, las deformaciones axiales se midieron mediante un transformador diferencial variable lineal externo (LVDT), observando el desplazamiento de deformación de la muestra en la celda triaxial. Como resultado del comportamiento mecánico dentro de la investigación se evidenció que el módulo de Young aumentó en las muestras en las cuales se curó a temperatura ambiente y a una temperatura de 248°F (120°C) por una semana. El módulo de Young disminuyó en las otras muestras expuestas a 482°F (250°C) por cuatro semanas y a 788°F (420°C) por dos semanas. La resistencia a la fractura y la resistencia residual en las muestras de cada temperatura aumentaron según la presión de a 290 psi a 2175,6 psi (2 MPa a 15 MPa), así se concluyó que en cada momento y temperatura a la que se expusieron las muestras la deformación del cemento es una de las más frágiles a presiones bajas y presenta una deformación dúctil a presiones altas.

Con base en la revisión bibliográfica que se realizó y los estudios experimentales de laboratorio expuestos en este capítulo, a diferentes formulaciones de lechadas de cemento y bajo diversas variables, determinamos corroborar en laboratorio, la mejor mezcla de cemento y harina de sílice que cumpla los parámetros requeridos para cementos expuestos a altas temperaturas, con insumos disponibles en el mercado colombiano. A continuación, se presenta en detalle las pruebas de laboratorio realizadas, las cuales sirvieron para determinar la mejor formulación que nos permitiera corroborar los objetivos planteados en este proyecto.

V. METODOLOGÍA

Se realizó una investigación documental para conocer el estado del arte de las lechadas de cemento para pozos geotérmicos y el potencial geotérmico en Colombia. De igual manera, se analizó el estado legal actual de la normativa que rige en Colombia para el desarrollo de la energía geotérmica en el país.

Adicionalmente se llevaron a cabo pruebas de laboratorio donde se evaluaron 2 hitos específicos, necesarios para cumplir el objetivo general.

Uno de los hitos es evaluar el cemento Portland Clase G Grado High Sulfate Resistance nacional con diferentes porcentajes de Silica M325 disponibles en el mercado nacionales con el objetivo de realizar mediciones de las propiedades físicas del cemento que son afectadas por las altas temperaturas que soportara el cemento en los pozos geotérmicos.

Las propiedades mecánicas del cemento que se analizaron son la resistencia a la compresión, el módulo de Young y la permeabilidad, cada una de estas propiedades se revisaron antes y después de la exposición a las diferentes temperaturas con el propósito de determinar la mejor lechada que será la que presente menor degradación por la temperatura; de acuerdo a literatura la permeabilidad al agua debe ser menor a 0.1 mD y una resistencia a la compresión de al menos 6.9 MPa (1000.76 psi), mediante el análisis de pruebas destructivas y no destructivas [9].

En la primera fase se realizaron mezclas con combinaciones de cemento con diferentes porcentajes de sílice propuestos en la Tabla 1 con el objetivo de evaluar las características físicas y mecánicas como son pérdida de filtrado, control de agua libre, sedimentación y reología con una densidad 15.8 ppg que logre mantener el pozo bajo control evitando que se presente influjo de las formaciones abiertas durante el tiempo del bombeo de la lecha de acuerdo con la norma API 10A y 10B2, última versión.

Tabla 2. Composición propuesta de las lechadas

Lechadas a Evaluar	% Cemento Portland Clase G Grado HSR	% Sílica 325 SiO ₂
Lechada 1	100	0
Lechada 2	65	35
Lechada 3	55	45
Lechada 4	50	50

Para que las lechadas cumplan con los parámetros establecidos en las normas técnicas API 10 A y 10 B; se realizó prueba no destructiva de resistencia a la compresión de las muestras en un analizador de cemento ultrasónico (UCA por sus siglas en inglés) por un periodo de 3 días continuos a una temperatura 350 °F (177 °C), con el objetivo de replicar las condiciones de temperatura esperadas en los pozos geotérmicos; en nuestro caso específico el pozo geotérmico está en un rango de temperatura de 210 - 260 °C, clasificándose en zona geotérmica de alta entalpia de acuerdo con la escala de Axelsson and Gunnlaugsson [8]. Los sistemas geotérmicos en este rango de temperatura tienen un alto potencial para la generación eléctrica mediante la entrada de fluidos que pueden ser con predominio de vapor o predominio líquido.

Después del proceso de análisis de la resistencia a la compresión de las lechadas a la temperatura definida se escogió la muestra que presenta *menor efecto retrogresión de la resistencia para la segunda fase de la prueba*; para claridad el efecto retrogresión de la resistencia consiste en un cambio en la estructura del cemento sin sílica, cuando este es sometido a temperaturas mayores a 230 °F (110 °C), presentando una disminución a la resistencia a la compresión lo que compromete la función principal del cemento, que está asociado a la integridad del pozo y asilamiento hidráulico de fluidos del anular.

En la segunda fase de la prueba con la composición definida de porcentaje de Sílice, se repetirán las mediciones con los parámetros establecidos normas técnicas API 10A y 10B y realizará nuevamente la prueba no destructiva de resistencia a la compresión en el analizador de cemento ultrasónico (UCA) por un periodo de 3 días continuos a una temperatura 500 °F (260 °C); adicionalmente se ampliarán las pruebas no destructivas al

incluir la medición de la permeabilidad al gas. En esta fase se realizó también pruebas destructivas para determinar la resistencia a la compresión, utilizando la lechada de 0% de Sílice como control y la lechada que mejor desempeño presente en la primera fase. Estas pruebas se realizaron a una temperatura de 350 °F

VI. RESULTADO Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados de la investigación desarrollada con el objetivo de conocer el potencial geotérmico en Colombia, la normativa vigente y los análisis de laboratorios realizados para establecer compuestos de una lechada de cemento que considere la degradación térmica por efectos de retrogresión del cemento.

6.1 Geotermia en Colombia

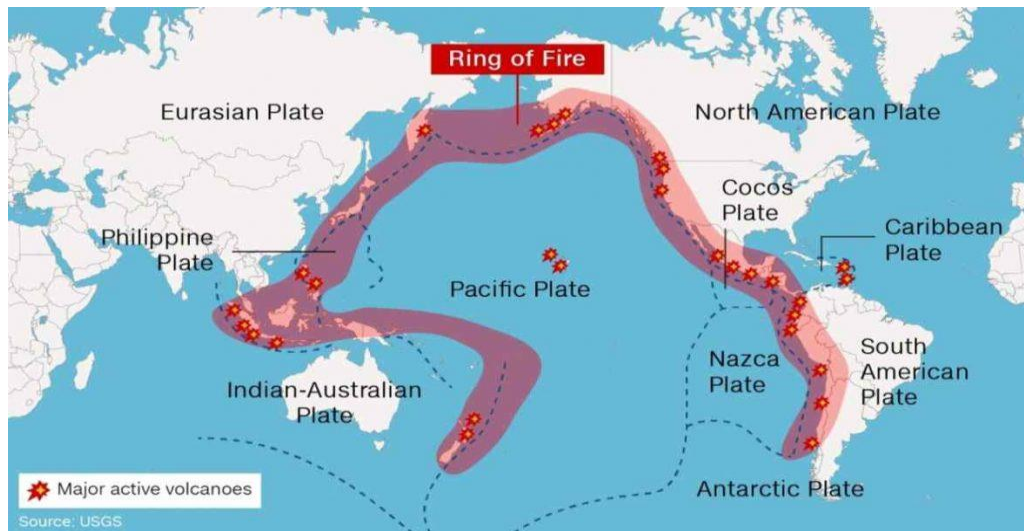
A continuación, presentamos la importancia del recurso geotérmico alojado en el subsuelo del territorio colombiano y su importancia como posible fuente de energía.

6.1.1 Potencial Geotérmico en Colombia

Colombia es un país con un potencial interesante para aprovechar el recurso geotérmico para la generación de electricidad, teniendo en cuenta las características tectónicas y geológicas del país, dado que parte del territorio se ubica en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura natural del subsuelo, cerca de la superficie, es anómalamente alto y se manifiesta con la actividad volcánica actual.

Para Ampliar un poco más el contexto el Cinturón de Fuego del Pacífico (Figura 3) en una larga Cadena tectónica de 40 mil kilómetros, ubicada en el Océano Pacífico, que tiene forma de herradura y se caracteriza por tener una gran actividad sísmica y volcánica generado por el movimiento de placas tectónicas, particularmente en Colombia convergen las placas tectónicas de Nasca y del caribe contra la placa de Suramérica.

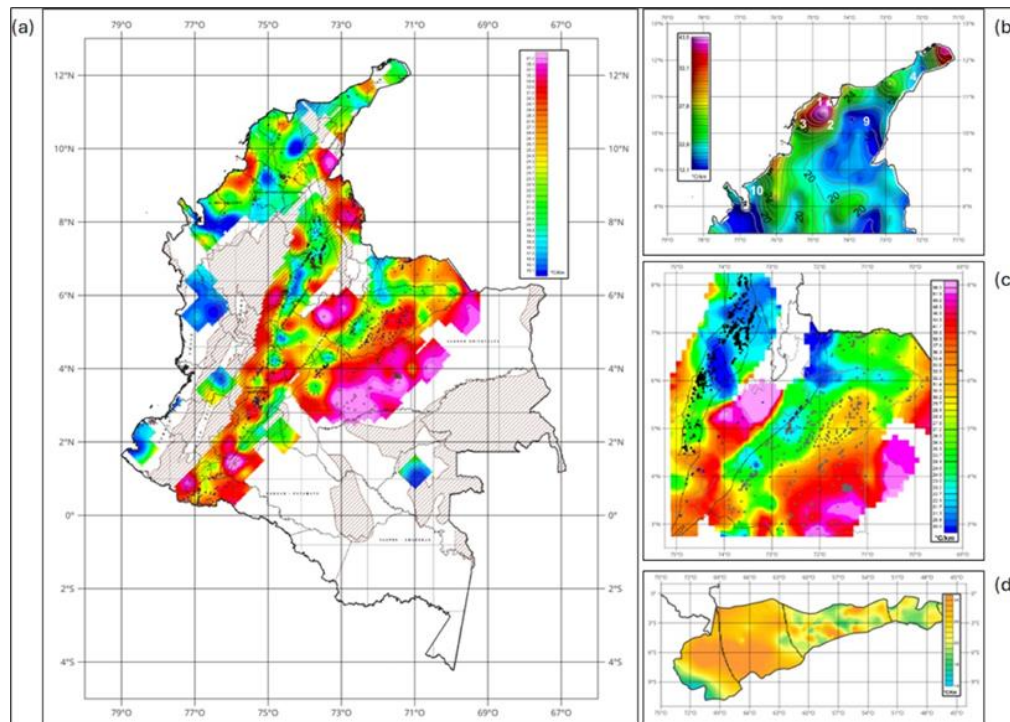
Figura 5. Cinturón de Fuego del Pacífico [27]



Uno de los retos de Colombia para desarrollar energías geotérmicas son las estimaciones precisas del potencial del territorio nacional porque, pese a la abundancia de recursos geotérmicos teóricos, gran parte del país no tiene mediciones de gradiente geotérmico. El mapa de gradiente geotérmico más actual para Colombia cubre aproximadamente la mitad del territorio del país, para el resto no se dispone de determinaciones sistemáticas del gradiente geotérmico.

En la figura a continuación podemos observar las diferentes actualizaciones del Mapa de gradiente geotérmico de Colombia: (a) modificado de Alfaro et al. (2009). (b) Mapa de gradiente geotérmico colombiano-caribeño. modificado de Gómez et al. (2019). (c) gradiente geotérmico para la cuenca Llanos Oriental. modificado de Matiz-León (2023). (c) gradiente geotérmico de la cuenca del Amazonas en el norte de Brasil. modificado de Pimentel y Hamza (2010).[28]

Figura 6. Mapa Gradiente Geotérmico de Colombia



Dado que es importante conocer el potencial geotérmico, se han adelantados varios estudios en el país para determinar el potencial de generación eléctrica a partir de recursos geotérmicos; siendo uno de los más reciente el estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano en 2022 [29]. Este estudio concluyó que Colombia tiene un calor almacenado de 138.60 EJ y una capacidad eléctrica de 1170.20 MWe, para recursos geotérmicos relacionados con sistemas hidrotermales asociados a sistemas volcánicos y para los sistemas geotérmicos no relacionados con volcanes, se calculó un calor almacenado de 49.56 EJ y una potencia eléctrica de 24.95 MWe.

