

**EVALUACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA  
LECHADA DE CEMENTACIÓN UTILIZANDO NANO-ZEOLITA**

**MIGUEL LEONARDO ROMERO TÉLLEZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C  
2020**

**EVALUACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA  
LECHADA DE CEMENTACIÓN UTILIZANDO NANO-ZEOLITA**

**MIGUEL LEONARDO ROMERO TÉLLEZ**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de:  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director  
JOSÉ DAVID DÍAZ DÍAZ  
Ingeniero de petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C  
2020**

Nota de Aceptación.

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Oscar Armando Arenas Mantilla

---

Ing. Diego Camilo Araque Barrera

Bogotá D.C., febrero 2020

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente Institucional y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA – PEÑA**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA – PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Secretaria General

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA**

Decano de la Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

**Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **AGRADECIMIENTOS**

Como autor de este proyecto quiero agradecer especialmente a:

A el director del proyecto de grado José David Díaz Díaz por su constante orientación, cooperación y respaldo durante toda la realización de este proyecto.

A Superior Energy Services por haber brindado apoyo técnico, financiero y talento humano para el desarrollo y culminación exitosa del trabajo de grado.

A el excelente equipo de orientadores de trabajo de grado que fueron dispuestos por la universidad, especialmente a la Geóloga Adriana Henao.

## DEDICATORIA

A mi padre y mi madre, por todo el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A Flim, todas las experiencias que hemos vivido juntos.

A Lujain, por ser gran parte de mi motivación para sacar este proyecto adelante.

A mis amigos, los cuales me apoyaron y me ayudaron a llegar donde estoy ahora.

A mis peces, por desestresarme cada vez que lo necesité.

Miguel Leonardo Romero Téllez.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	20
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>22</b>
1.1 LECHADAS DE CEMENTACIÓN	22
1.1.1 Requerimientos básicos para lechas de cemento.	22
1.1.2 Cemento para pozos petroleros.	23
1.2 ZEOLITA	25
1.2.1 Formación de la zeolita.	25
1.2.2 Mineralogía.	26
1.2.3 Propiedades físicas.	27
1.2.4 Propiedades químicas.	27
1.2.5 zeolita en lechadas de cementación.	28
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
2.1 DIAGRAMA DE FLUJO	31
2.2 PREPARACIÓN DE LECHADAS	31
2.3 PRUEBA DE MEZCLABILIDAD	33
2.4 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA	33
2.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y LA RESISTENCIA GEL	34
2.6 DETERMINACIÓN DE PERDIDA DE FLUIDO	36
2.7 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD	37
2.8 PRUEBA DE RESISTENCIA LA COMPRESIÓN NO DESTRUCTIVA Y DESARROLLO DE GEL ESTÁTICO	39
2.9 ANALIZADOR DE PROPIEDADES MECÁNICAS	41
<b>3. RESULTADOS</b>	<b>43</b>
3.1 REOLOGÍA Y RESISTENCIA GEL	43
3.1.1 Reología y resistencia gel a diferentes concentraciones de Nano-zeolita a temperatura ambiente (80°F).	43
3.1.2 Reología y resistencia gel a diferentes concentraciones de Nano-zeolita a temperatura circulante (120°F).	45
3.2 PERDIDA DE FILTRADO	47
3.2.1 Perdida de filtrado a diferentes concentraciones de Nano-zeolita.	47

3.3 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD	49
3.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	51
3.5 DESARROLLO DE GEL ESTÁTICO	54
3.6 PROPIEDADES MECÁNICAS	57
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>60</b>
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS A TEMPERATURA AMBIENTE	60
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS A TEMPERATURA CIRCULANTE	61
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PERDIDA DE FILTRADO	62
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TIEMPO DE BOMBEABILIDAD	63
4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DESARROLLO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	64
4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DESARROLLO DE GEL ESTÁTICO	71
4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS	73
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>76</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Unidad de construcción primaria de la estructura de las zeolitas.	27
<b>Figura 2.</b> Balanza electrónica.	32
<b>Figura 3.</b> Mezcladora automática.	33
<b>Figura 4.</b> Balanza presurizada	34
<b>Figura 5.</b> Viscosímetro rotacional.	35
<b>Figura 6.</b> Filtro prensa estático.	37
<b>Figura 7.</b> Consistómetro presurizado.	38
<b>Figura 8.</b> UCA de doble celda.	39
<b>Figura 9.</b> Analizador de gel estático.	40
<b>Figura 10.</b> Analizador de propiedades mecánicas.	41

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Tiempo de bombeabilidad 0% Nano-zeolita.	49
<b>Gráfica 3.</b> Tiempo de bombeabilidad 1% Nano-zeolita.	50
<b>Gráfica 4.</b> Tiempo de bombeabilidad 2% Nano-zeolita.	50
<b>Gráfica 5.</b> Tiempo de bombeabilidad 3% Nano-zeolita.	51
<b>Gráfica 6.</b> Resistencia a la compresión 0% Nano-zeolita.	52
<b>Gráfica 7.</b> Resistencia a la compresión 1% Nano-zeolita.	53
<b>Gráfica 8.</b> Resistencia a la compresión 2% Nano-zeolita.	53
<b>Gráfica 9.</b> Resistencia a la compresión 3% Nano-zeolita.	54
<b>Gráfica 10.</b> Desarrollo de gel estático 0% Nano-zeolita.	55
<b>Gráfica 11.</b> Desarrollo de gel estático 1% Nano-zeolita.	55
<b>Gráfica 12.</b> Desarrollo de gel estático 2% Nano-zeolita.	56
<b>Gráfica 13.</b> Desarrollo de gel estático 3% Nano-zeolita.	56
<b>Gráfica 14.</b> Módulo de Young y relación de Poisson con 0% Nano-zeolita.	57
<b>Gráfica 15.</b> Módulo de Young y relación de Poisson con 1% Nano-zeolita.	58
<b>Gráfica 16.</b> Módulo de Young y relación de Poisson con 2% Nano-zeolita.	58
<b>Gráfica 17.</b> Módulo de Young y relación de Poisson con 3% Nano-zeolita.	59
<b>Gráfica 18.</b> Comparación de resultados de perdida de filtrado.	63
<b>Gráfica 19.</b> Comparación de resultados de tiempo de bombeabilidad.	64
<b>Gráfica 20.</b> Comparación resistencia a la compresión a 6 horas.	65
<b>Gráfica 21.</b> Comparación resistencia a la compresión a 12 horas.	66
<b>Gráfica 22.</b> Comparación resistencia a la compresión a 18 horas.	67
<b>Gráfica 23.</b> Comparación resistencia a la compresión a 24 horas.	68
<b>Gráfica 24.</b> Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 50 psi.	69
<b>Gráfica 25.</b> Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 500 psi.	70
<b>Gráfica 26.</b> Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 2000 psi.	71
<b>Gráfica 27.</b> Comparación del tiempo necesario para pasar de 100 Lb/Ft <sup>2</sup> a 500 Lb/Ft <sup>2</sup> .	72
<b>Gráfica 28.</b> Comparación del porcentaje de incremento de la relación de Poisson.	73
<b>Gráfica 29.</b> Comparación del porcentaje de decremento del Módulo de Young.	75

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición mineralógica de la zeolita.	26
<b>Tabla 2.</b> Composición química de la zeolita	26
<b>Tabla 3.</b> Tabla de mezcla de lechadas con diferentes concentraciones de Nano-Zeolita.	28
<b>Tabla 4.</b> Resistencia a la compresión a diferentes tiempos.	29
<b>Tabla 5.</b> Tiempo para alcanzar resistencia a la compresión (50, 500 y 2.000 psi).	29
<b>Tabla 6.</b> Reología a temperatura ambiente y diferentes porcentajes de Nano-zeolita.	44
<b>Tabla 7.</b> Propiedades reológicas a temperatura ambiente.	45
<b>Tabla 8.</b> Reología a temperatura circulante y diferentes porcentajes de Nano-zeolita.	46
<b>Tabla 9.</b> Propiedades reológicas a temperatura ambiente.	47
<b>Tabla 10.</b> Perdida de filtrado para diferentes concentraciones de Nano-zeolita.	48
<b>Tabla 11.</b> Tiempos de bombeabilidad a diferentes concentraciones de Nano-zeolita.	49
<b>Tabla 12.</b> Resistencia a la compresión a diferentes tiempos y concentraciones de Nano-zeolita.	52
<b>Tabla 13.</b> Tiempo para alcanzar resistencia a la compresión(50. 500 y 2000 psi) a diferentes concentraciones de Nano-zeolita	52
<b>Tabla 14.</b> Desarrollo de gel estático a diferentes concentraciones de Nano-zeolita.	54
<b>Tabla 15.</b> Propiedades mecánicas a diferentes porcentajes de Nano-zeolita.	57
<b>Tabla 16.</b> Comparación de resultados de Vp y Yp a temperatura ambiente.	60
<b>Tabla 17.</b> Comparación de resultados de resistencia gel a temperatura ambiente.	61
<b>Tabla 18.</b> Comparación de resultados de Vp y Yp a temperatura circulante.	62
<b>Tabla 19.</b> Comparación de resultados de resistencia gel a temperatura circulante.	62
<b>Tabla 20.</b> Comparación de resultados de perdida de filtrado.	63
<b>Tabla 21.</b> Comparación de resultados de tiempo de bombeabilidad.	64
<b>Tabla 22.</b> Comparación resistencia a la compresión a 6 horas.	65
<b>Tabla 23.</b> Comparación resistencia a la compresión a 12 horas.	66
<b>Tabla 24.</b> Comparación resistencia a la compresión a 18 horas.	67
<b>Tabla 25.</b> Comparación resistencia a la compresión a 24 horas.	68

<b>Tabla 26.</b> Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 50 psi.	69
<b>Tabla 27.</b> Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 500 psi.	70
<b>Tabla 28.</b> Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 2000 psi.	71
<b>Tabla 29.</b> Comparación del tiempo necesario para pasar de 100 Lb/Ft <sup>2</sup> a 500 Lb/Ft <sup>2</sup> .	72
<b>Tabla 30.</b> Comparación del porcentaje de incremento de la relación de Poisson.	73
<b>Tabla 31.</b> Comparación del porcentaje de decremento del Módulo de Young.	74

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Viscosidad plástica para lechadas de cementación.	35
<b>Ecuación 2.</b> Punto cedente para lechadas de cementación.	36
<b>Ecuación 3.</b> Filtrado API.	37

## ABREVIATURAS

<b>API</b>	American Petroleum Institute
<b>Bc</b>	Consistencia Bearden
<b>BHST</b>	Bottom hole static temperature
<b>Cm</b>	Centímetro
<b>cp</b>	Centipoise
<b>Dm</b>	Decímetro
<b>Ft</b>	Pies
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Lb</b>	Libra
<b>Lbf</b>	Libra fuerza
<b>Nz</b>	Nano-zeolita
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeno
<b>PPG</b>	Libras por galón
<b>psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>SGSA</b>	Static Gel Strength Analyzers
<b>UCA</b>	Ultrasonic Cement Analyzers
<b>Vp</b>	Viscosidad plástica
<b>Yp</b>	Punto cendente
<b>µm</b>	Micrómetro

## GLOSARIO

**ADITIVO<sup>1</sup>:** químicos y materiales agregados a la lechada de cemento para modificar las características de la lechada o del cemento fraguado.

**DENSIDAD:** la densidad hace referencia la cantidad de masa que posee un material por unidad de volumen.

**ESFUERZO DE CORTE<sup>2</sup>:** la fuerza por unidad de superficie requerida para mantener una velocidad constante de movimiento de un fluido

**LECHADA DE CEMENTACIÓN:** es una mezcla de líquidos y sólidos en suspensión la cual está formada por agua, cemento y aditivos químicos.

**MINERAL<sup>3</sup>:** es una sustancia cristalina natural, inorgánica, que posee un rango único o limitado de composiciones químicas.

**MÓDULO DE YOUNG<sup>4</sup>:** el módulo de Young es la relación entre el esfuerzo y la deformación longitudinales que experimenta un material dado.

**REOLOGÍA<sup>5</sup>:** es el estudio de la manera en que se deforma y fluye la materia; incluye su elasticidad, plasticidad y viscosidad.

**RELACIÓN DE POISSON<sup>6</sup>:** la relación de Poisson es una constante elástica que es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, o la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal.

**TEMPERATURA CIRCULANTE<sup>7</sup>:** la temperatura en el fondo de un pozo mientras el fluido circula. Es la temperatura utilizada para la mayoría de los ensayos de lechadas de cemento en estado líquido (como el tiempo de espesamiento y la pérdida de fluido).

**TEMPERATURA ESTÁTICA<sup>8</sup>:** la temperatura sin perturbaciones en el fondo de un pozo (abreviada BHST). Después de la circulación y de cerrar el pozo, la temperatura se aproxima a la BHST después de aproximadamente 24 a 36 horas, dependiendo de las condiciones del pozo. La BHST es la temperatura utilizada en

---

<sup>1</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, aditivo de cementación

<sup>2</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Esfuerzo cortante.