Los recursos geotérmicos de alta entalpía ($> 200^{\circ}\text{C}$), que corresponden a Nereidas - Botero Londoño, Cerro Machín, Cerro Bravo, Paramillo de Santa Rosa, San Diego, Caldera del Paletará, Chiles Cerro Negro, Azufral y Paipa, tienen un calor almacenado total de 85.6 EJ y una potencia eléctrica total de 834.6 MWe, que corresponde al 70 % del potencial calculado para todo el territorio.

Es importante resaltar que el Servicio Geológico Colombiano aclaró que estas estimaciones son preliminares y fueron realizadas con el método volumétrico que se basó en la presencia de manifestaciones superficiales, no se incluyen sistemas geotérmicos ciegos, posibles recursos de roca seca caliente, ni recursos asociados a cuencas sedimentarias.

Es probable que el recurso geotérmico alojado en el subsuelo del territorio colombiano sea mayor al de estas estimaciones, considerando que, como se dijo en el párrafo anterior, no se incluyen todos los recursos geotérmicos existentes [29].

6.2 Análisis del Marco Legal Colombiano para Pozos Geotérmicos

A continuación, presentamos la evolución del marco legal colombiano para la introducción de las energías renovables, entre ellas el aprovechamiento geotérmico como fuente de energía:

1. **Ley 23 de 1973** – Esta ley nace con el objetivo de prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente, y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional [30].
2. **Decreto 2811** de 1974 - Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de **Protección al Medio Ambiente**. El cual establece que el ambiente es un patrimonio común que es de utilidad pública e interés social y regula el manejo de los recursos renovables. En el numeral 8° del artículo 3° incluye el manejo de los recursos geotérmicos como un recurso natural renovable. Así mismo en su artículo 167°, Calificó como un energético primario [31].
3. **Ley 1715 de 2014** – que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, para promover el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía [32].

4. **Ley 2099 de 2021** – Establece la creación del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE); con el objetivo de promover, ejecutar y financiar planes, programas y proyectos de Fuentes No Convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, y gestión eficiente de la energía. Modifico, el artículo 176 por el artículo 18° que la concesión de aguas superficiales y/o subterráneas será otorgada por parte de la autoridad ambiental en la licencia ambiental, dependiendo del tipo de uso del recurso Geotérmico [33].
5. **Decreto 1318 de 27 julio de 2022** - *"Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015 Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, con el fin de reglamentar los artículos 21 y 21-1 de la Ley 1715 de 2014 en lo relacionado con el desarrollo de actividades orientadas a la generación de energía eléctrica a través de geotermia"* [34].

Que el artículo anteriormente señalado, prescribe a través de sus párrafos:

- (i) El Ministerio de Minas y Energía podrá cobrar una contraprestación a los interesados en desarrollar proyectos de generación de energía eléctrica con geotermia por la delimitación de las áreas en las que dichos proyectos se adelanten, a través del Registro Geotérmico;
 - (ii) Este mismo ministerio establecerá la información que deberán suministrar quienes deseen mantener el registro geotérmico y que dicha información será enviada al ministerio, o la entidad que éste designe, para aumentar el conocimiento sobre el subsuelo y el potencial geotérmico del país; y
 - (iii) Todo proyecto para explorar y explotar energía geotérmica deberá solicitar el registro geotérmico del artículo mencionado antes, sin perjuicio de obtener los permisos respectivos requeridos en materia ambiental.
-
6. **Resolución 40302 de 5 agosto de 2022** – Se establecen los requisitos generales, técnicos que registrarán el registro geotérmico e información para el otorgamiento de los permisos de exploración y explotación del recurso geotérmico con fines de

generación eléctrica. En esta resolución en el TITULO V ACTIVIDADES DE PERFORACION, INYECCION Y ABANDONO DE POZOS, Artículo 26° se **delimitan los lineamientos** técnicos para el diseño de los pozos, la planeación de las actividades de perforación, la selección de los equipos e instrumentos a utilizar. Resaltando el objeto de estudio de esta investigación “4. *Cementación: De acuerdo con el desafío del pozo geotérmico, las tuberías correspondientes deberán estar debidamente cementadas con el fin de dar el soporte mecánico necesario del pozo debido a los intensos ciclos térmicos a los que se verá sometido entre los procesos de producción e inyección, además de proteger el casing de la corrosión que genera los fluidos de las formaciones presentes en la columna estratigráfica atravesadas.*”

“El cemento utilizado deberá ser diseñado para resistir las condiciones de altas temperaturas, y condiciones de interacción química.” [35].

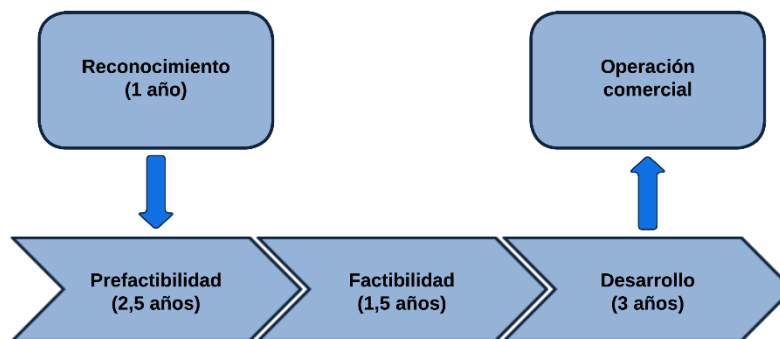
7. **Resolución 40234 de 23 febrero de 2023** - Mediante el **Artículo 1** establece la delegación a la Agencia Nacional de Hidrocarburo (ANH) para “...*la elaboración de los insumos y el apoyo necesario para la continuidad en la formulación y diseño de la política pública a cargo del Ministerio de Minas y Energía, de los siguientes recursos energéticos: geotérmica...*” [36].

Un hecho importante es el anuncio realizado por el presidente de la Agencia Nacional de Hidrocarburo (ANH) que anuncio que en el segundo semestre del 2024, deberíamos lanzar nuestra primera ronda de energía geotérmica”, dijo Velandia, enfatizando que el organismo está trabajando alineado con el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y han invertido una cantidad importante de sus recursos para determinar el potencial geotérmico de Colombia; en caso de materializarse con éxito la subasta representaría un impulso para el desarrollo de la geotérmica como fuente de energía para el país. [37]

El éxito de la subasta de energía geotérmica dependerá del instrumento que se desarrolle sea atractivo para las empresas públicas y privadas, donde se tenga en cuenta que es un recurso que se encuentra en el subsuelo, requerirá que se realicen regulaciones

diferentes a las energías renovables tradiciones como la Solar y Eólica; se debe tener claro que hasta la perforación del pozo no es posible determinar con certeza el potencial real del recurso geotérmico y ya en esta etapa, la inversión ejecutada en el desarrollo del proyecto ha sido alta, es decir un capital a riesgo. A continuación, se presenta una descripción breve de las etapas para el desarrollo de geotérmicas para generación eléctrica.

Figura 7. Etapas de Desarrollo de una planta geotérmica* [38]



* los tiempos presentados no incluyen retrasos por consultas previas o problemática de índole social

- a) Reconocimiento: Identifican y seleccionan las zonas potenciales y se hace el análisis de restricciones ambientales.
- b) Prefactibilidad: Estudios (Geología, Geofísica, Geoquímica), Definición del gradiente térmico y se elabora el modelo geotérmico.
- c) Factibilidad: Perforación, Evaluación del yacimiento, determina la viabilidad técnica y económica.
- d) Desarrollo: Elabora el diseño de la planta, Perforación pozos de desarrollo (producción y reinyección), Construcción de la planta de generación para su operación comercial [38]

6.3 Análisis de laboratorio

Los análisis en el área experimental de cementos se realizan de acuerdo con los lineamientos establecidos en la API RP 10B-2, "*Recommended Practice for Testing Well Cements*" donde se definen las pruebas de laboratorio que se llevan a cabo a las lechadas

de cemento para pozos de petróleo que son aplicables también para lechadas de pozos geotérmicos. En el Anexo C pueden consultar los parámetros, el equipo utilizado y una breve descripción de cada prueba realizada.

6.3.1 Caracterizar Lechada de Cemento

Antes de entrar a analizar los resultados es importante resaltar que la principal prueba para determinar la mejor lechada de cemento estará determinada principalmente por la prueba de resistencia a compresión por un método no destructivo por lo cual explicaremos más a detalle los resultados gráficos que se obtendrán de la prueba. La prueba (Figura 9 a 17) consiste en realizar el secado de la muestra a condiciones controladas de temperatura (línea roja) la cual se aumenta hasta alcanzar la temperatura [°F] objetivo de 350 °F. Durante la duración de la prueba se toman medidas de presión [Kpsi] (línea verde) y el cambio en la velocidad de una señal ultrasónica transmitida a través de la muestra de cemento a medida que se endurece (línea azul). La Resistencia a la compresión [psi] (línea magenta) se determina mediante un algoritmo del equipo que emplea los parámetros medidos para realizar el cálculo; siendo esta la característica de interés experimental la cual analizaremos a detalle.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la primera fase experimental para determinar la mejor Lechada de Cemento; para cada combinación de cemento con diferentes porcentajes de sílice, se llevaron a cabo pruebas independientes en diferentes laboratorios.

Lechada 1: = 0 % de Sílice

La lechada de cemento utilizada como blanco o punto de partida, está compuesta por 100% cemento marca HOLCIM, Clase G, de los lotes 2402 y 2403. Fueron necesarios 781.71 g. Además, se emplea el componente FL-01, un polímero que actúa como controlador de filtrado, con una concentración de 0.70 % por peso de cemento (BWOC por sus siglas en inglés By Weight Of Cement) correspondientes a 5.47 g. Esta muestra no

contiene sílice, ya que se usará como línea base para determinar la influencia de la sílice en diferentes proporciones en las muestras posteriores. Adicionalmente, se utiliza 348.82 g de agua fresca como componente de la mezcla.

La tabla 2, presenta los resultados obtenidos de la *lechada 1* al 0% de sílice:

Tabla 3. Resultado para las Lechada 1 - 0% Sílice

Prueba	Muestra 1	Muestra 2	Unidades	
Mezclabilidad	5	5	---	
Densidad	15,8	15,8	ppg	
Filtrado API	54	48	ml	
Agua libre 0°	0	0	ml	
Agua libre 45°	0	0	ml	
Reología a temperatura ambiente	Viscosidad Plástica	107	98	cP
	Yield Point	11	10	(lb/100ft ²)
Reología BHCT	Viscosidad Plástica	51	68	cP
	Yield Point	61	71	(lb/100ft ²)
Geles a temperatura ambiente	10 s	4	6	(lb/100ft ²)
	10 min	22	24	(lb/100ft ²)
Geles BHCT	10 s	20	25	(lb/100ft ²)
	10 min	44	47	(lb/100ft ²)
Resistencia a la compresión no destructiva	8h	860	880	psi
	12h	598	599	psi
	24h	243	259	psi
	48h	239	247	psi
	72h	244	238	psi
	96h	243	234*	psi

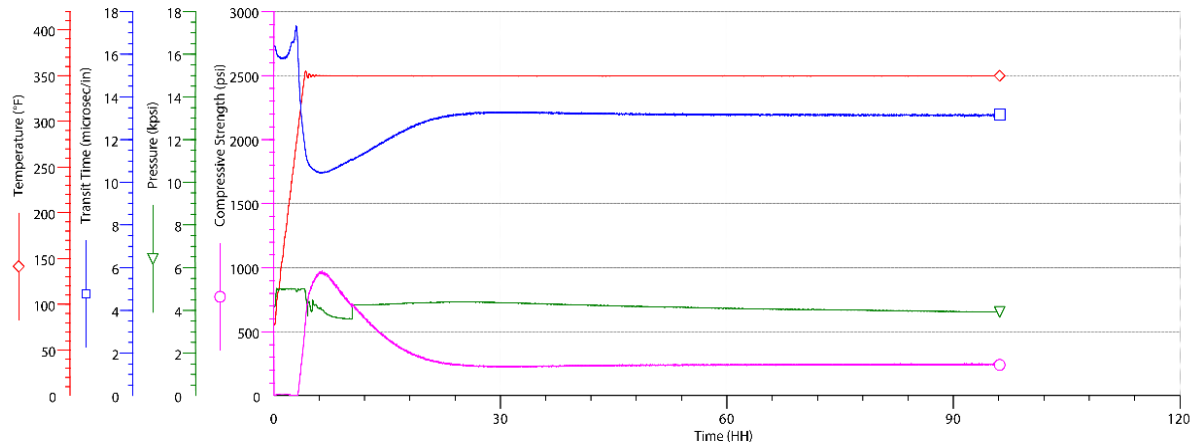
*El resultado de la muestra 2 de 0% SiO₂ corresponde a 89 horas, tiempo de finalización de la prueba.