<sup>3</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Mineral.

<sup>4</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Módulo de Young.

<sup>5</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Reología

<sup>6</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Relación de Poisson.

<sup>7</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Temperatura de fondo de pozo en circulación.

<sup>8</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Temperatura de fondo de pozo estática

la mayoría de los ensayos en que la lechada de cemento debe fraguar o ha fraguado.

**SQUEEZE**<sup>9</sup>: la aplicación cuidadosa de la presión de la bomba para forzar un fluido de cementación o lodos en una zona de tratamiento planificada

**VISCOSIDAD**<sup>10</sup>: es una propiedad de los fluidos y las lechadas que indica su resistencia al flujo, definida como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte.

---

<sup>9</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Squeeze.

<sup>10</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Viscosidad.

## RESUMEN

Con el paso del tiempo la industria petrolera se ha enfrentado a nuevos desafíos, tales como yacimientos de alta complejidad y la falta de tecnología para el desarrollo de estos, lo que genera la inaccesibilidad a los recursos que estos podrían aportar, todo esto debido a la insaciable búsqueda de petróleo en todo el mundo. Por lo mencionado anteriormente las empresas petroleras de todo el mundo se encuentran invirtiendo cuantiosas sumas de dinero para sostener el continuo desarrollo de nuevas tecnologías en todos los campos que competen el sector petrolero, siendo uno de esos la cementación, haciendo de recursos que anteriormente eran inaccesibles, una reserva que se pueda explotar de una forma económicamente rentable.

Superior Energy Services es una empresa petrolera prestadora de servicios la cual cuenta con un área especializada en el desarrollo de nuevas lechadas de cementación o la optimización de las preexistentes, haciéndolo por diferentes métodos, uno de los cuales es la nanotecnología. Por lo anteriormente dicho se ha realizado el estudio de los efectos que tiene la Nano-Zeolita en una lechada de cementación base de 15.8 PPG.

Con base en la norma API 10B se estructuró una metodología para el desarrollo de esta investigación encaminada a la evaluación de la nano-zeolita sobre las propiedades de la lechada de cementación base. Determinando que el mejor escenario evaluado es en el cual se adicionó 3% de Nano-zeolita a la lechada de cementación, debido a que en este se evidenciaron los mayores beneficios para la lechada de cementación, viendo aumentos significativos en la resistencia a la compresión a través del tiempo, y la disminución de tiempo que la lechada de cementación necesita para alcanzar resistencia de 50 psi, 500 psi y 2000 psi, además, se evidenció una relación directa entre el porcentaje de Nano-zeolita utilizado, el incremento de resistencia a la compresión a través del tiempo y en el desarrollo temprano de la resistencia a la compresión, es decir, a mayor porcentaje de Nano-zeolita utilizado mayores serán los beneficios.

Palabras clave: Cementación, lechada, nanotecnología, perforación, resistencia a la compresión, zeolita

## ABSTRACT

Over time the oil industry has faced new challenges, such as highly complex deposits and lack of technology for the development of these, resulting in inaccessibility to the resources they could provide, all due to the insatiable search for oil around the world. For the above mentioned, oil companies around the world are investing large amounts of money to sustain the continued development of new technologies in all the fields that compete in the oil sector, being one of those cementation, making resources that were previously inaccessible, a reserve that can be exploited in an economically profitable way.

Superior Energy Services is an oil company providing services which has an area specialized in the development of new cementing slurries or the optimization of the pre-existing ones, doing so by different methods, one of which is the Nanotechnology. Therefore, the study of the effects of Nano-Zeolite has on a base cementing slurry of 15.8 PPG has been carried out.

Based on API 10B, a methodology for the development of this research was structured for the evaluation of Nano-zeolite on the properties of the base cementation grout. Determining that the best evaluated scenario is in which 3% Nano-zeolite was added to the cementation slurry, because in this the greatest benefits for cementation grout were demonstrated, seeing significant increases in resistance to compressive strength over time, and the decrease in time that cementing slurry needs to achieve resistance of 50 psi, 500 psi and 2000 psi, in addition, a direct relationship between the percentage of Nano-zeolite used, the increase in compressive strength over time and in the early development of compressive strength,

Key words: Cementation, compressive strength, nanotechnology, perforation, slurry, zeolite

## INTRODUCCIÓN

La cementación es una operación fundamental en la perforación de pozos de la industria petrolera, que consiste en un aislamiento zonal que evita la contaminación de las formaciones aledañas debido al efecto de los fluidos que se han extraído en su trayecto a superficie, además de generar la estabilidad del pozo perforado, asegurando la mitigación de un colapso futuro dándole la integridad requerida para soportar las altas presiones que este pozo experimentará, siendo así de gran interés para toda la operación de perforación y producción su correcta elaboración.

La mayoría de los pozos petroleros se han cementado con lechadas de cementación clase G la cual es el estándar a nivel global, por las propiedades que esta brinda y por la facilidad que tiene para modificar sus propiedades mediante el uso aditivos tales como aceleradores, retardadores, extendedores, densificantes, dispersantes, controladores de filtrado, controladores de pérdida de circulación y aditivos especiales, dependiendo de las necesidades que se tenga en pozo petrolero, sin embargo no siempre se cumplen sin que alguna otra propiedad salga perjudicada brindándole mayor grado de dificultad a la operación.

El uso de nanotecnología ha dado excelentes resultados a los posibles problemas que puedan presentar durante la operación de cementación, como lo demuestra el estudio realizado por Mirza Talha Baig, Muhammad Kalimur Rahman, y Abdulaziz Al-Majed, por la King Fahd University of Petroleum & Minerals<sup>11</sup>, en el cual se llevaron a cabo diferentes pruebas de laboratorio para evaluar la viabilidad de la Nano-zeolita como aditivo en las lechadas en bajos porcentajes, mostrando efectos positivos sobre la lechada. Recomiendan el uso de Nano zeolita en porcentajes que varíen desde el 1%-3% para ver los beneficios que esta brinda sin alterar la integridad de la lechada.

El objetivo general de la investigación fue la evaluación a escala de laboratorio del desempeño de una lechada de cementación utilizando Nano-Zeolita, la cual busca mejorar propiedades de la lechada intervenida. Los objetivos específicos de la investigación fueron:

- Describir las generalidades de las lechadas de cementación.
- Elaborar el marco de referencia de la zeolita y su aplicación en lechadas de cementación.

---

<sup>11</sup> TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Application of Nanotechnology in oil well cementing, SPE-187543-MS, p.1.

- Estructurar una metodología con base a la norma API 10B, para el desarrollo de las pruebas de laboratorio.
- Evaluar propiedades reológicas y físicas para una lechada base y una lechada con adición de Nano-Zeolita, mediante pruebas de laboratorio.
- Analizar el cambio de las propiedades reológicas y físicas de la lechada de cementación anteriormente evaluadas mediante las pruebas de laboratorio en los dos escenarios que se han propuesto.
- Comparar los resultados obtenidos previamente para evidenciar como la Nano-Zeolita ha afectado a las lechadas de cementación.

El estudio se centra en la mejora de las propiedades de una lechada de cementación base clase G mediante el adiconamiento de Nano-Zeolita, la cual busca reducir los tiempos para alcanzar la resistencia a la comprensión, el aumento de la resistencia a la compresión de esta y la reducción en la perdida de filtrado hacia la formación.

## 1. MARCO TEÓRICO

En el marco teórico de esta investigación se otorga información general sobre lechadas de cementación y el mineral llamado zeolita, con el fin de brindar conocimientos básicos, con los cuales se facilite la comprensión de las etapas posteriores que comprende la investigación que se llevó a cabo.

### 1.1 LECHADAS DE CEMENTACIÓN

Una lechada de cemento es una mezcla líquida que está compuesta principalmente por cemento, agua y aditivos químicos, esta mezcla tiene una densidad característica según en propósito de su uso. Las lechadas de cementación tienen una filtración mucho mayor que los fluidos de perforación lo que quiere decir que inevitablemente se va a producir daño de formación en la zona donde esta mezcla sea utilizada.

**1.1.1 Requerimientos básicos para lechadas de cemento.** “Las lechadas de cementación deben de cumplir requerimientos específicos con el fin de asegurar la seguridad operacional y mejorar la calidad de operación de la cementación. Las propiedades que requieren ser medidas son: densidad de la lechada, reología, pérdida de fluido, contenido de agua libre, fuerza compresiva, tiempo de espesamiento y permeabilidad del cemento, esta última no es requerida en campo”<sup>12</sup>.

**1.1.1.1 Densidad de la lechada de cemento.** “Hace referencia al peso de la lechada de cemento por unidad de volumen, esta tiene que ser mayor a la densidad del fluido de perforación, pero no debe de fracturar la formación, además de asegurar la resistencia del cemento fraguado y la fluidez de la lechada de cemento”<sup>13</sup>.

**1.1.1.2 Tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.** “La continua hidratación del cemento produce que la lechada se vaya espesando continuamente hasta que esta pierda totalmente su fluidez. Con el fin de garantizar seguridad durante la operación de cementación y a su vez asegurar la bombeabilidad de la lechada a la posición deseada dentro del anular en el pozo, esta debe de mantener su fluidez durante cierto tiempo”<sup>14</sup>.

---

<sup>12</sup> RENPU WAN, Advanced well completion engineering, p.258.

<sup>13</sup> Ibid., p.259.

<sup>14</sup> idem.

**1.1.1.3 Propiedades reológicas de la lechada de cemento.** “La reología de la lechada de cementación es la propiedad de la deformación del flujo bajo la acción de aplicar un esfuerzo cortante”<sup>15</sup>.

**1.1.1.4 Perdida de filtrado de la lechada de cemento.** “Se presenta cuando el agua libre presente en la lechada de cemento entra a la formación a través de la cara de la formación”<sup>16</sup>.

**1.1.1.5 Contenido de agua libre.** “En las operaciones de cementación, cualquier volumen de agua de la lechada que excede el volumen requerido para hidratar completamente el cemento Portland y otros aditivos. El agua libre puede separarse físicamente a medida que fragua una lechada de cemento”<sup>17</sup>.

**1.1.1.6 Resistencia a la compresión de una lechada de cemento.** “Es la fuerza de compresión que el cemento fraguado puede soportar por unidad de área antes de la fractura”<sup>18</sup>.

**1.1.1.7 Permeabilidad del cemento fraguado.** Es la capacidad que tiene el cemento de permitir el flujo de fluidos a través de él, obviamente del cemento fraguado debe de ser baja en toda su extensión para así alcanzar el aislamiento.

**1.1.2 Cemento para pozos petroleros.** Los cementos para pozos petroleros son los cementos de silicato y cementos sin silicato los cuales son aplicados en las operaciones de cementación, workover, squeeze, entre otras.

**1.1.2.1 Clasificación de los cementos según la API.** La clasificación de los cementos petroleros va dada por las normas API y está en función de la profundidad y la temperatura a la cual se pueden usar:

- **Cemento clase A:** “se emplea a una profundidad máxima de 1830 m y temperaturas de hasta 77°C, donde no se requieran propiedades especiales”<sup>19</sup>.
- **Cemento clase B:** “se emplea a una profundidad máxima de 1830 m y temperaturas de hasta 77°C, donde se requieran moderadas resistencias a los sulfatos”<sup>20</sup>.

---

<sup>15</sup> Idem.

<sup>16</sup> Idem.

<sup>17</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, free water.

<sup>18</sup> RENPU WAN, Advanced well completion engineering, p.260.

<sup>19</sup> JACOME MARCO, Ingeniería de cementaciones, p. 6.

<sup>20</sup> Ibid., p.6.

- **Cemento clase C:** “se emplea a una profundidad máxima de 1830 m y temperaturas de hasta 77°C, donde se requiera alta resistencia a la compresión temprana. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos”<sup>21</sup>.
- **Cemento clase D:** “se emplea a profundidades desde 1830 m hasta 3050 m y temperaturas de hasta 110°C y presiones moderadas, Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos”<sup>22</sup>.
- **Cemento clase E:** “se emplea a profundidades desde 1830 m hasta 4270 m y temperaturas de hasta 143°C y presiones altas, Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos”<sup>23</sup>.
- **Cemento clase F:** “se emplea a profundidades desde 3050 m hasta 4880 m y temperaturas de hasta 160°C y presiones altas, Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos”<sup>24</sup>.
- **Cemento clase G:** “se conocen como cementos petroleros, son empleados desde la superficie hasta una profundidad de 2240 m. Estos pueden modificarse con aceleradores y retardadores para ser usados en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura”<sup>25</sup>.

**1.1.2.2 Aditivos para Cementos.** Los aditivos para las lechadas de cemento han surgido por las limitaciones existentes al momento de llevar a cabo una operación de cementación de pozos petroleros, estos se usan con el fin de alcanzar los requerimientos operacionales bajo los diferentes escenarios que se puedan presentar, modificando y regulando las propiedades de las lechadas, los aditivos existentes en la actualidad son los siguientes:

- **Aceleradores:** “son productos químicos que reducen el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento. Incrementan la velocidad de desarrollo de resistencia compresiva”<sup>26</sup>.
- **Retardadores:** “son productos químicos que prolongan el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento”<sup>27</sup>.
- **Extendedores:** “son materiales que bajan la densidad del cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto fraguado”<sup>28</sup>.

---

<sup>21</sup> JACOME MARCO, Ingeniería de cementaciones, p. 8.

<sup>22</sup> Ibid p.8.

<sup>23</sup> Idem.

<sup>24</sup> Idem.

<sup>25</sup> Idem.

<sup>26</sup> JACOME MARCO, Ingeniería de cementaciones, p. 9.

<sup>27</sup> Ibid p.9.

<sup>28</sup> Idem.

- **Densificantes:** “son materiales que incrementan la densidad de los sistemas del cemento”<sup>29</sup>.
- **Dispersantes:** “son productos químicos que reducen la viscosidad de las lechadas de cemento”<sup>30</sup>.
- **Controladores de filtrado:** “son materiales que controlan la pérdida de la fase acuosa de los sistemas de cemento, frente a zonas permeables”<sup>31</sup>.
- **Controladores de pérdida de circulación:** “son materiales que controlan la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación o fracturas”<sup>32</sup>.
- **Aditivos especiales:** “son los aditivos complementarios para la cementación, tales como antiespumantes, controladores de la regresión de la resistencia compresiva, entre otros”<sup>33</sup>.

## 1.2 ZEOLITA

La zeolita es un mineral micro poroso inorgánico de origen volcánico con estructura regular de poros y cámaras<sup>34</sup>, Además forman un gran grupo de silicatos hidratados que muestran similitudes cercanas en composición, asociación y modo de ocurrencia. Son aluminosilicatos estructurados con Na, Ca, y K y cantidades altamente variables de agua<sup>35</sup>.

**1.2.1 Formación de la zeolita.** Las zeolitas pueden formar cristales bien desarrollados en venas y cavidades y de rocas volcánicas o pueden aparecer como granos de cristal finos principalmente en rocas sedimentarias y rocas volcánicas. Independientemente del mecanismo de formación, los depósitos de zeolitas son caracterizados como depósitos sedimentarios. El vidrio volcánico silíceo, alcalino o máfico es la materia prima más común para encontrar la zeolita. La esmectita, los feldespatos y la sílice biogénica también actúan como precursores en la formación de minerales de zeolita<sup>36</sup>.

---

<sup>29</sup> Idem.

<sup>30</sup> Idem.

<sup>31</sup> Idem.

<sup>32</sup> Idem.

<sup>33</sup> Idem.

<sup>34</sup> ZORPAS ANTONIS A. Handbook of natural zeolites. p.4.

<sup>35</sup> KLEIN CORNELIS, HURLBUT CORNELIUS S. Manual of mineralogy, p.550.

<sup>36</sup> ZORPAS. Op. Cit., p.29.

**1.2.2 Mineralogía.** Se puede apreciar la composición mineralógica de la zeolita en la siguiente tabla, en donde su componente principal es la clinoptilolita siendo al menos un 90% del total. Ver **tabla 1**.

**Tabla 1.** Composición mineralógica de la zeolita.

Composición mineralógica de la zeolita	
Clinoptilolita	90%-92%
Feldespato	2%-4%
Cristobalita	5%-7%
Mica	1%-2%

**Fuente:** Heiltropfen [sitio web]. Heiltropfen catalog 2019 [consulta: 22 de julio de 2019] disponible en: <http://www.heiltropfe.com//>

Seguidamente se va a poder observar la composición química de este mineral donde aproximadamente el 66% corresponde a SiO<sub>2</sub>. Ver **tabla 2**.

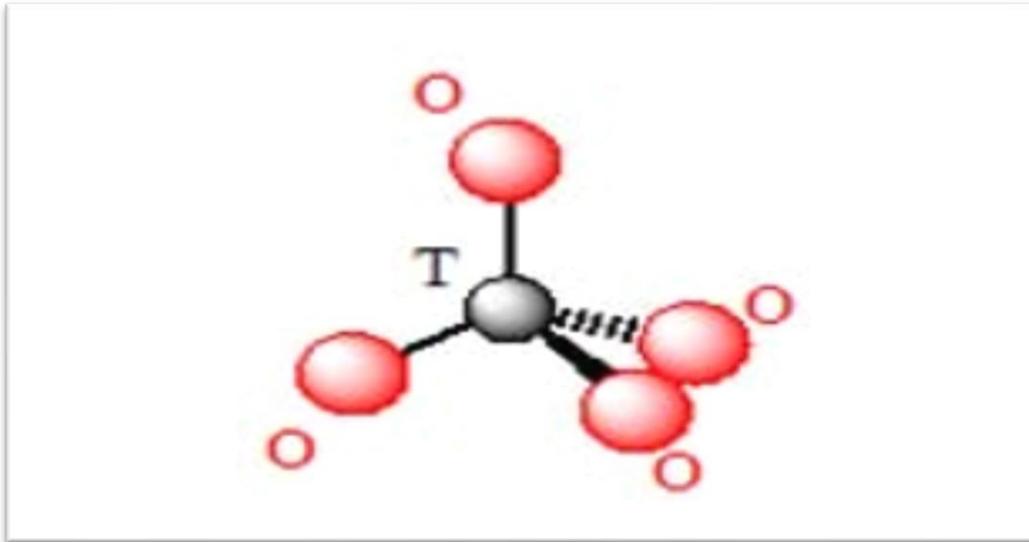
**Tabla 2.** Composición química de la zeolita

Composición química de la zeolita	
Oxido	Porcentaje (%)
SiO <sub>2</sub>	66.46% ± 2.06%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.78% ± 3.36%
Na <sub>2</sub> O	1.18% ± 0.83%
K <sub>2</sub> O	1.42% ± 0.57%
CaO	2.66% ± 1.29%
MgO	1.5% ± 0.44%
Feo	1.15% ± 0.79%
H <sub>2</sub> O	12.06% ± 0.55%

**Fuente:** Zorpas Antonis A. Handbook of zeolites, 2013. p.6.

Por último, la estructura de la zeolita se caracteriza por el marco compuesto de tetraedros TO<sub>4</sub> (T=Si, Al) con átomos de O que conectan con tetraedros vecinos, es decir cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo central. Ver **figura 1**.

**Figura 1.** Unidad de construcción primaria de la estructura de las zeolitas.



**Fuente:** Zorpas Antonis A. Handbook of zeolites, p.133.

**1.2.3 Propiedades físicas.** Las propiedades físicas que presentan las zeolitas son las siguientes<sup>37</sup>:

- Brillo: vítreo a perlado.
- Transparencia: Los cristales son transparentes a translucidos.
- Densidad específica: 2,16 Kg/dm<sup>3</sup>.
- Densidad aparente: 0,85 - 1,1 Kg/dm<sup>3</sup>.
- Dureza (escala Mohs): 3,5 – 4.
- Estabilidad alcalina: 7 – 11 pH.
- Estabilidad acida: 2 – 7 pH.
- Contenido de humedad: 7%.
- Color: incolora, blanca, rosada, amarilla, rojizo, verdosa, marfil.
- Volumen de poro: 0.34cm<sup>3</sup>.

**1.2.4 Propiedades químicas.** Las zeolitas tienen un número de propiedades químicas que son muy importantes en aplicaciones comerciales, las cuales incluyen las siguientes:

- **Intercambio iónico:** La estructura de la zeolita la cual es altamente porosa lo cual indica una alta presencia de canales y cavidades es asociada a un marco

<sup>37</sup> ZORPAS ANTONIS A. Handbook of natural zeolites. p.84.

cati3nico extra, lo cual facilita el intercambio cati3nico en esta. Las zeolitas naturales tienen un intercambio cati3nico entre 200 y 400 meq/100g<sup>38</sup>.

- **Propiedades catal3ticas:** Las propiedades catal3ticas de la zeolita son debido a la gran 3rea superficial, tanto interna como externa, y a su estructura Si-Al. El intercambio  $Si \rightarrow Al + H^+$  es ampliamente usado para la cat3lisis debido a que el tetraedro de "Al" puede funcionar como donador de protones o como receptor de estos<sup>39</sup>.
- **Tamizador molecular:** Las propiedades de tamizador molecular var3an de un mineral de zeolita a otro de acuerdo con el tama3o de poro, los canales y cavidades de la estructura del mineral. T3picamente, las zeolitas son 3tiles como tamizador molecular solo despu3s de ser completamente deshidratadas<sup>40</sup>.

**1.2.5 zeolita en lechadas de cementaci3n.** La "King Fahd University of Petroleum & Minerals" realiz3 un estudio en el cual se evalu3 el uso de Nano-Zeolita en una lechada de cementaci3n clase G. El estudio se realiz3 con varias concentraciones de Nano-Zeolita para poder evidenciar cu3l de estas fue la que brind3 mayores beneficios a la lechada de cementaci3n evaluada, estos efectos se evaluaron mediante la prueba evaluaci3n ultras3nica de cementos (UCA) durante 24 horas bajo condiciones de alta presi3n y temperatura<sup>41</sup>.

En la siguiente tabla se muestra la tabla de dise3o de lechadas con diferentes porcentajes de Nano-Zeolita. Ver **tabla 3**.

**Tabla 3.** Tabla de mezcla de lechadas con diferentes concentraciones de Nano-Zeolita.

Component	Mass (Percentage by Weight of Cement)			
Class G cement	100	100	100	100
Water	44	44	44	44
Nanozeolite	0	1	2	3
Mix design label	G	NZ1	NZ2	NZ3

**Fuente:** TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Application of Nanotechnology in oil well cementing, SPE-187543-MS, p.5.

<sup>38</sup> Ibid., p.72

<sup>39</sup> Idem.

<sup>40</sup> ZORPAS ANTONIS A. Handbook of natural zeolites. p.83.

<sup>41</sup> TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Op Cit., p.1.

Se pudo evidenciar que el adicionamiento de Nano-Zeolita fue benéfico en la generación de resistencia a la compresión de la lechada de cementación evaluada en los escenarios en los cuales se añadió 1% y 2% de Nano-Zeolita. Ver **tabla 4**.

**Tabla 4.** Resistencia a la compresión a diferentes tiempos.

Time (hr:min)	Class G (psi)	NZ1 (psi)	NZ2 (psi)	NZ3 (psi)
6:00	1,730	1,743	1,983	1,554
12:00	2,170	2,180	2,312	1,976
18:00	2,320	2,337	2,444	2,135
24:00	2,430	2,546	2,500	2,100

**Fuente:** TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Application of Nanotechnology in oil well cementing, SPE-187543-MS, p.6.

Además, se evaluó cuanto tiempo le tomó a la lechada de cementación alcanzar resistencia a la compresión de 50, 500 y 2.000 psi, siendo la lechada intervenida con 2% de Nano-zeolita la única que mostro mejoría con respecto a la lechada de cementación base.

**Tabla 5.** Tiempo para alcanzar resistencia a la compresión (50, 500 y 2.000 psi).

Compressive Strength (psi)	Class G	NZ1	NZ2	NZ3
	Hours			
50	0.95	1.02	0.9	1.15
500	1.47	1.55	1.35	1.67
2,000	8.97	8.07	6.18	12.58

**Fuentes:** TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Application of Nanotechnology in oil well cementing, SPE-187543-MS, p.7.

Asimismo, se evidencio la reducción significativa de la porosidad y permeabilidad de la lechada de cementación evaluada por la adición de Nano-Zeolita, esto fue confirmado mediante la realización de investigación microestructural mediante el uso de SEM<sup>42</sup>.

Del artículo se llega a la conclusión de que la Nano-Zeolita es un aditivo efectivo para lechadas de cementación debido a la reducción en el tiempo necesario para

<sup>42</sup> TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Op Cit., p.1

alcanzar la resistencia a la compresión y el aumento de la resistencia a la compresión de esta.