Con el fin de facilitar su interpretación, a continuación, se incluyen imágenes y gráficos que visualizan los resultados obtenidos.

Figura 8. Prueba de Mezclabilidad y Prueba de Densidad y - 0% Sílice



Figura 9. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 1 0% Sílice - Muestra 1



En la figura 9, observamos los resultados de la prueba de resistencia a compresión de lechada con 0% de sílice, realizada a 350 °F (Línea roja), alcanzando una presión de aproximadamente, en 4100 psi (Línea verde) a partir de las primeras 11 horas de la prueba.

Al analizar la curva de la resistencia a la compresión (línea magenta) observamos claramente el efecto de retrogresión del cemento por la exposición a la alta temperatura en el tiempo. La resistencia a la compresión aumenta en las primeras 5 horas de curado de la prueba hasta alcanzar casi 1000 psi; pero a partir de este punto la resistencia cae hasta estabilizarse a 240 psi a partir de 26 horas de prueba.

El efecto observado se debe a la química del cemento portland que está compuesto esencialmente por silicato calcio. Al hidratarse se forma una fase C-S-H, también conocida como gel CSH que es responsable de la resistencia y estabilidad del cemento; sin embargo, a temperaturas superiores a 230 °F este compuesto sufre un cambio a silicato dicálcico hidratado alfa $[Ca_2(HSiO_4) OH]$ que es altamente cristalino y permeable dado que al fraguar forman grandes cristales [14].

Este comportamiento también se observó en la segunda muestra presentando valores ligeramente menores en un rango 0.04%. En el Anexo D pueden consultar la gráfica de la segunda muestra.

Lechada 2: 35% sílice

Para la segunda lechada, se utilizó 65% de cemento HOLCIM, Clase G, de los lotes 2402 y 2403, Se requirieron 601.9 g, sirviendo como el principal agente cementante. Adicionalmente, se añade el componente FL-01, un polímero que actúa como controlador de filtrado, con una concentración de 0.70 % por peso de cemento (BWOC) correspondiente a un peso de 4.2 g. A diferencia de la primera muestra, esta lechada incorpora sílice en una concentración de 35% por peso de cemento (BWOC), que corresponde a un peso de 210.7 g, utilizado como agente anti-retrogresión. La mezcla también incluye 319.20 g de agua fresca.

La tabla 3, presenta los resultados obtenidos de la lechada 2 al 35% de sílice:

Tabla 4. Resultado para las Lechada 2 - 35 % Sílice

Prueba		Muestra 1	Muestra 2	Unidades
Mezclabilidad		5	5	---
Densidad		15,8	15.8	ppg
Filtrado API		86	80	ml
Agua libre 0°		0	0	ml
Agua libre 45°		0	0	ml
Reología a temperatura ambiente	Viscosidad Plástica	124	128	cP
	Yield Point	6	8	(lb/100ft ²)
Reología BHCT	Viscosidad Plástica	92	97	cP
	Yield Point	13	17	(lb/100ft ²)
Geles a temperatura ambiente	10 s	1,9	2	(lb/100ft ²)
	10 min	17	19	(lb/100ft ²)
vGeles BHCT	10 s	3,9	4,1	(lb/100ft ²)
	10 min	31,3	33	(lb/100ft ²)
Resistencia a la compresión no destructiva	8h	1782	1681	psi
	12h	2000	1842	psi
	24h	1870	2042	psi
	48h	1872	2026	psi
	72h	1904	2081*	psi
	96h	1911	----	psi
*El resultado de la muestra 2 de 35% SiO ₂ corresponde a 54 horas, tiempo de finalización de la prueba.				

Con el fin de respaldar los datos reportados y facilitar su interpretación, a continuación, se incluyen imágenes y gráficos que visualizan los resultados obtenidos.

Figura 10. Prueba de Mezclabilidad y Filtrado HTHP - 35% Sílice

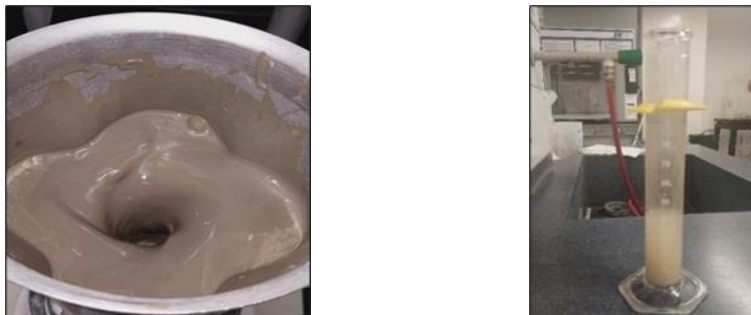
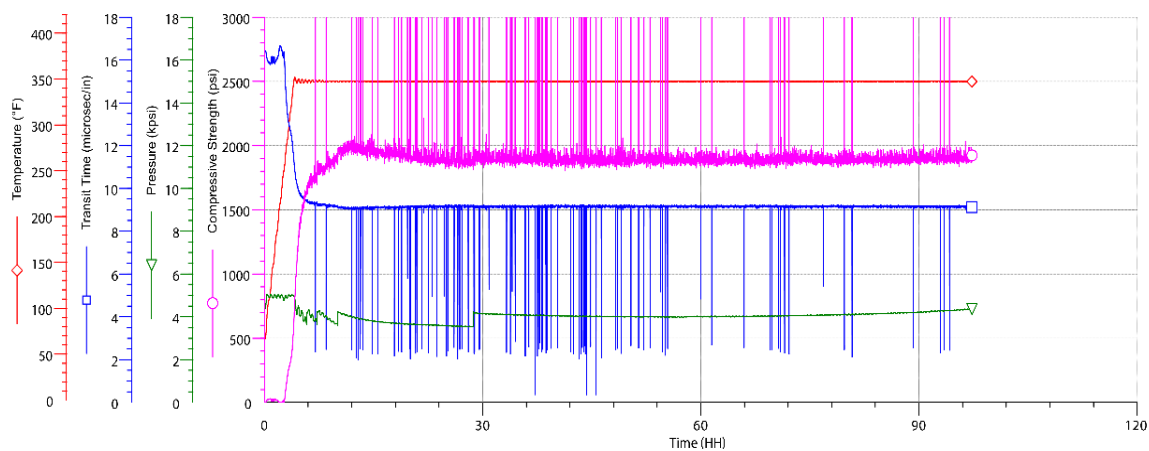


Figura 11. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 2 35 % Sílice -
Muestra 1



En la figura 11 observamos los resultados de la prueba de resistencia a la compresión a la lechada con 35% de sílice, realizada a 350 °F (línea roja), alcanzando una presión de 4000 psi, valor similar a la prueba anterior.

Al analizar la curva de la resistencia a la compresión (línea magenta) observamos claramente que no se presentó efecto de retrogresión en el cemento. La resistencia a la compresión aumento en las primeras 12 horas de la prueba hasta estabilizarse en aproximadamente 1900 psi, esto representa una notable mejoría en la resistencia a la compresión del 86,8 % con relación a la muestra con 0 % de sílice; como era de esperarse

de acuerdo con literatura existente. Lo anterior teniendo en cuenta que la harina sílice es un inhibidor de la retrogresión de la resistencia dado que previene la formación de silicato dicálcico hidratado alfa $[\text{Ca}_2(\text{HSiO}_4) \text{OH}]$.

La incorporación de Sílice en la lechada al cemento genera que con la temperatura se forme el compuesto torbermorita $[\text{Ca}_5(\text{H}_2\text{Si}_6\text{O}_{18})4\text{H}_2\text{O}]$ que es un fuerte aglutinante de cristal más pequeño por lo cual mejora la permeabilidad del cemento; razón por la cual no se presenta el efecto de retrogresión de la compresión y mejora la resistencia a la compresión del cemento [39]. La torbermorita también puede transformarse en dos fases cristalinas como la Xonolita o Girolita, que generalmente tiene buena resistencia a la compresión y una impermeabilidad moderada desde el punto de vista de la cementación de pozos petrolíferos.

La segunda muestra presento un comportamiento similar a la primera muestra. En esta se observan valores ligeramente mayores en un rango 0.08%. En el anexo E pueden observar la gráfica para más detalles.

Lechada 3: 45% sílice

Para la tercera lechada, se utilizó una base compuesta por 55% de cemento HOLCIM, Clase G, de los lotes 2402 y 2403, 02 y 2403. Se requirió 564.7 g, sirviendo como el principal agente cementante. Adicionalmente, se añade el componente FL-01, un polímero que actúa como controlador de filtrado, con una concentración de 0.70 % por peso de cemento (BWOC) correspondiente a un peso de 3.95 g. Similar a la segunda muestra, esta lechada incorpora sílice, pero en una concentración de 45 % por peso de cemento (BWOC) que corresponde a un peso de laboratorio de 254.11 g, utilizada como agente anti-retrogresión. La mezcla también incluye 313.17 g de agua.

La tabla 4, presenta los resultados obtenidos de la lechada 2 al 45% de sílice:

Tabla 5. Resultado para las Lechada 3 - 45 % Sílice

Prueba	Muestra 1	Muestra 2	Unidades	
Mezclabilidad	5	5	---	
Densidad	15,8	15,8	ppg	
Filtrado API	128	120	ml	
Agua libre 0°	0	0	ml	
Agua libre 45°	0	0	ml	
Reología a temperatura ambiente	Viscosidad Plástica	314	308	cP
	Yield Point	18	23	(lb/100ft ²)
Reología BHCT	Viscosidad Plástica	182	174	cP
	Yield Point	8	14	(lb/100ft ²)
Geles a temperatura ambiente	10 s	6,4	9,4	(lb/100ft ²)
	10 min	22,9	24,9	(lb/100ft ²)
Geles BHCT	10 s	12	14	(lb/100ft ²)
	10 min	15	16	(lb/100ft ²)
Resistencia a la compresión no destructiva	8h	2846	2014	psi
	12h	2821	2245	psi
	24h	2694	2473	psi
	48h	2475	2509	psi
	72h	2435	2530	psi
	96h	2341	----*	psi

* El resultado de la muestra 2 de 45% SiO₂ corresponde a 73 horas, tiempo de finalización de la prueba.

Con el fin de respaldar los datos reportados y facilitar su interpretación, a continuación, se incluyen imágenes y gráficos que visualizan los resultados obtenidos.