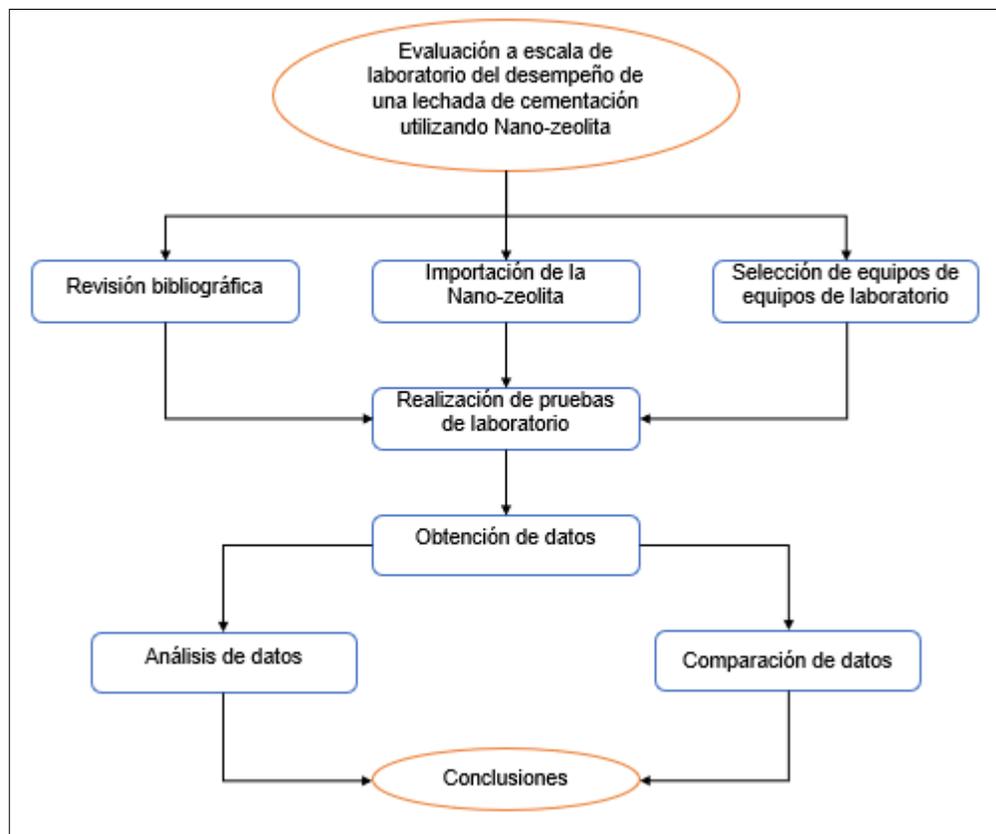
## 2. METODOLOGÍA

En la presente sección se hará una breve explicación de los procedimientos seguidos para la realización de las respectivas pruebas de laboratorio, las cuales han seguido las recomendaciones dadas por la norma API 10B, además, se podrán encontrar imágenes de los equipos utilizados para la realización de estas.

### 2.1 DIAGRAMA DE FLUJO

A continuación, se presenta el diagrama de flujo el cual se utilizó de guía para la realización del proyecto.

**Diagrama 1.** Diagrama de flujo



**Fuente:** elaboración propia.

### 2.2 PREPARACIÓN DE LECHADAS

Primero se debe realizar el balance de masa correspondiente para la mezcla y de esta manera tener las proporciones correctas para tener un volumen total de 600 ml

de lechada, posteriormente, mediante el uso de la balanza electrónica, ver **figura 2**, se deben pesar los materiales a utilizar en el siguiente orden:

- Agua.
- Cemento.
- Aditivos líquidos y sólidos.

Esto varía dependiendo de procedimientos especiales según sean indicados en la ficha técnica del material a utilizar y por último se procede a mezclar los materiales en la mezcladora automática, ver **figura 3**, a una velocidad de 4.000 rpm durante el adicionamiento de materiales después subir a 12.000 rpm durante 35 segundos y parar de mezclar. El proceso variará dependiendo de la ficha técnica de los materiales que se van a utilizar en el proceso<sup>43</sup>.

**Figura 2.** Balanza electrónica.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

---

<sup>43</sup> American Petroleum Institute, Recommended practice for testing well cements, p.11.

**Figura 3.** Mezcladora automática.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

Una vez pesados los materiales mediante el uso de la balanza electrónica y el mezclado de estos en la mezcladora automática se ha terminado el proceso de la preparación de la lechada de cementación la cual será utilizada en las pruebas de laboratorio que se necesiten realizar.

### **2.3 PRUEBA DE MEZCLABILIDAD**

La prueba de mezclabilidad consiste en determinar si la lechada posee la fluidez adecuada para la operación de bombeo. Esta prueba es totalmente cualitativa y es valorada mediante el criterio de la persona que realice la prueba, donde define si la lechada es apta o no para su uso en operaciones reales de cementación.

### **2.4 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA**

El instrumento utilizado para la medición de la densidad de una lechada de cemento es la balanza de densidad de fluido presurizada. Ver **figura 4**. Debido a la presurización de la copa de muestras, cualquier aire atrapado decrece a una cantidad despreciable, esto provee una medida más representativa de la densidad de la lechada<sup>44</sup>. El procedimiento que se siguió es el siguiente:

- Llenar la copa de muestra hasta un poco debajo del borde superior de esta.
- Se procede a posicionar la tapa sobre la copa de muestreo.

---

<sup>44</sup> Ibid. p.22.

- Asegurar la tapa con el anillo de la copa (asegurándose que la válvula de la tapa este en posición “cerrado”).
- Bombear cemento con la bomba presurizadora mediante la válvula presente en la tapa.
- Asegurarse de que la copa quede completamente llena.
- Proceder a montar la balanza en su respectivo sitio de operación.
- Realizar medición.

**Figura 4.** Balanza presurizada



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

## **2.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y LA RESISTENCIA GEL**

Este procedimiento se realiza utilizando el viscosímetro rotacional, ver **Figura 5**. El cual es utilizado para hacer la caracterización reológica de los fluidos utilizados en cementación de pozos bajo condiciones de presión y temperatura tanto atmosféricas como circulantes<sup>45</sup>.

---

<sup>45</sup> Ibid. p.59.

**Figura 5.** Viscosímetro rotacional.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

El procedimiento que se siguió es el descrito a continuación:

- Una vez armado el equipo se vierte la lechada de cemento en la copa del viscosímetro hasta alcanzar la línea indicadora con la que cuenta la respectiva copa.
- Tomar los datos a las velocidades a velocidades de 3 rpm, 6 rpm, 30 rpm, 60 rpm, 100 rpm, 200 rpm y 300 rpm de forma ascendente y decentemente para hallar las propiedades reológicas.
- Calcular el promedio de los datos obtenidos anteriormente.
- Ahora se deben de tomar datos a 3 rpm a 10 segundos y 10 minutos después de haber hecho rotar el viscosímetro a 300 rpm durante 1 minuto con el fin de encontrar los datos de la resistencia gel.
- Repetir proceso a Temperatura circulante.

Una vez finalizado el procedimiento hay que calcular el  $V_p$  mediante el uso de la **ecuación 1** y el  $Y_p$  con la **ecuación 2**.

**Ecuación 1.** Viscosidad plástica para lechadas de cementación.

$$Viscosidad\ plástica\ (V_p) = (\theta_{300} - \theta_{100}) * 1.5$$

**Fuente:** NORTON, Iaperyouse. Formulas and calculations for Drilling. Production and Workover. Citado por MESA, Carlos y PINZÓN, Felipe. Gulf professional publishing. Segunda edición 2012. Pag. 185.

Donde la viscosidad plástica es expresada en centipoises (cp), siendo  $\theta_{300}$  y  $\theta_{100}$  la lectura de 300 rpm y 100 rpm respectivamente en el viscosímetro rotacional.

**Ecuación 2.** Punto cedente para lechadas de cementación.

$$\text{Punto cedente } (Y_p) = \theta_{300} - V_p$$

**Fuente:** NORTON, lapeyrouse. Formulas and calculations for Drilling. Production and Workover. Citado por MESA, Carlos y PINZÓN, Felipe. Gulf professional publishing. Segunda edición 2012. Pag. 185.

El punto cedente es expresado en Lbf/100ft<sup>2</sup>,  $\theta_{300}$  es la lectura del viscosímetro rotacional a 300 rpm y  $V_p$  es la viscosidad plástica que se calculó anteriormente.

## 2.6 DETERMINACIÓN DE PERDIDA DE FLUIDO

Esta prueba es realizada para determinar la velocidad a la cual la lechada se deshidrata durante los trabajos de cementación cuando este en contacto con una formación permeable y esté actuando un diferencial de presión de 1000 psi, siendo la deshidratación la pérdida de líquidos por parte de la lechada, los cuales son separados por los diferenciales de presión y absorbidos por la formación permeable<sup>46</sup>.

La prueba es realizada utilizando el filtro prensa estático, ver **figura 6**, el cual cuenta con una celda resistente a altas presiones y posee una longitud de 10", capacidad de 500 ml y un filtro de 3.5" de área que debe de ser llenada con la lechada de cementación, y una malla de 45  $\mu\text{m}$  respaldada por una de 250  $\mu\text{m}$ , por la cual fluirá el líquido que se ha separado de la lechada<sup>47</sup>.

---

<sup>46</sup> Ibid. p.48.

<sup>47</sup> Ibid. p.49.

**Figura 6.** Filtro prensa estático.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

En la parte de debajo del filtro prensa estático se ubica una probeta de tamaño adecuado para la recolección del líquido filtrado, se deben de tomar los datos del volumen de filtrado a los 0,5, 1, 2, 5, 7,5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Los volúmenes que se han obtenido se tienen que corregir utilizando la siguiente **Ecuación 3.** para obtener el resultado en unidades API.

**Ecuación 3.** Filtrado API.

$$API \text{ FluidLoss} = 2V_t \sqrt{\frac{30}{t}}$$

**Fuente:** American petroleum institute. API Recommended Practice 10B-2. Segunda edición, Abril de 2013. Pag. 57.

## 2.7 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

Para determinar el tiempo de engrosamiento se utiliza el consistómetro presurizado, ver **figura 7.** se mide la consistencia de una suspensión de cemento. La

consistencia, expresada en unidades de consistencia Bearden (Bc), está determinada por la fuerza impuesta por la suspensión contra la paleta y medida como un torque. Un potenciómetro, o su equivalente, se utiliza para determinar el torque, se considera que una lechada deja de ser bombeable cuando la lechada de cemento alcanza 70 Bc<sup>48</sup>.

**Figura 7.** Consistómetro presurizado.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

El procedimiento que se siguió para el desarrollo de la prueba es el siguiente:

- Ensamblar la celda del consistómetro presurizado.
- Verter la lechada de cemento en la respectiva celda.
- Posicionar la celda dentro de cámara situando en la parte superior el potenciómetro, para posteriormente iniciar el motor.
- Cerrar la cámara, encender el llenado de la cámara, la bomba en modo automático y el calentador.
- Proceder a programar desde el computador las temperaturas y los tiempos a los cuales las deben de alcanzar.
- Hacer lo anteriormente dicho de igual forma para la presión
- Se debe de esperar hasta que la prueba de una lectura de 70 Bc.
- Detener la prueba desde el computador.

---

<sup>48</sup> Ibid. p.35

## 2.8 PRUEBA DE RESISTENCIA LA COMPRESIÓN NO DESTRUCTIVA Y DESARROLLO DE GEL ESTÁTICO

la finalidad de esta prueba es conocer la resistencia a la compresión y el gel estático que desarrolla una lechada de cementación la cual es sometida constantemente a una presión y temperatura determinadas, todo esto sin llegar a generar un esfuerzo mediante presión directa sobre la lechada, por lo anteriormente dicho es conocida como prueba de resistencia a la compresión no destructiva.

La prueba se lleva a cabo en un equipo llamado Analizador ultrasónico de cemento, mayormente conocido como UCA por sus siglas en inglés o el SGSA, las cuales miden el cambio en la señales ultrasónicas emitidas que pasan a través de la lechada en tiempo real recolectando tiempos de tránsito, posteriormente la misma UCA, ver **figura 8** o el SGSA (analizador de gel estático), ver **figura 9**, que mediante el uso de algoritmos convierte los tiempos registrados en unidades de presión (psi) y (Lb/Ft<sup>2</sup>) las cuales son las unidades que se utilizan para leer la resistencia a la compresión y el desarrollo de gel estático respectivamente<sup>49</sup>.

**Figura 8.** UCA de doble celda.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

---

<sup>49</sup> Ibid, p.34.

**Figura 9.** Analizador de gel estático.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

Procedimiento que se siguió es el descrito a continuación:

- armar la celda y cubrir toda superficie interna con lubricante para evitar la cementación de esta.
- Verter la lechada de cementación a la celda y tapanla.
- Posicionar la celda en el SGSA, conectar los sensores, termo cupla y tubos de paso de fluido.
- Encender la bomba de agua, subir la temperatura hasta la temperatura estática e incrementar la presión hasta 3500 psi
- Desde el computador se establece la presión y la temperatura.
- Se debe de esperar durante 24 horas para que la prueba finalice y poder detener la prueba desde el computador.

## 2.9 ANALIZADOR DE PROPIEDADES MECÁNICAS

El analizador de propiedades mecánicas o MPRO (Mechanical properties analyzer), ver **figura 10**, es un equipo utilizado para medir continuamente las propiedades mecánicas y elásticas (Módulo de Young y Relación de Poisson) y resistencia a la compresión de cementos API bajo condiciones de alta presión y temperatura<sup>50</sup>.

**Figura 10.** Analizador de propiedades mecánicas.



**Fuente:** SUPERIOR ENERGY SERVICES.

El instrumento mide las velocidades de sonido de compresión y cizallamiento a través de la muestra de cemento y utiliza ecuaciones aceptadas por la industria para determinar la relación de Poisson y el módulo de Young. Los datos se presentan gráficamente utilizando el Sistema de Adquisición y Control de Datos (DACS) 5270<sup>51</sup>.

El procedimiento que se siguió es el siguiente:

- Llene el recipiente con la lechada de cementación hasta que esté nivelado con el medidor de nivel de lechadas. No permita que el cemento entre en contacto con la superficie de sellado o las roscas.

<sup>50</sup> CHANDLER, Instruction manual model 6265 Mechanical properties analyzer (MPRO), p.3.

<sup>51</sup> Idem.

- Inserte el conjunto del tapón superior en el recipiente. Apriete a mano el tapón hasta que el hombro se encuentre con el recipiente.
- Inserte el enchufe de alta presión en el puerto izquierdo.
- Aplique una fina capa de grasa a la termocupla.
- Inserte la termocupla en el recipiente y apriete a mano la termocupla. Lleve el recipiente al MPRO®.
- Deslice el recipiente en la chaqueta de calefacción y refrigeración del instrumento MPRO® con el puerto de presión orientado verticalmente.
- Conecte el conjunto de tubo en U y filtro entre los puertos de presión superior. Apriete ambos puertos con una llave de extremo abierto de 1/2 pulgada
- Apriete el puerto de la termocupla con una llave de extremo abierto de 5/8 pulgadas.
- Conecte y apriete a mano los cables de señal a los conectores superior e inferior del recipiente.
- Indicar presión y temperatura desde el computador para posteriormente empezar la prueba.
- Esperar de 24 a 48 horas según se requiera.
- Terminar la prueba.

### 3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al haber realizado las pruebas de laboratorio, estas se enunciarán en orden creciente según el porcentaje de Nano-zeolita utilizado en la preparación de la lechada de cementación clase G. Se debe tener en cuenta que la lechada siempre se preparó para tener una densidad de 15,8 PPG, además, se ejecutaron a condiciones de presión entre 1000 psi y 3500 psi, temperatura estática de 150°F y temperatura circulante de 120°F, para un pozo de una profundidad de 6000 ft.

La información anteriormente mencionada fue suministrada por Superior Energy Services para garantizar la repetibilidad y credibilidad de los resultados que se han obtenido mediante la realización de las pruebas de laboratorio.

#### 3.1 REOLOGÍA Y RESISTENCIA GEL

Los resultados obtenidos mediante la realización de esta prueba se obtuvieron bajo dos diferentes temperaturas; temperatura ambiente de 80°F y a temperatura circulante de 120°F.

**3.1.1 Reología y resistencia gel a diferentes concentraciones de Nano-zeolita a temperatura ambiente (80°F).** Los datos que se presentan en la **Tabla 6** exponen el esfuerzo de corte para cada una de las lechadas evaluadas teniendo en cuenta que los valores relevantes son los valores promedio que se presentan en esta. En la **Tabla 7** se muestra el comportamiento de propiedades como la viscosidad plástica ( $V_p$ ), punto cedente ( $Y_p$ ) y resistencia gel a 10 segundos y 10 minutos para una lechada de cementación con 0%, 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita respectivamente a 15.8 PPG registrados a temperatura ambiente de 80°F, para poder apreciar el cambio que tiene estas propiedades por el incremento de porcentaje de Nano-zeolita adicionado a la mezcla.

**Tabla 6.** Reología a temperatura ambiente y diferentes porcentajes de Nano-zeolita.

<b>Reología (temperatura ambiente) 0% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	13	14	13.5	
6	16	20	18	
30	29	29	29	
60	36	36	36	
100	39	42	40.5	
200	53	52	52.5	
300	62	62	62	
<b>Reología (temperatura ambiente) 1% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	12	15	13.5	
6	16	20	18	
30	35	38	36.5	
60	43	45	44	
100	52	53	52.5	
200	65	65	65	
300	71	71	71	
<b>Reología (temperatura ambiente) 2% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	12	15	13.5	
6	16	20	18	
30	39	43	41	
60	45	48	46.5	
100	53	54	53.5	
200	66	68	67	
300	78	78	78	
<b>Reología (temperatura ambiente) 3% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	14	17	15.5	
6	20	21	20.5	
30	52	53	52.5	
60	63	63	63	
100	70	72	71	
200	83	84	83.5	
300	97	97	97	

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 7.** Propiedades reológicas a temperatura ambiente.

Propiedades reológicas a temperatura ambiente (80°F)					
% Nanozeolita	0%	1%	2%	3%	
Vp (Cp)	32.25	27.75	36.75	39	
Yp (Lb/100ft <sup>2</sup> )	29.75	43.25	41.25	58	
Resistencia gel (Lb/100ft <sup>2</sup> )	10 segundos	13	18	15	23
	10 minutos	28	29	33	42

**Fuente:** elaboración propia.

**3.1.2 Reología y resistencia gel a diferentes concentraciones de Nano-zeolita a temperatura circulante (120°F).** Los datos que se presentan en la **Tabla 8** muestra el esfuerzo de corte para cada una de las lechadas evaluadas teniendo en cuenta que los valores relevantes son los valores promedio que se presentan en esta. En la **Tabla 9** se muestra el comportamiento de propiedades como la viscosidad plástica, punto cedente y resistencia gel a 10 segundos y 10 minutos para una lechada de cementación con 0%, 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita respectivamente a 15.8 PPG registrados a temperatura circulante de 120°F, para poder apreciar el cambio que tiene estas propiedades por el incremento de porcentaje de Nano-zeolita adicionado a la mezcla.

**Tabla 8.** Reología a temperatura circulante y diferentes porcentajes de Nano-zeolita.

<b>Reología (temperatura circulante(120°F)) 0% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	30	31	30.5	
6	34	33	33.5	
30	73	72	72.5	
60	90	92	91	
100	102	102	102	
200	119	120	119	
300	121	121	121	
<b>Reología (temperatura circulante(120°F)) 1% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	22	22	22	
6	25	26	25.5	
30	59	62	60.5	
60	74	73	73.5	
100	89	87	88	
200	112	113	112.5	
300	123	123	123	
<b>Reología (temperatura circulante(120°F)) 2% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	29	30	29.5	
6	32	33	32.5	
30	73	72	72.5	
60	95	101	98	
100	122	120	121	
200	148	144	146	
300	158	158	158	
<b>Reología (temperatura circulante(120°F)) 3% Nano-zeolita</b>				
<b>RPM</b>	<b>Subiendo (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Bajando (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (Lb/100ft<sup>2</sup>)</b>	
3	15	17	16	
6	20	22	21	
30	71	76	73.5	
60	111	109	110	
100	122	125	123.5	
200	153	155	154	
300	166	166	166	

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 9.** Propiedades reológicas a temperatura ambiente.

Propiedades reológicas a temperatura circulante (120°F)					
% Nanozeolita	0%	1%	2%	3%	
Vp (Cp)	28.5	52.5	55.5	63.75	
Yp (Lb/100ft <sup>2</sup> )	92.5	70.5	102.5	102.25	
Resistencia gel (Lb/100ft <sup>2</sup> )	10 segundos	39	28	35	33
	10 minutos	54	55	62	92

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.2 PERDIDA DE FILTRADO

Los resultados conseguidos al realizar esta prueba se hicieron bajo un diferencial de presión de 1000 psi, alcanzado por la presurización utilizando nitrógeno y temperatura de 120°F en cada uno de los escenarios evaluados.

**3.2.1 Perdida de filtrado a diferentes concentraciones de Nano-zeolita.** Los siguientes datos expuestos en la **tabla 10** muestran el comportamiento de las diferentes lechadas de cementación con 0%, 1%, 2% y 3% respectivamente, sometidas a un diferencial de presión de 1000 psi y una temperatura de 120°F con el fin de conocer la perdida de filtrado que esta tendría al estar en contacto con una formación.

**Tabla 10.** Perdida de filtrado para diferentes concentraciones de Nano-zeolita.

Perdida de filtrado														
	condiciones			filtrado en mililitros al tiempo dado (min)										
	$\Delta P$ (psi)	temperatura(°F)		0.5	1	2	5	7.5	10	15	20	25	30	API fl calculado(ml)
% Nanozeolita	0%	1000	120	70	118	x	x	x	x	x	x	x	x	1293
	NOTA			La lechada se deshidrata a 1 minuto de haber iniciado la prueba con 118 ml de filtrado.										
	1%	condiciones			filtrado en mililitros al tiempo dado (min)									
		$\Delta P$ (psi)	temperatura(°F)		0.5	1	2	5	7.5	10	15	20	25	30
		1000	120	70	110	x	x	x	x	x	x	x	x	1218
	NOTA			La lechada se deshidrata a 1 minuto y 10 segundos de haber iniciado la prueba con 120 ml de filtrado.										
	2%	condiciones			filtrado en mililitros al tiempo dado (min)									
		$\Delta P$ (psi)	temperatura(°F)		0.5	1	2	5	7.5	10	15	20	25	30
		1000	120	70	116	X	X	X	X	X	X	X	X	1271
	NOTA			La lechada se deshidrata a 1 minuto de haber iniciado la prueba con 116 ml de filtrado.										
	3%	condiciones			filtrado en mililitros al tiempo dado (min)									
		$\Delta P$ (psi)	temperatura(°F)		0.5	1	2	5	7.5	10	15	20	25	30
	1000	120	70	109	x	x	x	x	x	x	x	x	1194	
NOTA			La lechada se deshidrata a 1 minuto y 8 segundos de haber iniciado la prueba con 116 ml de filtrado.											

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.3 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

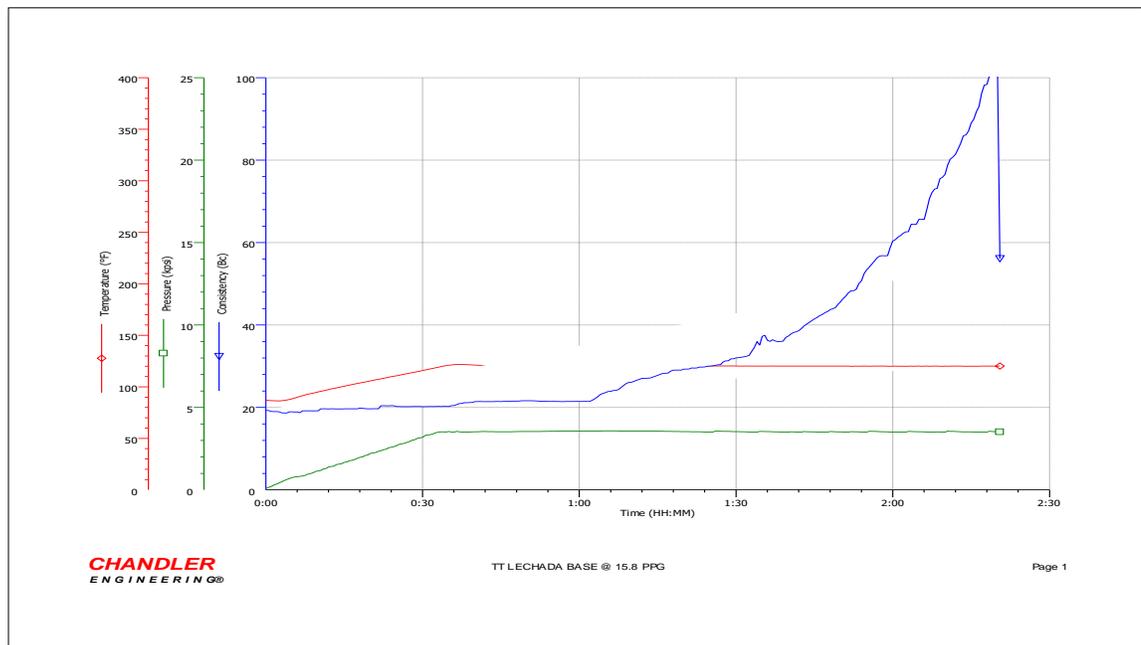
La prueba se realizó a condiciones de presión constante de 3500 psi y de temperatura variable empezando en 80°F la cual fue aumentando gradualmente durante 60 minutos para así llegar a una temperatura final de 120°F; este proceso se repitió para cada una de las lechadas analizadas las cuales contenían 0%, 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita. En la **Tabla 11** se puede encontrar el tiempo en el cual la lechada alcanza una consistencia de 70 Bc, además en la **Gráfica 1**, **Gráfica 2**, **Gráfica 3** y **Gráfica 4** se puede evidenciar el comportamiento de la consistencia de las respectivas lechadas que se evaluaron con respecto al tiempo transcurrido.