Figura 12. Prueba de Mezclabilidad y Densidad – 45 % Sílice

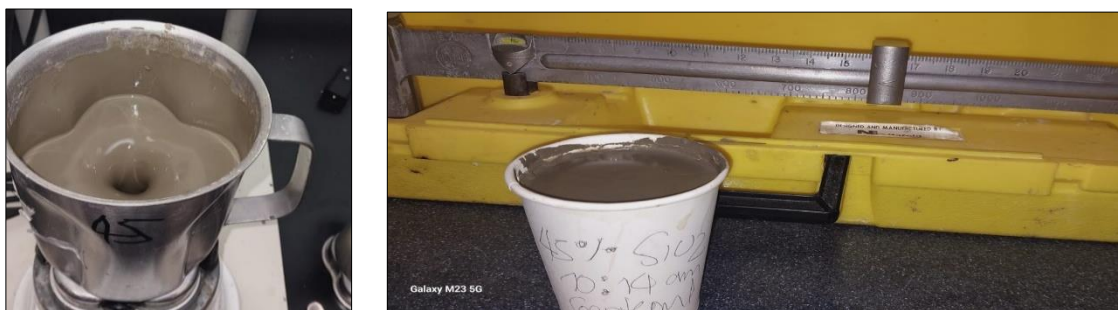
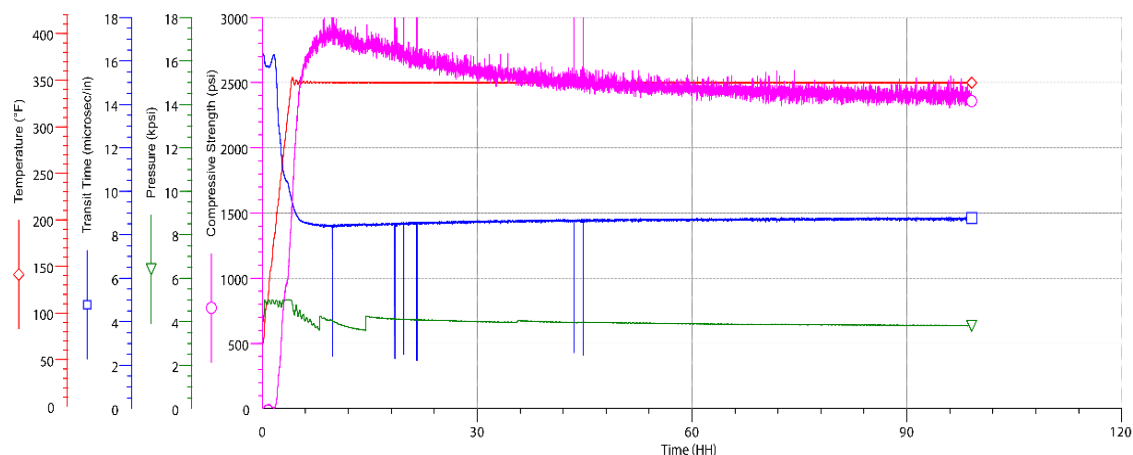


Figura 13. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 3 45 % Sílice -
Muestra 1.



En la figura 13 observamos los resultados de la prueba de resistencia a compresión de la lechada con 45% de sílice, realizada a 350 °F (línea roja), alcanzando una presión de 4000 psi. La presión se mantuvo constante en las tres pruebas realizadas. Al analizar en detalle la curva de la resistencia a la compresión (línea magenta) se puede observar que para la lechada 3 con 45 % de sílice, aumento en las primeras 12 horas de la prueba hasta estabilizarse en aproximadamente 2500 psi; esto representa una mejoría con relación a las muestras con 0 % y 35 % de sílice de 90 % y 24 % respectivamente. Es claro que al adicionar un 10% de sílice a la lechada representa una notable mejoría en la propiedad de resistencia a la compresión

La segunda muestra presentó un comportamiento similar a la primera muestra. En esta se observan valores ligeramente mayores en un rango 0.04%. En el anexo F pueden observar la gráfica para más detalles.

Lechada 4: 50% sílice

Para la cuarta lechada, utilizaremos 50% de cemento HOLCIM, Clase G, de los lotes 2402 y 2403. Se requirieron 547.82 g, sirviendo como el principal agente cementante. Adicionalmente, se añade el componente FL-01, un polímero que actúa como controlador de filtrado, con una concentración de 0.70 % por peso de cemento (BWOC) el cual corresponde a 3.83 g. Similar a las lechadas anteriores, esta mezcla incorpora sílice en una concentración de 50 % por peso de cemento (BWOC) que corresponde a 273.91 g, utilizada como agente anti-retrogresión. La mezcla también incluye 310.4 g de agua fresca. La tabla 5, presenta los resultados obtenidos de la lechada 2 al 50% de sílice:

Tabla 6. Resultado para las Lechada 4 - 50 % Sílice

Prueba	Muestra 1	Muestra 2	Unidades	
Mezclabilidad	5	5	---	
Densidad	15,8	15.8	ppg	
Filtrado API	100	98	ml	
Agua libre 0°	0	0	ml	
Agua libre 45°	0	0	ml	
Reología a temperatura ambiente	Viscosidad Plástica	239	244	cP
	Yield Point	41	42	(lb/100ft ²)
Reología BHCT	Viscosidad Plástica	185	177	cP
	Yield Point	11	13	(lb/100ft ²)
Geles a temperatura ambiente	10 seg	4	6	(lb/100ft ²)
	10 min	25	28	(lb/100ft ²)
Geles BHCT	10 seg	8	10	(lb/100ft ²)
	10 min	43	45	(lb/100ft ²)
Resistencia a la compresión no destructiva	8h	1985	1887	psi
	12h	2323	2203	psi
	24h	2452	2420	psi
	48h	2501	2598	psi
	72h	2537	2558	psi

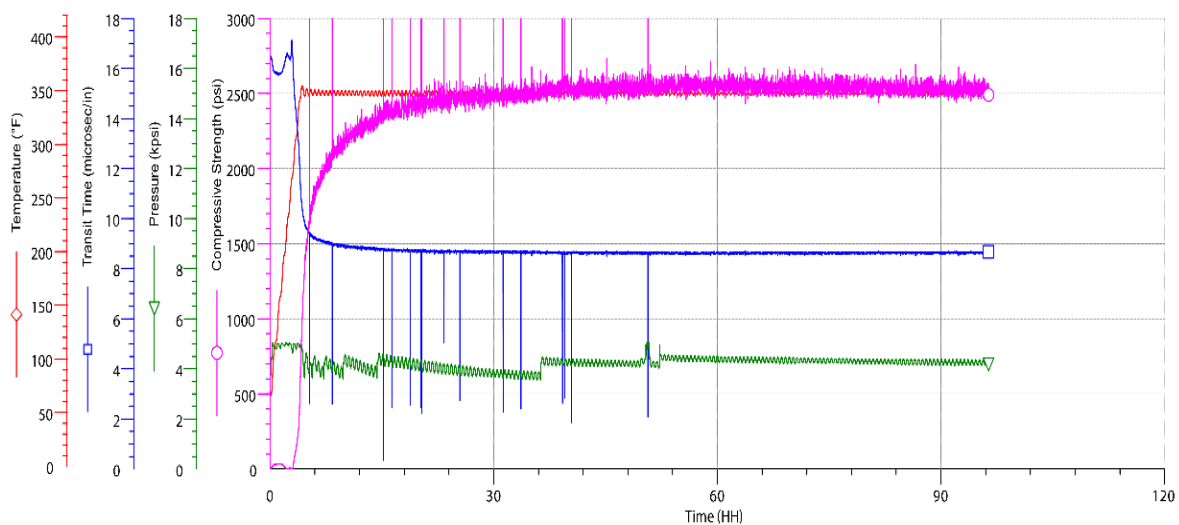
Con el fin de respaldar los datos reportados y facilitar su interpretación, a continuación, se incluyen imágenes y gráficos que visualizan los resultados obtenidos.

Figura 14. Prueba de Mezclabilidad y Filtrado HTHP – 50% Sílice



Figura 15. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 4 50% Sílice -

Muestra 1



En la figura 15 observamos los resultados de la prueba de resistencia a compresión de la lechada con 50% de sílice, realizada a 350 °F (línea roja), alcanzando una presión de aproximadamente de 4000 psi; La presión se mantuvo constante en las cuatro pruebas realizadas.

Al analizar en detalle la curva de la resistencia a la compresión (línea magenta) se puede observar que para la lechada cuatro con 45 % de sílice, aumento en las primeras 12 horas de la prueba hasta estabilizarse en aproximadamente 2500 psi; esto representa una mejoría con relación a las muestras con 0 %, 35 % y 45 % de sílice de 90,1%, 24,8 % y 1% respectivamente. En este caso la adición de un 5% de sílice de más a la lechada no represento una mejoría significativa en la propiedad de resistencia a la compresión, solo un 1%

La segunda muestra presento un comportamiento similar a la primera. En esta se observan valores ligeramente mayores en un rango 0.008% una variación despreciable. En el anexo G pueden observar la gráfica para más detalles.

En la tabla 6 se presenta el resumen de los resultados de las cuatro lechadas analizadas con diferente % de sílice con el objetivo de facilitar la comparación de parámetros obtenidos; donde se puede concluir que:

Tabla 7. Comparativo de resultados a diferente % Sílice

Prueba	0 % Sílice	35 % Sílice	45 % Sílice	50 % Sílice	Unidades	
Mezclabilidad	5	5	5	5	---	
Densidad	15,8	15,8	15,8	15,8	ppg	
Filtrado API	54	86	128	100	ml	
Agua libre 0°	0	0	0	0	ml	
Agua libre 45°	0	0	0	0	ml	
Reología a temperatura ambiente	Viscosidad Plástica	107	124	314	239	cP
	Yield Point	11	6	18	41	(lb/100ft ²)
Reología BHCT	Viscosidad Plástica	51	92	182	185	cP
	Yield Point	61	13	8	11	(lb/100ft ²)
Geles a temperatura ambiente	10 s	4	1,9	6,4	4	(lb/100ft ²)
	10 min	22	17	22,9	25	(lb/100ft ²)
Geles BHCT	10 s	20	3,9	12	8	(lb/100ft ²)
	10 min	44	31,3	15	43	(lb/100ft ²)
Resistencia a la compresión no destructiva	8h	860	1782	2846	1985	psi
	12h	598	2000	2821	2323	psi
	24h	243	1870	2694	2452	psi
	48h	239	1872	2475	2501	psi
	72h	244	1904	2435	2537	psi
	96h	243	1911	2341	---	psi

- Los resultados obtenidos indican que la muestra 3, compuesta por un 45% de sílice, presentó el mejor desempeño en la relación entre pruebas de resistencia a la compresión no destructiva y estabilidad de la lechada, en comparación con las demás muestras.
- Aunque la muestra 4, compuesta por un 50% de sílice, presentó un mejor resultado en la prueba de resistencia a la compresión no destructiva, ya se comienza a observar un comportamiento contrario en las condiciones de manejo y estabilidad de la lechada, debido quizás a una posible saturación o efecto adverso en la mezcla a partir de este porcentaje de sílice. Por lo tanto, no se considera que la muestra 4 sea la de mejor desempeño.

En conclusión, La formulación escogida para continuar con la segunda fase experimental es la Lechada 3 de 45% Harina de sílice.

Código	Componente	Concentración	Unidad	Lab peso (g)	Lote #
CEMENTO NETO	HOLCIM Class G	100	g	564,7	2402//2403
SIO ₂	SILICA	45	BWOC	254,11	NA
FL- 01	POLIMERO	0,7	BWOC	3,95	NA

Tabla 8. Formulación lechada 3 de 45% Harina de sílice

Al definir la formulación se repitieron las pruebas de resistencia a compresión por un método no destructivo para las muestras de control de 0 % de sílice y de 45% sílice (Figura 16 y 17), donde observamos los resultados de la prueba de resistencia a compresión de las 2 lechadas, realizada a 500 °F (Línea roja), alcanzando una presión de aproximadamente de 500 - 600 psi respectivamente (línea verde); Al analizar a detalle la curva de la resistencia a la compresión (línea magenta) se estabiliza en aproximadamente a 500 para 0 % de sílice; pero en la muestra de 45% observamos una pendiente negativa que disminuye pero que no se logró estabilizar en las 33 horas que duró la prueba, el valor final es aproximadamente 1950 psi. La prueba de 45 % a 500 °F no se pudo extender más por limitaciones del equipo.

Nos obstante, al realizar una comparación de la resistencia a la compresión de la muestra sin sílice y la muestra con 45% de sílice por peso de cemento, a las 33 horas de la duración de las pruebas se obtuvo un valor de resistencia a la compresión de 400 psi y 1950 psi respectivamente, lo que representa un aumento de la resistencia a la compresión del 80 % en comparación al valor de la muestra sin sílice.