**Tabla 11.** Tiempos de bombeabilidad a diferentes concentraciones de Nano-zeolita.

Tiempo de bombeabilidad			
% Nanozeolita	consistencia (Bc)	tiempo en horas (70 Bc)	
0%	70		2.1
1%	70		2.25
2%	70		2.1
3%	70		1.8

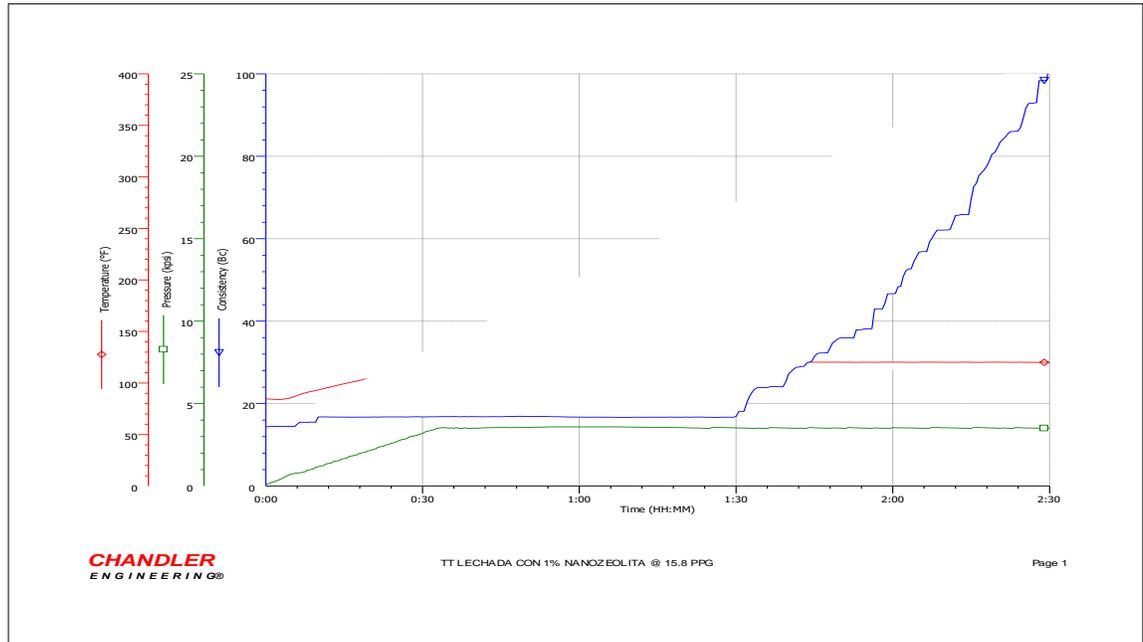
**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 1.** Tiempo de bombeabilidad 0% Nano-zeolita.



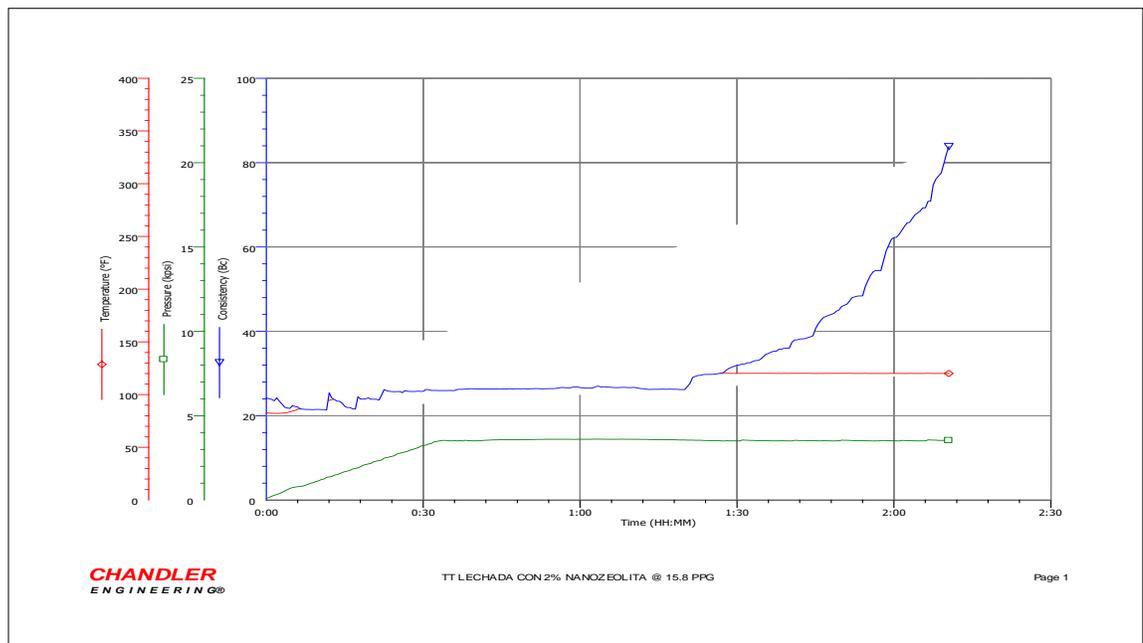
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 2.** Tiempo de bombeabilidad 1% Nano-zeolita.



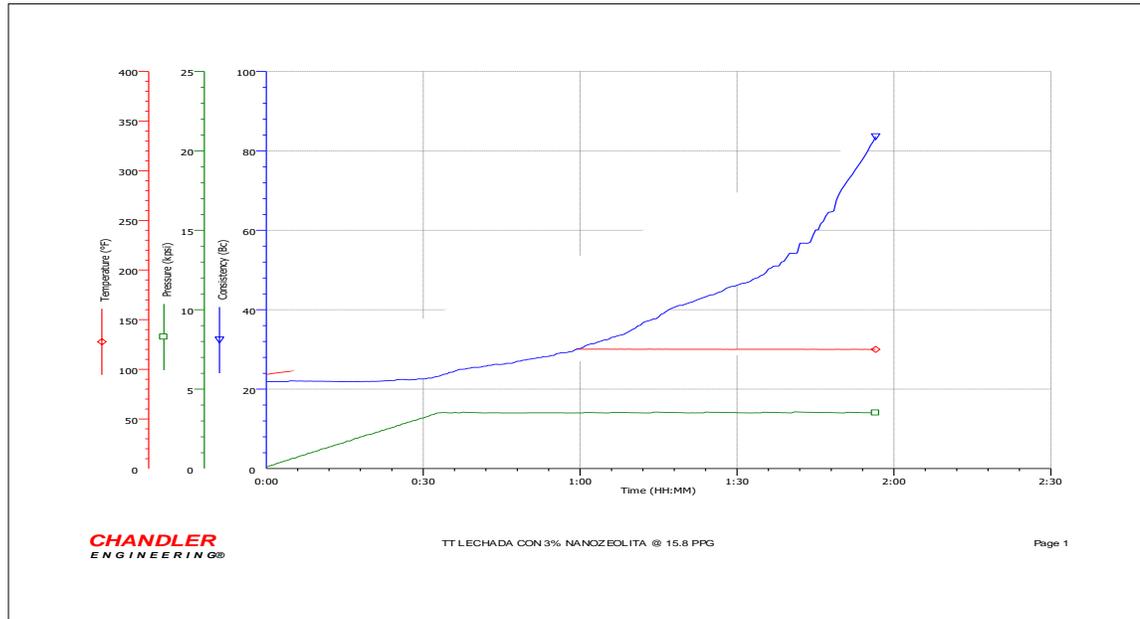
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 3.** Tiempo de bombeabilidad 2% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 4.** Tiempo de bombeabilidad 3% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

### 3.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los datos se han obtenido a condiciones de presión constante de 3500 psi y de temperatura variable empezando en 80°F la cual fue aumentando gradualmente a 120°F durante 21 minutos, después gradualmente se aumentó la temperatura durante 219 minutos para así llegar a una temperatura final de 150°F, este proceso se repitió para cada una de las lechadas analizadas las cuales contenían 0%, 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita. En la **Tabla 12** se puede encontrar la resistencia a la compresión a diferentes horas y en la **Tabla 13** el tiempo que le tomo a las lechadas alcanzar resistencias a la compresión de 50, 500 y 2000 psi, además en la **Gráfica 5**, **Gráfica 6**, **Gráfica 7** y **Gráfica 8** se puede ver el comportamiento del desarrollo de la resistencia a la compresión de las respectivas lechadas que se evaluaron en un periodo de 24 horas.

**Tabla 12.** Resistencia a la compresión a diferentes tiempos y concentraciones de Nano-zeolita.

Resistencia a la compresión a diferentes tiempos				
Tiempo	0% NZ (psi)	1% NZ (psi)	2% NZ (psi)	3%NZ (psi)
6 horas	1300	1403	1438	1539
12 horas	2052	2296	2146	2409
18 horas	2579	2657	2661	2837
24 horas	2854	2879	2965	3095

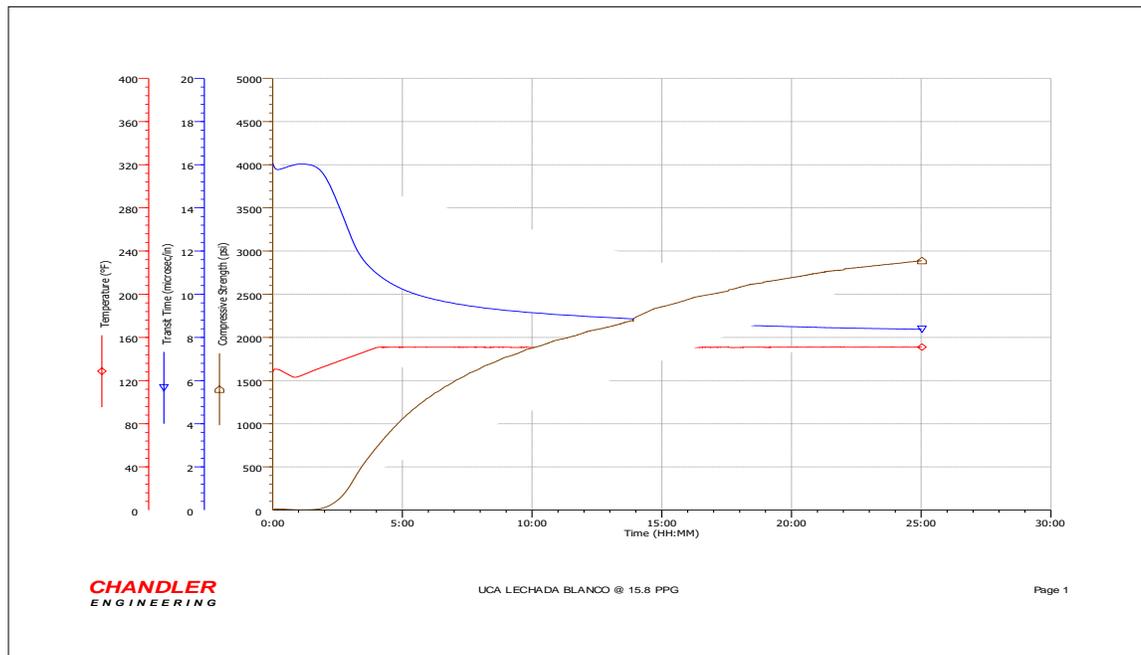
**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 13.** Tiempo para alcanzar resistencia a la compresión (50, 500 y 2000 psi) a diferentes concentraciones de Nano-zeolita

Tiempo para alcanzar resistencia a la compresión (50, 500 y 2000 psi)				
Resistencia a la compresión (psi)	Tiempo en horas			
	0% NZ	1% NZ	2% NZ	3% NZ
50	2.2	2	1.9	1.8
500	3.4	3.2	3.1	3
2000	11.4	9.3	10.2	8.4

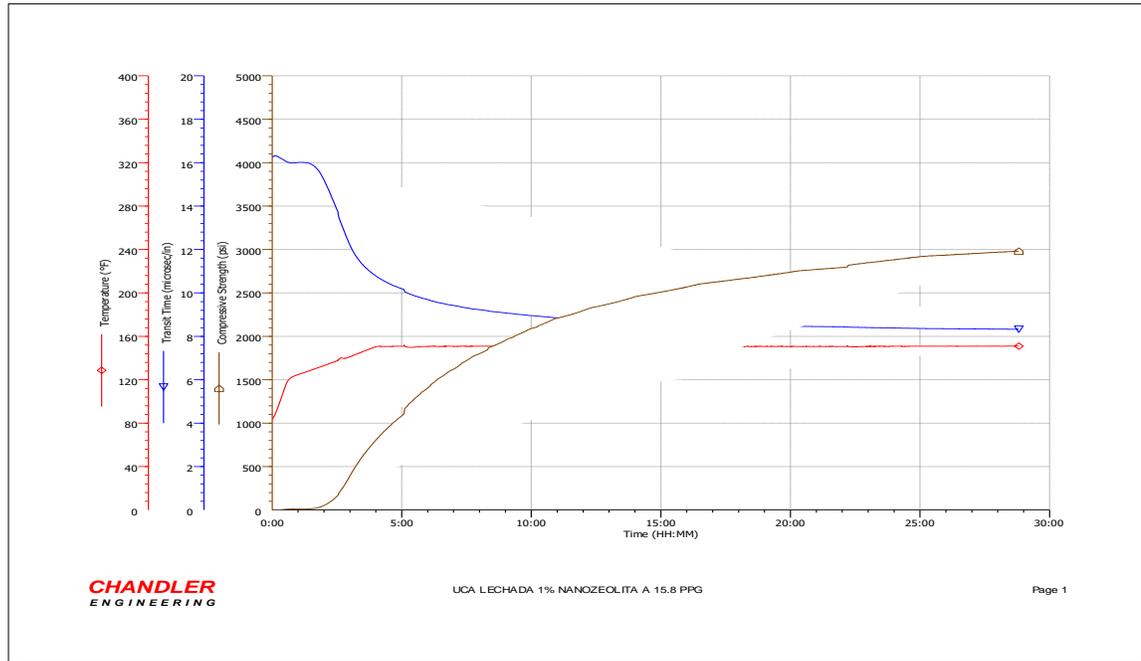
**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 5.** RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 0% NANO-ZEOLITA.



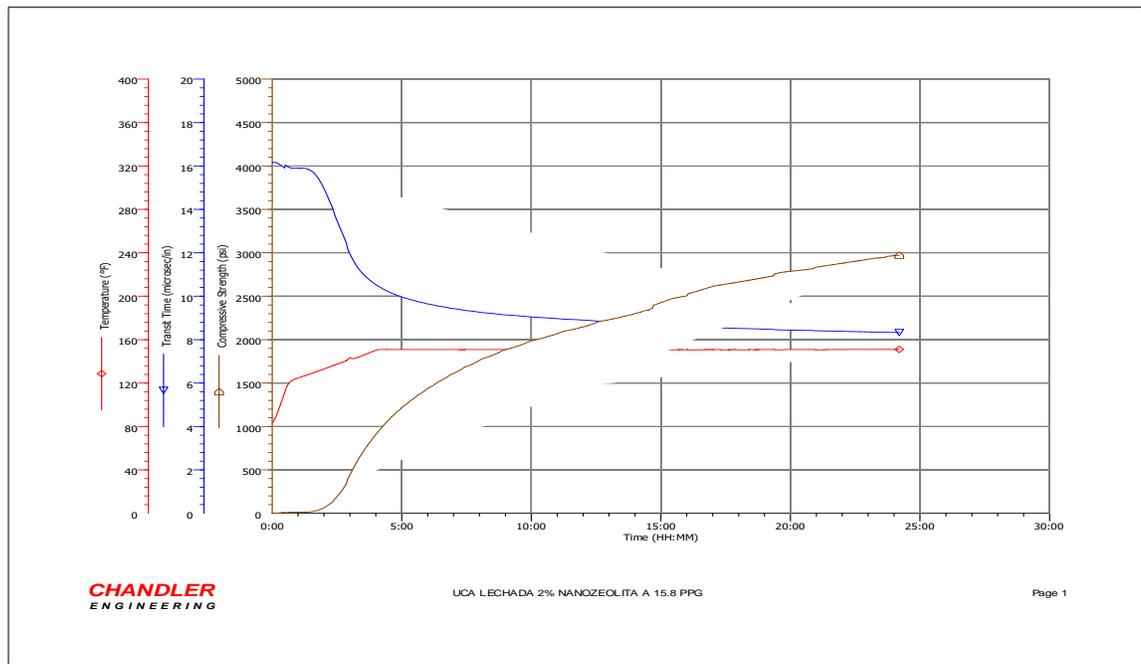
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 6.** Resistencia a la compresión 1% Nano-zeolita.



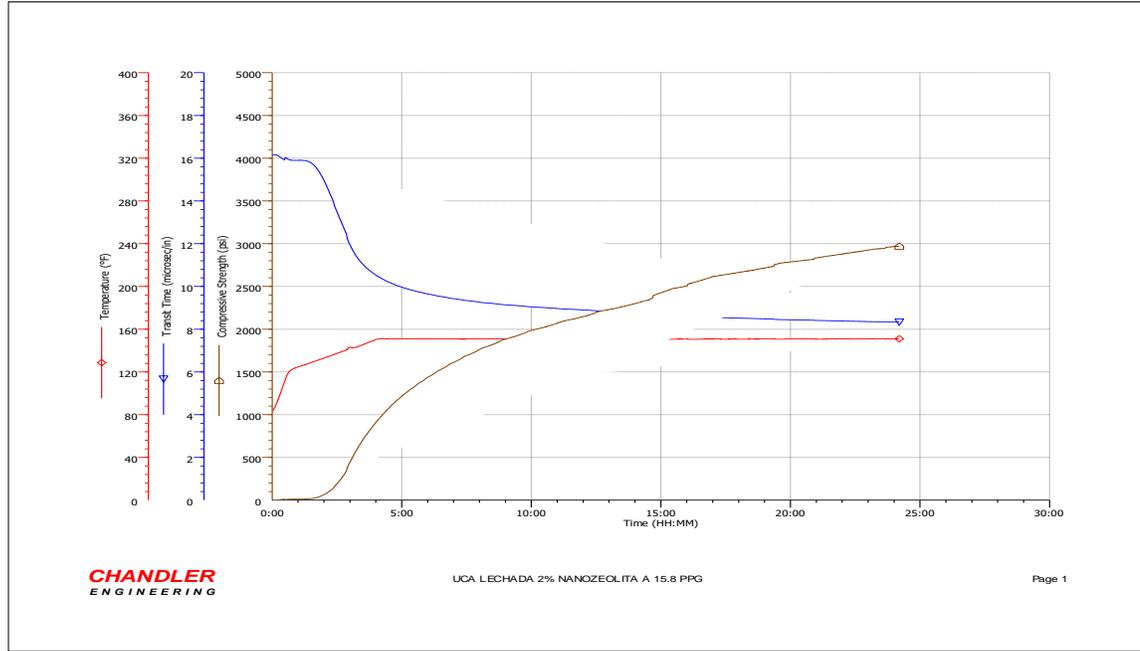
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 7.** Resistencia a la compresión 2% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 8.** Resistencia a la compresión 3% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

### 3.5 DESARROLLO DE GEL ESTÁTICO

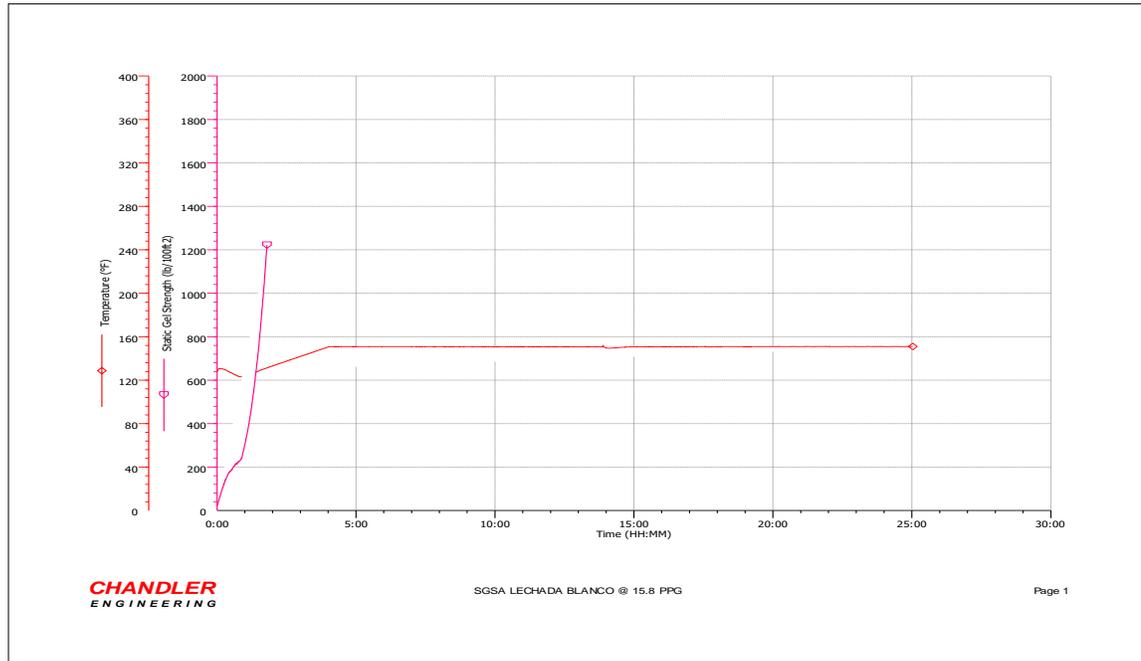
Los datos se obtuvieron a condiciones de presión constante de 3500 psi y de temperatura variable empezando en 80°F la cual fue aumentando gradualmente a 120°F durante 21 minutos, seguidamente se aumentó la temperatura gradualmente durante 219 minutos para así llegar a una temperatura final de 150°F, este proceso se repitió para cada una de las lechadas analizadas las cuales contenían 0%, 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita. En la **Tabla 14** se puede encontrar el tiempo en minutos que le tomo a las respectivas lechadas en pasar de 100 Lb/Ft<sup>2</sup> a 500 Lb/Ft<sup>2</sup>, además, en la **Gráfica 9**, **Gráfica 10**, **Gráfica 11** y **Gráfica 12** se puede ver el comportamiento del desarrollo de gel estático de las respectivas lechadas que se evaluaron a través del tiempo.

**Tabla 14.** Desarrollo de gel estático a diferentes concentraciones de Nano-zeolita.

Desarrollo de gel estático (100-500 Lb/100ft <sup>2</sup> )				
Lechada analizada	0% NZ	1% NZ	2% NZ	3% NZ
Tiempo en minutos	65	50	59	53

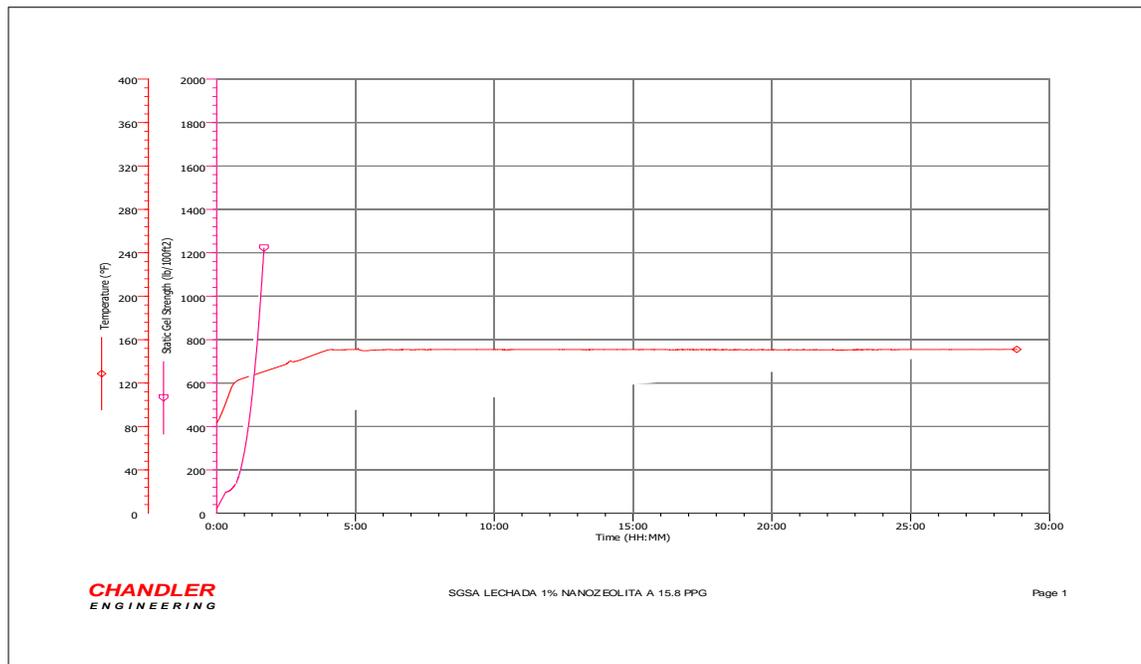
**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 9.** Desarrollo de gel estático 0% Nano-zeolita.