Figura 16. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la 0% Sílice -
Muestra control a 500 °F

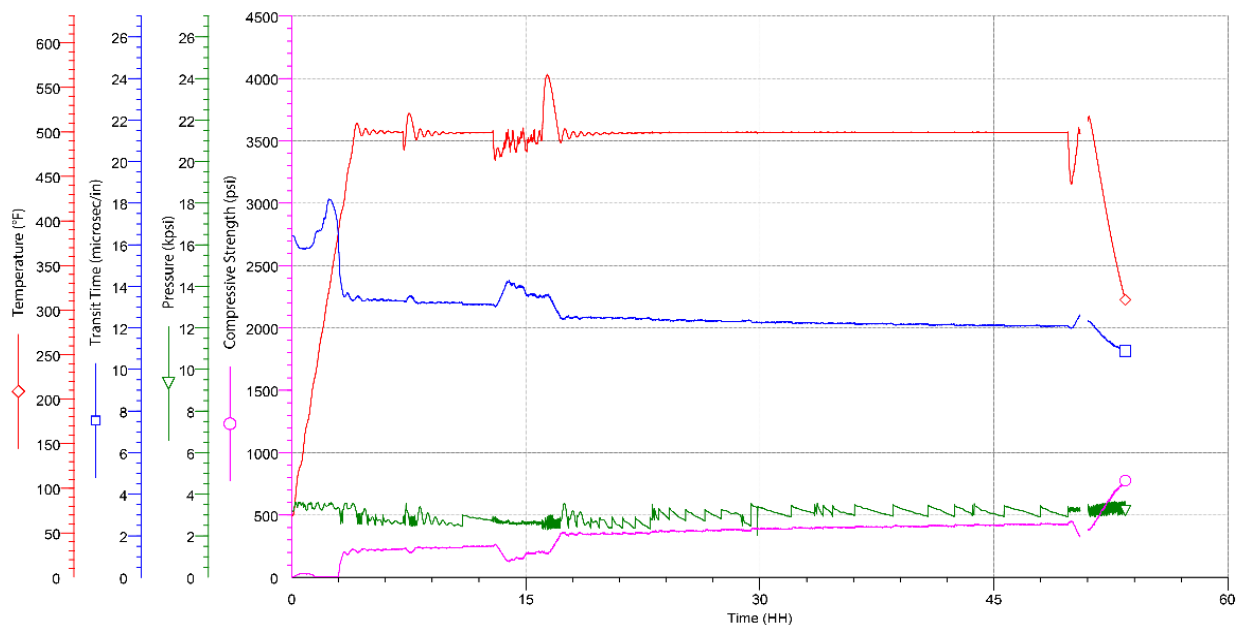
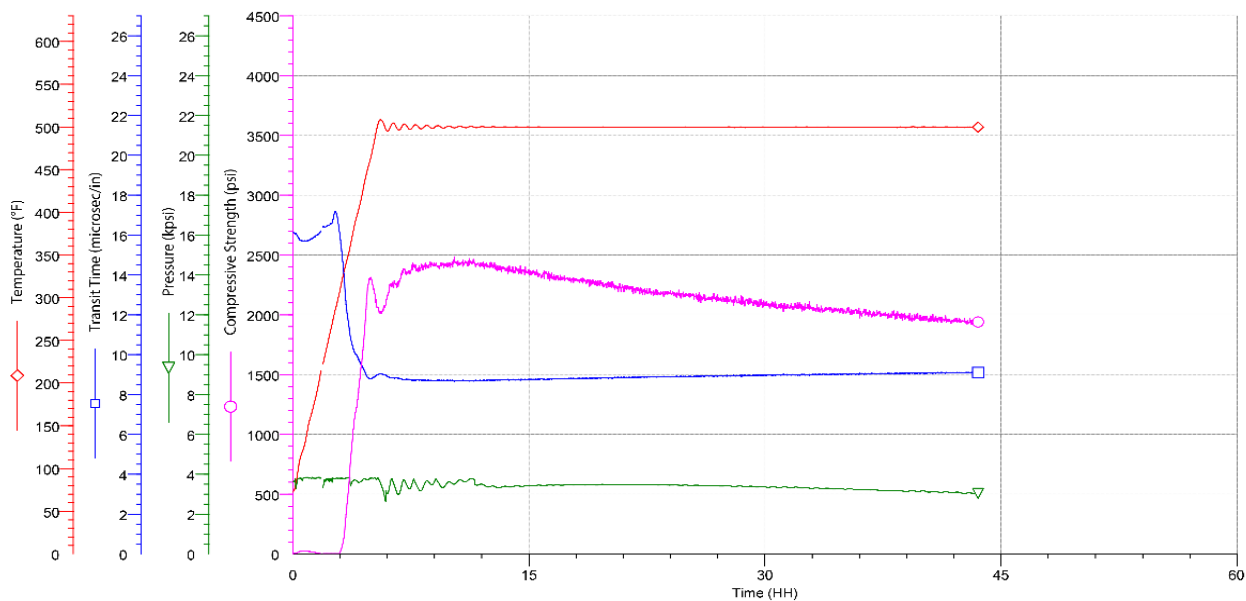


Figura 17. Prueba de resistencia a la compresión no destructiva para la 45% Sílice a 500 °F




6.3.2 Propiedades mecánicas del cemento

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la segunda fase experimental para determinar las propiedades mecánicas del cemento a una temperatura de 350°F para la muestra que presentó mejor resistencia a la compresión, la cual fue la de 45% de sílice en la primera fase experimental y como muestra de control se realizó la prueba para la lechada de 0% de harina de sílice.

6.3.3 Resultado de Pruebas no destructivas

A continuación, se presenta un cuadro con el parámetro, el equipo utilizado para las pruebas no destructivas y una breve descripción de la prueba.

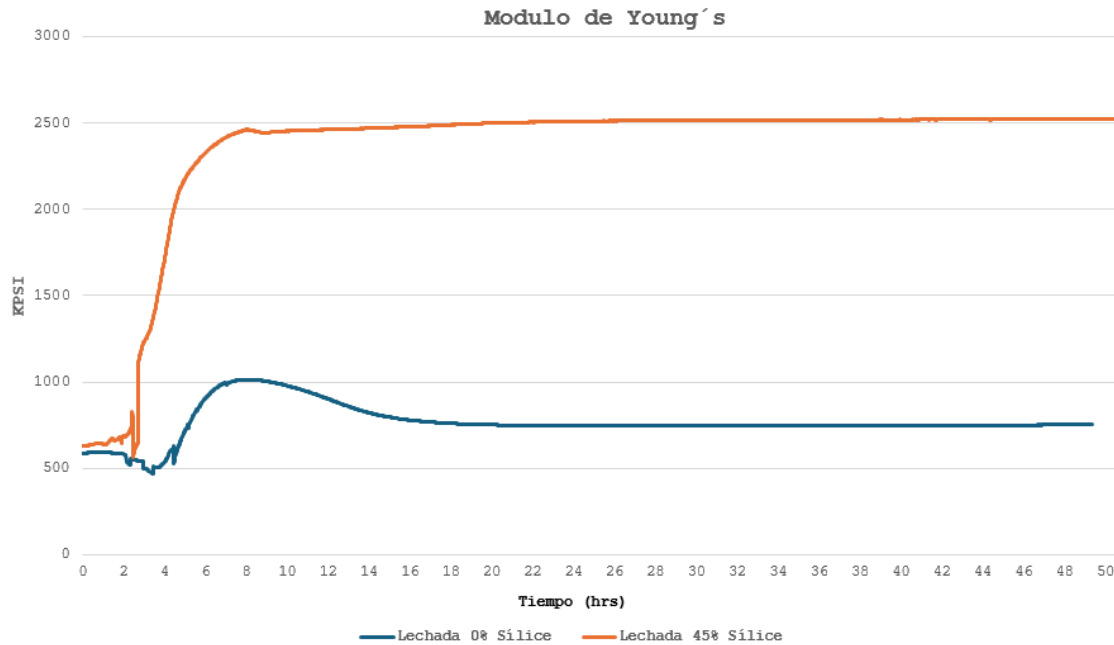
Tabla 9. Equipos y Metodologías Empleadas medición propiedades mecánicas

<i>Parámetro</i>	<i>Equipos empleados</i>	<i>Descripción</i>
Propiedades Mecánicas	 <p>Mechanical Properties Analyzer (MPRO)</p>	<p>Las pruebas de propiedades mecánicas (Modulo de Young, Modulo Bulk y relación Poisson's) no destructivas utiliza mediciones acústicas mientras se cura el cemento en condiciones específicas de presión y temperatura que son leídas por un ordenador interno que realiza de cálculos determinado las propiedades mecánicas del cemento produciendo gráficos en tiempo real de las propiedades mecánicas.</p>

Se realizo preparación de lechada con base en la formulación escogida Muestra 3 de 45% de harina de sílice conforme a la formulación de la Tabla 7.

Es importante resaltar que el MPRO evalúa bajo cargas que varían con el tiempo, vibraciones ultrasónicas. En estos casos, la respuesta del material puede diferir debido a factores como la velocidad de aplicación de la carga y la frecuencia de las vibraciones. Los materiales pueden mostrar un comportamiento viscoelástico, donde la relación entre esfuerzo y deformación depende del tiempo y la velocidad de la carga aplicada; por lo cual las mediciones de las propiedades en condiciones estáticas y dinámicas puede variar; las pruebas de laboratorio han demostrado que a menudo hay una gran discrepancia entre estos módulos dinámicos y los módulos estáticos medidos en marcos de carga, siendo el módulo dinámico generalmente más alto [40]. Por lo cual las mediciones estáticas y dinámicas no son comparable directamente, pero analizando los resultados obtenidos entre la muestra de patrón con 0% Sílice y la muestra con 45% es posible inferir la variación de estas propiedades y determinar el comportamiento de las lechadas a altas temperaturas determinado elasticidad y compresión del cemento al fraguar.

Figura 18. Modulo Young's de la Lechada 0% - 45% Sílice a 350 °F

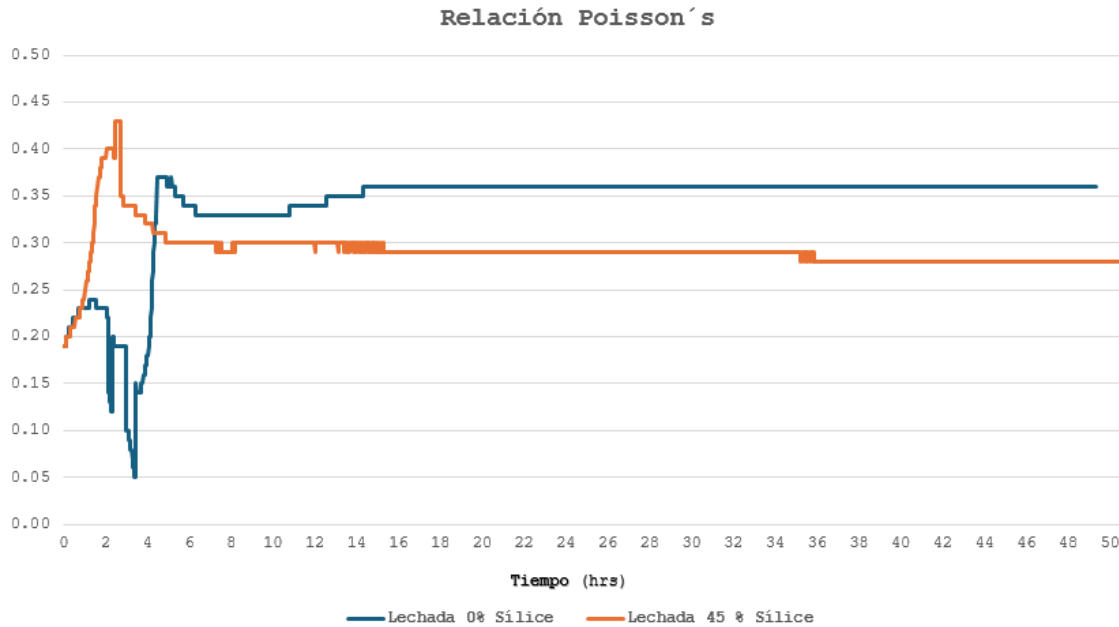


Al analizar los resultados obtenidos para el módulo Young en la figura 16 para las dos Lechadas podemos concluir:

No se observó retrogresión en la muestra 45% Sílice, teniendo en cuenta que la medida de rigidez del material aumenta en el transcurso del tiempo hasta estabilizarse en un valor de aproximadamente 2527 Kpsi. En cambio, la muestra 0% se presenta una disminución de la resistencia con el tiempo pasando de 901 Kpsi a 752 Kpsi.

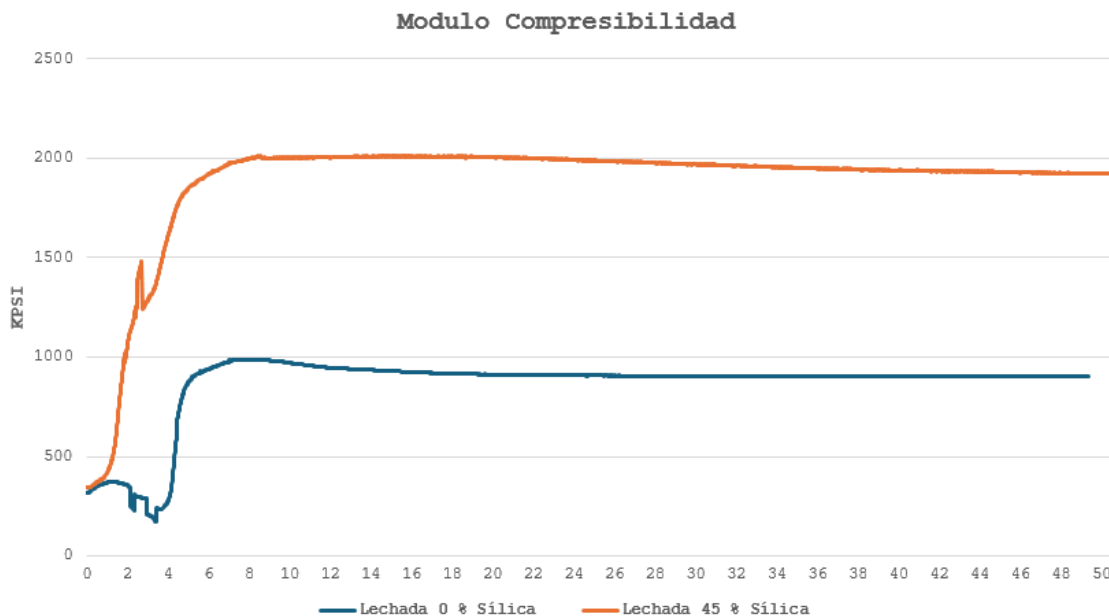
La muestra 45% de sílice tiene un valor de modulo Young considerablemente superior lo que representa una mayor capacidad para resistir deformaciones bajo tensión o compresión de los esfuerzos externos a los que se ve sometido durante la vida útil del pozo. Basados en pruebas experimentales de laboratorio, el módulo de Young dinámico, calculado para lechadas con densidad de 15.8 ppg, fue de alrededor de 2350 Kpsi [14], valor cercano al obtenido en el laboratorio con la muestra 45% Sílice.

Figura 19. Relación Poisson de la Lechada 0% - 45% Sílice a 350 °F



En cuanto a la **relación Poisson** en la figura 17 tenemos que la muestra 45% Sílice tiene un valor promedio de 0,29 inferior al obtenido para la muestra 0% sílice por lo que concluimos que la lechada de 45% es más resistente a la compresión. De acuerdo con la literatura, el valor de la relación de Poisson para un cemento con características elásticas debe estar alrededor de 0.3 [14], lo que indica que el valor determinado en laboratorio cumpliría con los requerimientos de propiedades mecánicas.

Figura 20. Modulo Compresibilidad de la Lechada 0% - 45% Sílice 350 °F



El módulo de compresibilidad está definido como la relación entre el incremento de presión aplicada a la lechada y la disminución resultante de su volumen. A mayor módulo de compresibilidad indica que la lechada experimentará una menor variación de volumen ante un aumento de presión, teniendo un mejor desempeño a la compresión. Este valor se determina a nivel de laboratorio y los valores pueden variar entre 1000 Kpsi a 3000 Kpis.

En la figura 17 podemos observar que la muestra 45% Sílice tiene un valor alrededor de 1950 Kpsi y la muestra 0% sílice mostrando un valor de 900 Kpsi. Basado en estos resultados se concluye que la lechada de 45% tiene una menor variación de volumen que la lechada de 0% Sílice.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las variaciones de las propiedades mecánicas durante el tiempo de desarrollo de la prueba de la muestra con 0% y 45% se sílice.

Tabla 10. Comparativo Propiedades Mecánicas a 350 °F

Propiedad	Modulo Young's (Kpsi)			Modulo Bulk (Kpsi)			Relación Poisson		
	12	24	50	12	24	50	12	24	50
0% Sílice	901	745	752	948	907	904	0.34	0.36	0.36
45% Sílice	2462	2510	2527	2001	1993	1921	0.29	0.29	0.28

6.3.4 Resultado pruebas resistencia a la compresión destructiva

A continuación, presentamos los resultados obtenidos de los ensayos destructivos realizadas a la lechada con base en la formulación escogida Muestra 3 de 45% de sílice conforme a la formulación de la Tabla 7 y las muestras de control con 0% de sílice. Las lechadas analizadas se vertieron en los moldes e inmediatamente fueron introducidas en la cámara de curado por un periodo de 4 días a una temperatura de 350 °F y Presión atmosférica, la temperatura de la prueba se alcanzó en las primeras cuatro horas iniciales del curado de las muestras.

Al finalizar la fase de curado los cubos se colocan en una prensa hidráulica para aplicarle una carga y así determinar su resistencia a la compresión.

Tabla 11. Prueba de resistencia a la compresión destructiva a 350 °F

Muestra	Temperatura de Curado (°F)	Carga Máxima (N)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Diámetro (mm)	Esfuerzo Máximo (psi)
0% SiO ₂ - M1	350	2.320	5,0	24,36	725
0% SiO ₂ - M2	350	2.263	4,8	24,38	696
45% SiO ₂ - M3	350	27.992	59,2	24,53	8584
45% SiO ₂ -M4	350	30.672	64,6	24,58	9367

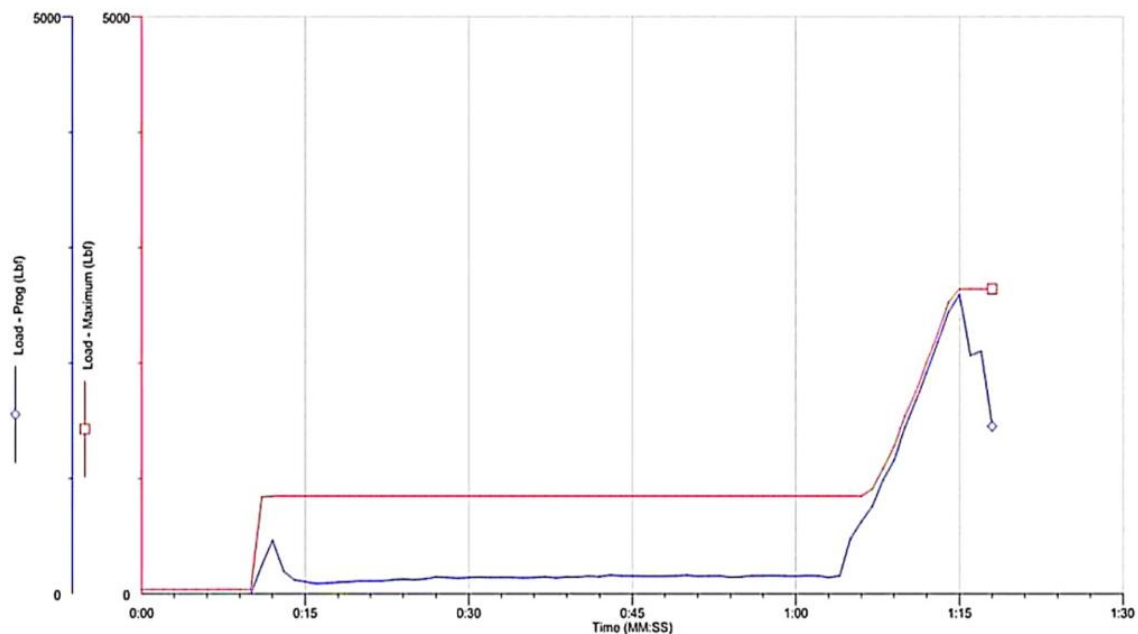
En la tabla 10 podemos observar el aumento representativo en la resistencia del cemento de la muestra con un contenido de sílice de 45% en relación a la muestra con 0% de sílice resultado de la hidratación del cemento en presencia de un alto contenido de sílice (SiO₂) que como hemos explicado anteriormente este componente reacciona con los componentes del cemento (Ca(OH)₂) y la temperatura para la formación de compuestos más estables como la tobermorita, la truscotica y la xonotlita y más resistentes.

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas no destructivas con los ensayos destructivos podemos concluir que son coherentes y complementarios dado que por los dos

métodos se obtiene los mismos resultados lo que congruente con la información disponible en la literatura donde se espera que se tenga resistencia a la compresión de al menos 6.9 MPa (1000.76 psi), mediante el análisis de pruebas destructivas y no destructivas. [9]

A continuación, se presenta el resultado de la prueba de resistencia al corte (Shear Bond Strength) donde se puede observar en la curva roja la máxima resistencia fue 2642 Lbf que equivale a 258 psi. Smith et al., [41] realizaron pruebas de laboratorio donde determinaron que la relación entre la resistencia al corte y la resistencia a la compresión del cemento debe estar alrededor de 10%. Para nuestro caso esta relación fue de 11%.

Figura 21. Prueba de resistencia al corte de cemento a 350 °F



6.3.5 Análisis de resultados de permeabilidad

Una de las funciones del cemento es garantizar un adecuado sello hidráulico para evitar la migración de fluidos por lo cual la permeabilidad es una propiedad importante para lograr cumplir su función; teniendo en cuenta que la permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que pase a través de él. Esta se expresa en

milidarcy [mD]. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos: la porosidad, la densidad del fluido y la presión a que está sometido el fluido.

Con el fin de entender como varia la permeabilidad del cemento cuando es expuesto a altas temperaturas se realizaron prueba de permeabilidad klinkenber y al Aire a la lechada con base en la formulación escogida Muestra 3 de 45% de sílice conforme a la formulación de la Tabla 7 y las muestras de control con 0% de sílice.

Klinkenberg fue el primero en establecer que la permeabilidad del gas (K_g) no es como la permeabilidad líquidos y que la permeabilidad al gas depende de la presión por fenómeno de deslizamiento de gas, por lo cual hay que corregir mediante la siguiente ecuación:

$$K_L = K_g(1 + bP)$$

Donde:

K_L : Permeabilidad al líquido (mD).

K_g : Permeabilidad al Gas (mD).

P: Presión de flujo medida (psi).

b: Constante que depende del gas y tipo de material.

Es importante mencionar que en las pruebas de Laboratorio el fluido utilizado es un gas y se trabaja a bajas presiones; los valores de permeabilidad obtenidos serán mayores a la permeabilidad real de la muestra por lo cual los datos presentados en la tabla fueron corregidos por medio del método Klinkenberg. [42]

Tabla 12. Resultado de Permeabilidad 0% y 45 % Sílice

Muestra	Temperatura de Curado	Porosidad	Permeabilidad Klinkenberg		Permeabilidad Aire	
	°F		%	mD	μm^2	mD
0% SiO ₂ - M1	350	40,6	1,81E-01	1,78E-04	3,89E-01	3,84E-04
0% SiO ₂ - M2	350	40,4	1,20E-01	1,18E-04	3,18E-01	3,13E-04
45% SiO ₂ - M3	350	39,7	2,17E-01	2,14E-04	3,94E-01	3,88E-04
45% SiO ₂ - M4	350	39,5	2,10E-01	2,07E-04	3,81E-01	3,76E-04
0% SiO ₂ - P1	500	45,5	7,2	7,10E-03	11	1,10E-02
0% SiO ₂ - P2	500	45,5	5,2	5,11E-03	8,5	8,36E-03
45% SiO ₂ - P3	500	34,7	2,40E-03	5,72E-06	5,80E-03	5,72E-06
45% SiO ₂ - P4	500	31,9	1,60E-03	1,58E-06	1,60E-03	2,91E-06

Se realizaron pruebas de permeabilidad al gas y los resultados se muestran en la tabla 11, se observan que las muestras de lechada sin sílice son más afectadas por el aumento de la temperatura lo que genera que la permeabilidad del cemento pase de un promedio de 0.15 mD a 350 °F a un promedio de 6.2 mD a 500 °F, es decir aumenta su capacidad de permitirle a un fluido pase a través de él. El fenómeno observado es coherente con la porosidad medida que pasa de 40.5 % - 350 °F a 45.5 % - 500°F lo que explica el aumento también en la permeabilidad.

Al observar las lechadas con adición de sílice se observa el efecto contrario en la permeabilidad por el aumento de la temperatura se reduce considerablemente la permeabilidad pasando de un promedio de 0.21 mD a 350 °F a un promedio de 0.002 mD a 500 °F; lo cual favorece a la propiedad de aislamiento del cemento. La porosidad medida que pasa de un promedio de 39.6 % - 350 °F a un promedio de 33.6 % - 500°F lo que explica la disminución de la permeabilidad.

Al analizar las lechadas con sílice 0% y 45% sílice a la misma temperatura de 350 °F no obtenemos valores muy diferentes, pero al ver la muestra de las lechadas con sílice 0% y 45% sílice a una temperatura de 500 °F la permeabilidad es mucho mayor en la muestra con 0% sílice. Al revisar la literatura tenemos que la permeabilidad debe ser menor a 0.1 mD y una resistencia a la compresión de al menos 6.9 MPa (1000.76 psi), mediante el análisis de pruebas destructivas y no destructivas. [43]; por lo que concluimos que la muestra de la lechada de 45 % de sílice cumple con estos criterios. Esto se debe como ya

hemos explicado a la formación de compuestos más estables como la tobermorita, la truscotica y la xonotlita y más resistentes.

VII. CONCLUSIONES

El marco legal colombiano tiene las bases establecidas para la generación de energía eléctrica a través de geotermia con el **Decreto 1318 de 27** julio de 2022; no obstante, el desarrollo de la energía geotérmica en Colombia dependerá del instrumento de subasta que se establezca por parte de la ANH donde otorguen incentivos proporcionales al riesgo inherente a la explotación de recursos del subsuelo. Los incentivos propuestos para el desarrollo de proyectos de energía geotérmica deberán ser diferentes a los existentes para el desarrollo de proyectos de energías renovables tradiciones como la Solar y Eólica.

De acuerdo con los análisis realizados en laboratorio en este estudio, se determinó que la lechada de cemento con mejor desempeño de acuerdo con los resultados obtenidos es la mezcla de cemento Portland nacional con una adición de harina de sílice de 45 % (Silica M325) que presentó la mejor resistencia a la compresión y cumplió con el valor recomendado para la permeabilidad garantizando un buen aislamiento térmico.

Recomendamos continuar con las pruebas de laboratorio con adición de aditivos que ayuden a mejorar la propiedad mecánica del cemento en específico el módulo de Young dinámico, teniendo en cuenta que lo recomendado por la literatura es menor a 2100 Kpsi y el valor obtenido en la prueba con el MPRO fue de 2527 Kpsi, para este caso específico podría explorar la opción de uso de látex para mejorar la flexibilidad del cemento.

Recomendamos realizar las pruebas destructivas para la determinación de las propiedades mecánicas a temperatura de 500 °F que por limitaciones de tiempo no pudieron ser realizadas al menos dos veces para comparar los resultados, saliendo del alcance de esta investigación.

Recomendamos realizar pruebas de difracción usando rayos X para determinar el comportamiento micro estructural de la composición del cemento cuando es sometido a altas temperaturas.

VIII. REFERENCIAS

- [1] E. Santoyo and J. Wong, *Geotermia: Energía de la Tierra*. Mexico: Editorial Terracota.
- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) and Instituto Geológico y Minero de España (IGME), *Manual de geotermia*. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, 2008.
- [3] R. Bernal Vergara, J. Méndez Montero, and L. A. Quintero López, “Determinación del origen y potencial geotérmico de las manifestaciones hidrotermales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena),” *Ingeniare*, vol. 17, no. 30, pp. 11–28, 2021, doi: 10.18041/1909-2458/ingeniare.30.7923.
- [4] P. Muffler and R. Cataldi, “Methods for regional assessment of geothermal resources,” *Geothermics*, vol. 7, no. 2–4, pp. 53-89. 99–13, Jan. 1978, doi: 10.1016/0375-6505(78)90002-0.
- [5] M. P. Hochstein, *Classification and assessment of geothermal resources. In Small Geothermal Resources. A Guide to Development and Utilization*.
- [6] Y. Benderitter and G. Cormy, “Possible approach to geothermal research and relative cost estimate.,” 1990, pp. 61–71.
- [7] K. Nicholson, *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin, New York: Springer Verlag, 1993.
- [8] G. Axelsson and I. G. Association, *Long-term Monitoring of High- and Low-enthalpy Fields Under Exploitation: WGC2000 Short Courses, Kokonoe, Kyushu District, Japan, 28-30 May 2000; [World Geothermal Congress 2000]*. in WGC2000 short courses. International Geothermal Association, 2000. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=dTV7mwEACAAJ>
- [9] J. W. Lund, “Characteristics, Development and Utilization of Geothermal Resources,” *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, vol. 28, no. 2, pp. 1–24, 2007. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1209249>
- [10] N. Arbad, H. Emadi, and M. Watson, “A comprehensive review of geothermal cementing from well integrity perspective,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 217, p. 110869, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2022.110869.
- [11] L. H. Eilers and R. L. Root, “Long-Term Effects Of High Temperature On Strength Retrogression Of Cements,” in *All Days*, Houston, Texas: SPE, 1974, p. SPE-5028-MS. doi: 10.2118/5028-MS.
- [12] S. L. Bergen, L. Zemberekci, and S. D. Nair, “A review of conventional and alternative cementitious materials for geothermal wells,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 161, p. 112347, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112347.
- [13] C. Winn *et al.*, “Context and mitigation of lost circulation during geothermal drilling in diverse geologic settings,” *Geothermics*, vol. 108, p. 102630, 2023, doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102630.
- [14] E. B. Nelson and D. Guillot, Eds., *Well Cementing*, Second Edition. Sugarland, Tx: Schlumberger, 2006. [Online]. Available: <https://www.slb.com/-/media/files/ce/other/well-cementing-book.ashx>

- [15] Q. Zhang *et al.*, “Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China,” *Environ. Sci. Ecotechnology*, vol. 16, p. 100280, 2023, doi: 10.1016/j.ese.2023.100280.
- [16] T. Pyatina and T. Sugama, “Cements for High-Temperature Geothermal Wells,” in *Cement Based Materials*, H. E.-D. M. Saleh and R. O. A. Rahman, Eds., InTech, 2018, pp. 221–235. doi: 10.5772/intechopen.74108.
- [17] S. Chen, Q. Zhang, P. Andrews-Speed, and B. Mclellan, “Quantitative assessment of the environmental risks of geothermal energy: A review,” *J. Environ. Manage.*, vol. 276, p. 111287, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111287.
- [18] R. Kiran *et al.*, “Identification and evaluation of well integrity and causes of failure of well integrity barriers (A review),” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 45, pp. 511–526, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.05.009>.
- [19] Banco Mundial, “Energía geotérmica,” Banco Mundial. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/geothermal>
- [20] C. Cariaga, “ThinkGeoEnergy’s Top 10 Geothermal Countries 2023 – Power Generation Capacity,” Think Geoenergy. [Online]. Available: <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2023-power-generation-capacity/>
- [21] E. B. Nelson, “Well Cementing Fundamentals,” *Oilfield Rev.*, vol. 24, no. 2, pp. 63–65, 2012, [Online]. Available: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-cementing>
- [22] P. Montezuma and F. del Valle, “Factibilidad de uso de microesferas de polímero en la formulación de lechadas de cemento para pozos a ser sometidos a procesos de inyección alterna de vapor,” 2013. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10872/3672>
- [23] H. Li, X. Pang, X. Chen, and J. Zhang, “Physical and Mechanical Performance of Oil Well Cement Systems Under Simulated Shale Oil In-Situ Conversion Condition,” in *56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Santa Fe, New Mexico, USA: ARMA, 2022, p. ARMA-2022-0412. doi: 10.56952/ARMA-2022-0412.
- [24] T. Pyatina and T. Sugama, “Cements with supplementary cementitious materials for high-temperature geothermal wells,” *Geothermics*, vol. 86, p. 101840, 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101840.
- [25] A. A. Mahmoud and S. Elkatatny, “The Effect of Silica Content on the Changes in the Mechanical Properties of Class G Cement at High Temperature from Slurry to Set,” presented at the 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, OnePetro, 2019, p. ARMA-2019-1816.
- [26] J. H. TerHeege, J. Wollenweber, M. Naumann, P. Pipilikaki, and F. Vercauteren, “Well Integrity of High Temperature Wells: Effect of Mineralogical Changes on Mechanical Properties of Well Cement,” presented at the 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, OnePetro, 2019, p. ARMA-2019-1981.
- [27] R. Ayala, “Así es el ‘Anillo de Fuego’, la cuna de los terremotos más poderosos que agitan la Tierra,” National Geographic en Español. [Online]. Available:

- <https://www.ngenespanol.com/el-mundo/cinturon-de-fuego-del-pacifico-que-es-y-por-que-genera-tantos-sismos/>
- [28] J. C. Mejía-Fragoso, M. A. Flórez, and R. Bernal-Olaya, “Predicting the geothermal gradient in Colombia: A machine learning approach,” *Geothermics*, vol. 122, p. 103074, 2024, doi: 10.1016/j.geothermics.2024.103074.
- [29] C. M. Alfaro, J. B. Rueda Gutiérrez, Y. P. Casallas, G. Z. Rodríguez, and J. E. Malo, “Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia,” *Serv. Geológico Colomb.* ©, 2020, [Online]. Available: https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/742_2021EstiPrePotGeotColombia/Documento/Pdf/EstiPrePotenGeoterColom.pdf
- [30] Congreso de la República de Colombia, “Ley 23 de 1973,” Diario Oficial No 34.001. [Online]. Available: https://archivo.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/ley_23_de_1973.pdf
- [31] El Presidente de la República de Colombia, “Decreto 2811 de 1974 Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.” [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Decreto-2811-de-1974.pdf>
- [32] Congreso de la República de Colombia, “Ley 1715 de 2014,” Diario Oficial 49150. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- [33] Congreso de la República de Colombia, “Ley 2099 de 2021,” Diario Oficial No. 51.731. [Online]. Available: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2099_2021.html
- [34] El Presidente de la República de Colombia, “Decreto 1318 de 2022,” Diario Oficial No. 52.108. [Online]. Available: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=126919>
- [35] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 40302 de 2022,” Diario Oficial No. 52.117. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40302_2022.htm
- [36] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 40234 de 2023,” Diario Oficial No. 52.117. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40302_2022.htm
- [37] Ó. Llamosa Ardilla, “ANH en Colombia anuncia posible primera ronda y/o subasta geotérmica en 2024,” *Piensa en Geotermica.* [Online]. Available: <https://www.piensageotermia.com/colombia-lanzara-primera-ronda-de-subasta-geotermica-este-ano/>
- [38] S. S. Salazar Blanco, “Análisis de la energía geotérmica como alternativa para el abastecimiento de la demanda energética en Colombia,” 2016, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/16844>

- [39] J. Bensted, “14 - Special Cements,” in *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*, Fourth Edition., P. C. Hewlett, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998, pp. 783–840. doi: 10.1016/B978-075066256-7/50026-6.
- [40] J. L. Gidley and Society of Petroleum Engineers, Eds., *Recent advances in hydraulic fracturing*, 7. Nachdr. in SPE monograph series, no. 12. Richardson, TX: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1989.
- [41] T. Smith, R. Lukay, and J. Delorey, “Light, Strong Foamed Cement: A New Tool for Problem Wells,” vol. 198, no. 6, pp. 135–144, May 1984.
- [42] G. Sharma and C. Guria, “An improved Klinkenberg permeability model for tight reservoir cores: Effects of non-linear gas slippage to real gases,” *Geoenergy Sci. Eng.*, vol. 233, p. 212477, 2024, doi: 10.1016/j.geoen.2023.212477.
- [43] A. J. Philippacopoulos and M. L. Berndt, “Structural analysis of geothermal well cements,” *Geothermics*, vol. 31, no. 6, pp. 657–676, 2002, doi: 10.1016/S0375-6505(02)00029-9.

IX. APÉNDICE

Anexo A Certificado de lote de cemento

Certificado API



29.01.2024 10:10

Interval From 22.01.2024 00:00 Period Primary log values

To 22.01.2024 01:00

Laboratorio Control de Calidad
Planta NobsaHolcim (Colombia) S.A.
Tel: (+57-608) 777 3151
Km 15 vía Duitama-Belencito
Nobsa, Boyacá, ColombiaCEMENTO PARA POZOS PETROLEROS
LICENCIA API SPEC 10A, No. 0164

Forma: HOI005/F3

LOTE:
G-HSR 2400CLASE G
GRADO HSR

FECHA DE MOLIENTA: 22.01.2024

FECHA EMISION: 29.01.2024

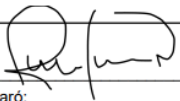

ANÁLISIS QUÍMICO									
Análisis	Unidad	Resultado	ESPECIFICACION API 10A		Análisis	Unidad	Resultado	ESPECIFICACION API 10A	
			G-MSR	G-HSR				G-MSR	G-HSR
SiO ₂	%	22.0			Alk-Eq	%	0.38	0.75 Max.	0.75 Max.
Al ₂ O ₃	%	3.5			Pérdidas al Fuego	%	0.7	3.0 Max.	3.0 Max.
Fe ₂ O ₃	%	5.46			Residuo Insoluble	%	0.29	0.75 Max.	0.75 Max.
CaO	%	64.4			C3S	%	58	48 - 58	48 - 65
SO ₃	%	2.05	3.0 Max.	3.0 Max.	C2S	%	19		
Cal Libre	%	0.60			C3A	%	0.0	8.0 Max.	3.0 Max.
MgO	%	0.5	6.0 Max.	6.0 Max.	C4AF	%	17		
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	%	0.64			C4AF+2(C3A)	%	17		24.0 Max.

ANÁLISIS FÍSICO Y MECÁNICO									
Análisis	Unidad	Resultado	ESPECIFICACION API 10A		FLUIDO LIBRE				
			G-MSR	G-HSR	Análisis	Unidad	Resultado	ESPECIFICACION API 10A	
Gravedad Especifica	g/cm ³	3.18	3.18 ±0.04	3.18 ±0.04					
Superficie Especifica Blaine	cm ² /g	3014			Agua de Mezcla	% bwoc	44	44.0	44.0
RM 400 (38 µm)	%				Densidad Lechada	lb/gl	15.84		
RM 325 (45 µm)	%	10.60							
RM 170 (90 µm)	%				Fluido Libre	%	5.2	5.9 Max.	5.9 Max.

TIEMPO DE BOMBEABILIDAD					RESISTENCIAS A LA COMPRESION				
Análisis	Unidad	Resultado	ESPECIFICACION API 10A		Análisis	Unidad	Resultado	ESPECIFICACION API 10A	
			G-MSR	G-HSR				G-MSR	G-HSR
Consistencia Inicial	Bc	4			8 hr @ 38°C	psi	692	300 Mínimo	300 Mínimo
Consistencia a 15-30 min.	Bc	18	30 Max.	30 Max.	8 hr @ 60°C	psi	1739	1500 Mínimo	1500 Mínimo
Tiempo a 30 Bc	min.	71							
Tiempo a 50 Bc	min.	89							
Tiempo a 70 Bc	min.	100							
Tiempo a 100 Bc	min.	108	90 - 120	90 - 120					

NOTA:	1. Ensayos efectuados según Norma API Specification 10A Edición 25.	
	2. La composición potencial de las fases se calcula según BOGUE y los análisis descritos en la norma ASTM C-114.	
	3. N.D. No Disponible.	
OBSERVACIONES:	1. Análisis en muestra acumulado de molienda del:	22.January.2024
	2. Fecha de vencimiento para cemento empacado: 20 semanas a partir del día de empaque.	
	3. Fecha de vencimiento para cemento almacenado en silo:	22.July.2024
	4. Los nombres de las personas aquí mencionadas, certifican la veracidad de la información de este reporte.	
	5. Fecha de realización del informe:	29.January.2024

Fecha Fabricación Clinker:	10.January.2024
----------------------------	-----------------

 Preparó: Juan Carlos Leguizamón Vega Ingeniero Control Calidad	 Revisó y Aprobó: Jennifer Paola Pineda Coordinador Control Calidad
---	--


Anexo B Propiedades Físico - Químicas Silica M325





Propiedades Físico - Químicas Silica M325





Forma Física	Polvo
Color	Blanca
Olor	Inoloro
Solubilidad en agua @ 20°C	Insoluble
SiO ₂ %	93.5 – 96.5
Al ₂ O ₃	0.2 Max
Tamaño partícula	45 µm
Residuo sobre malla 335	5%

Apéndice C Equipos y Metodología Empleadas

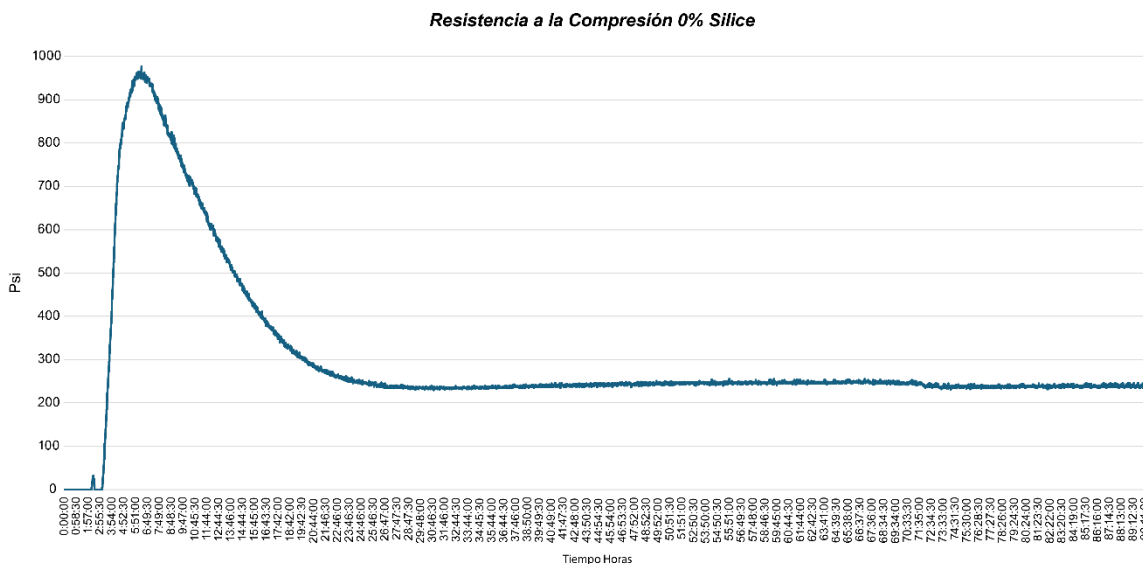
A continuación, se presenta un cuadro con los parámetros, el equipo utilizado y una breve descripción de cada prueba.

<i>Parámetro</i>	<i>Equipos empleados</i>	<i>Descripción</i>	<i>Incertidumbre</i>
Mezclabilidad	 Speed Blender	Para preparar la lechada de cemento y determinar su Mezclabilidad en un rango de 0 a 5, se coloca el recipiente de mezcla con la masa requerida de agua en la base de la mezcladora, se enciende el motor y se ajusta la velocidad a 4000 rpm ±250 rpm. Se agrega la muestra de cemento a una velocidad constante durante no más de 15 segundos. Después de 15 segundos, se coloca la tapa en el recipiente y se continúa mezclando a 12000 rpm ±500 rpm durante 35 segundos ±1 segundo.	Cualitativa

<i>Parámetro</i>	<i>Equipos empleados</i>	<i>Descripción</i>	<i>Incertidumbre</i>
Densidad	 <p>Balanza Presurizada</p>	<p>La prueba para determinar la densidad del cemento utilizando una balanza presurizada consiste en medir la masa de una muestra de cemento bajo condiciones de presión controlada, con el objetivo de obtener su densidad real o absoluta. Este método es particularmente útil, ya que permite eliminar el aire atrapado en la muestra, lo que podría influir en los resultados si se emplearan métodos convencionales.</p>	± 0.1 lbm/gal
	 <p>Balanza Baroid</p>		± 0.1 lbm/gal
Filtrado alta presión y temperatura	 <p>Filtroprensa HTHP</p>	<p>La prueba de filtrado a alta presión y temperatura (HTHP) en lechadas de cemento utilizando la filtro prensa HTHP de OFITE tiene como objetivo evaluar la capacidad de la lechada para retener fluidos y evitar la filtración excesiva de agua bajo condiciones extremas de presión y temperatura, similares a las encontradas en aplicaciones de perforación de pozos petroleros. Esta prueba es fundamental para asegurar que la lechada de cemento mantenga su integridad y evite problemas como el debilitamiento de la estructura del cemento o la pérdida de control de pozos.</p>	± 0.1 ml
Agua libre	 <p>Probeta</p>	<p>La prueba de agua libre en lechadas de cemento es un ensayo que se realiza para medir la cantidad de agua que tiende a separarse o segregarse de la lechada cuando se deja en reposo. Este ensayo es fundamental para evaluar la estabilidad de la lechada de cemento, ya que una segregación excesiva de agua puede afectar la integridad y el rendimiento de la lechada durante su aplicación en pozos -Geotérmicos en la construcción.</p>	± 0.1 ml

<i>Parámetro</i>	<i>Equipos empleados</i>	<i>Descripción</i>	<i>Incertidumbre</i>
Reología	 <p>Reómetro OFITE 900</p>	<p>La prueba de estudio reológico para la determinación de propiedades reológicas en lechadas de cemento, utilizando equipos como el viscosímetro OFITE 900 y el Fann 35, se enfoca en medir la resistencia al flujo y el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de esfuerzo y velocidad. Estas mediciones son esenciales para entender cómo la lechada de cemento fluye, se bombea y se comporta durante su aplicación en pozos petroleros – Geotérmicos.</p>	± 1 % Velocidad Nominal
	 <p>Reómetro FANN 35</p>		± 1 % Velocidad Nominal
Resistencia a la compresión no destructiva	 <p>UCA HTHP</p>	<p>La prueba de resistencia a la compresión no destructiva proporciona una determinación del desarrollo de la resistencia de una muestra de cemento mientras se cura en condiciones de temperatura y presión en el fondo del pozo. La resistencia del cemento se determina midiendo el cambio en la velocidad de una señal ultrasónica transmitida a través de la muestra de cemento a medida que se endurece.</p>	± 1 % Velocidad Nominal
	 <p>UCA Dual</p>		± 1 % Velocidad Nominal

Anexo D Resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 1 0 % Sílice - Muestra 2.



Anexo E Resistencia a la compresión no destructiva para la Lechada 2 35 % Sílice - Muestra 2.