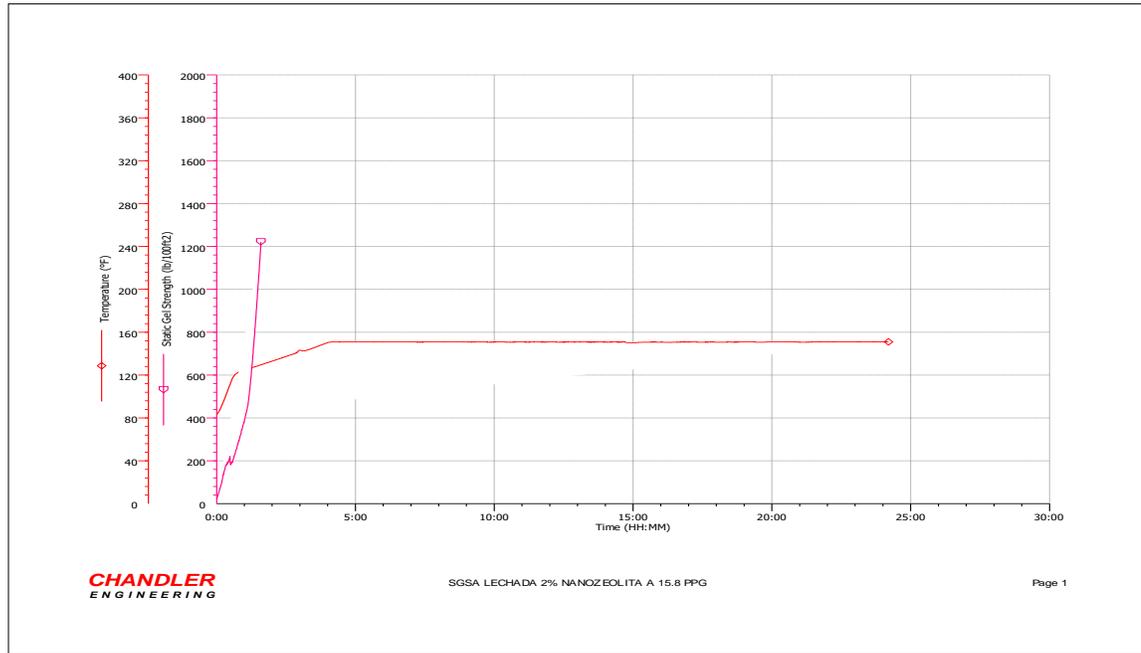
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 10.** Desarrollo de gel estático 1% Nano-zeolita.



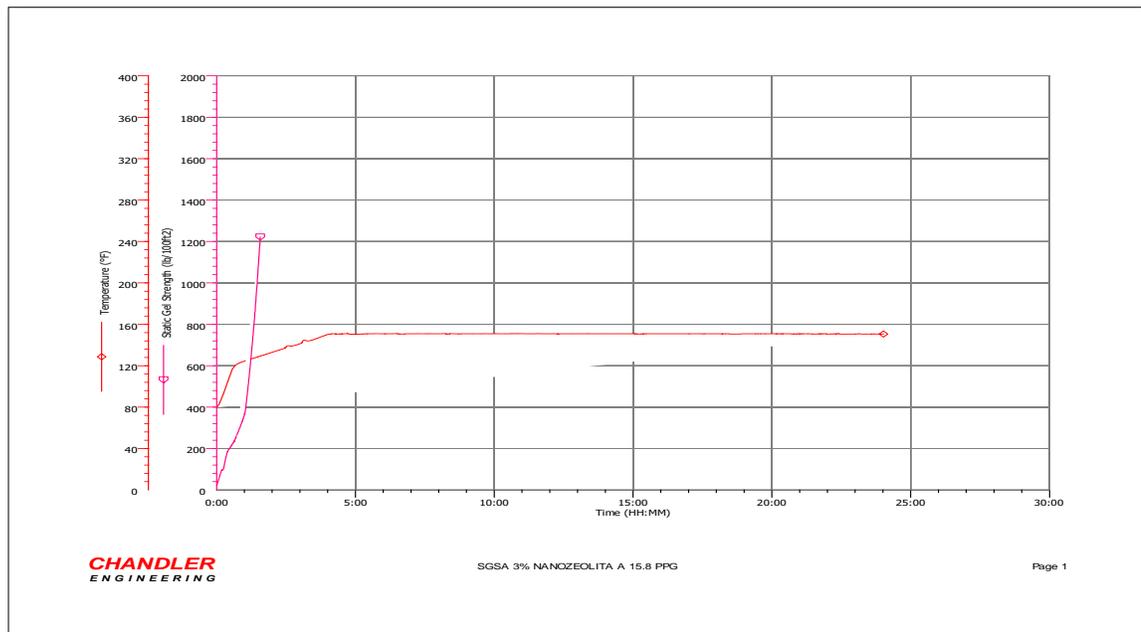
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 11.** Desarrollo de gel estático 2% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 12.** Desarrollo de gel estático 3% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

### 3.6 PROPIEDADES MECÁNICAS

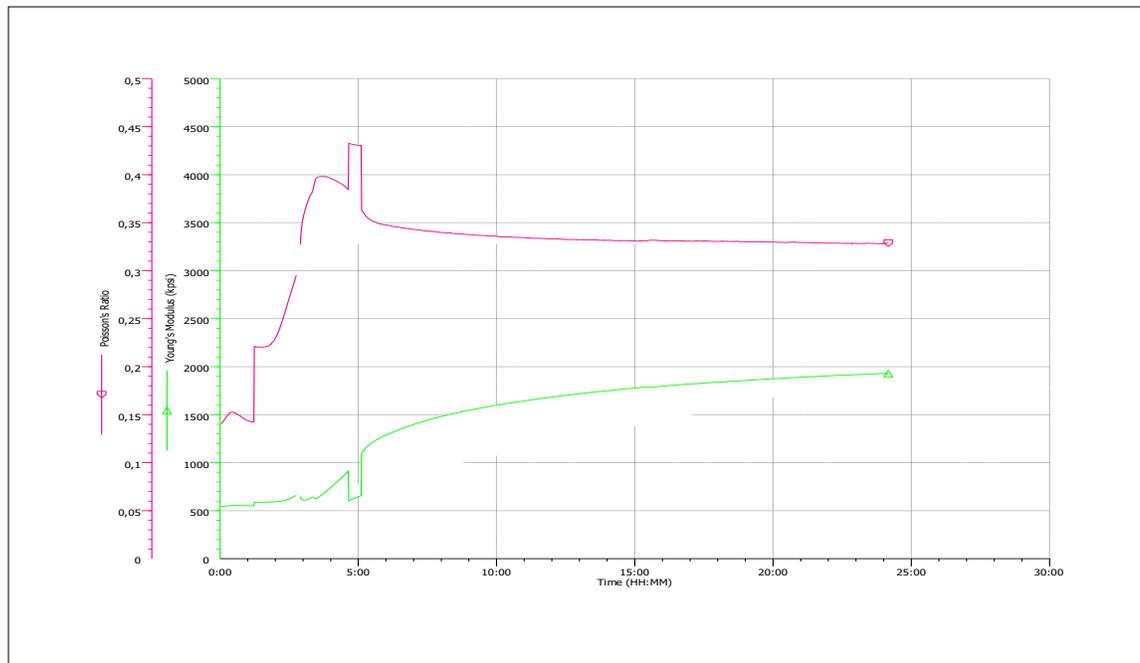
Los datos a condiciones de presión constante de 3000 psi y de temperatura variable empezando en 80°F la cual fue aumentando gradualmente a 120°F durante 21 minutos, seguidamente se aumentó la temperatura gradualmente durante 219 minutos para así llegar a una temperatura final de 150°F, este proceso se repitió para cada una de las lechadas analizadas las cuales contenían 0%, 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita. En la **Tabla 15** se puede encontrar el Módulo de Young y la Relación de Poisson para cada una de las lechadas, además, en la **Gráfica 13**, **Gráfica 14**, **Gráfica 15** y **Gráfica 16** se puede ver el comportamiento de las propiedades anteriormente mencionadas con respecto al tiempo en un periodo de 24 horas.

**Tabla 15.** Propiedades mecánicas a diferentes porcentajes de Nano-zeolita.

Propiedades mecánicas				
%Nanozeolita	0%	1%	2%	3%
<b>Módulo de Young (Kpsi)</b>	1928	2174	2017	1825
<b>Relación de Poisson</b>	0.33	0.31	0.33	0.33

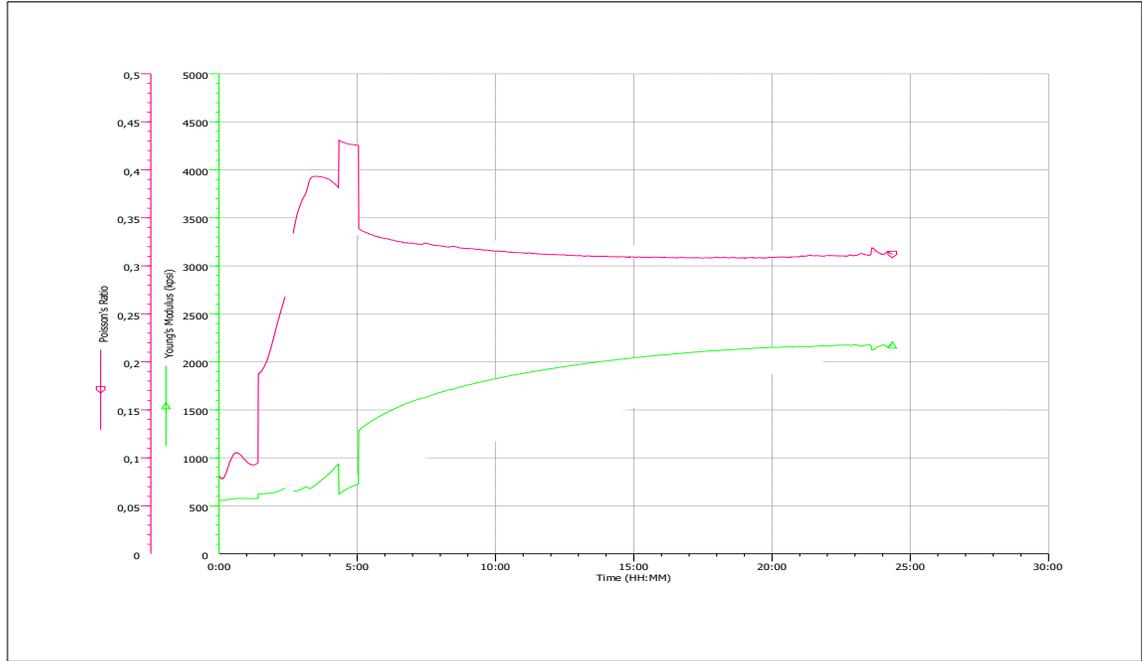
**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 13.** Módulo de Young y relación de Poisson con 0% Nano-zeolita.



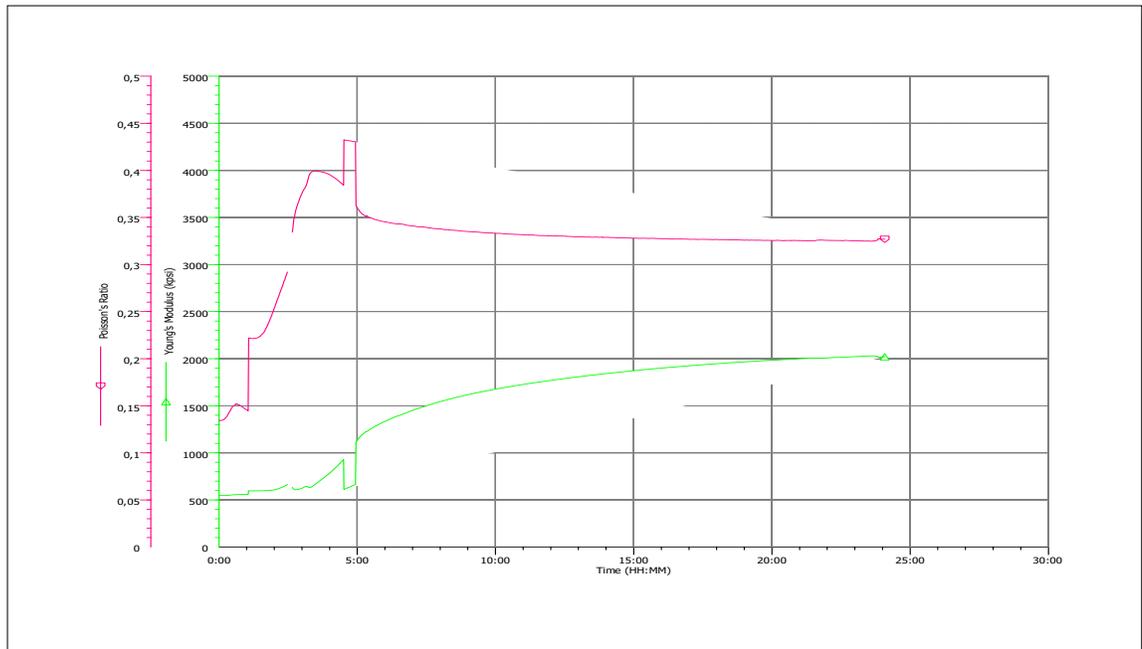
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 14.** Módulo de Young y relación de Poisson con 1% Nano-zeolita.



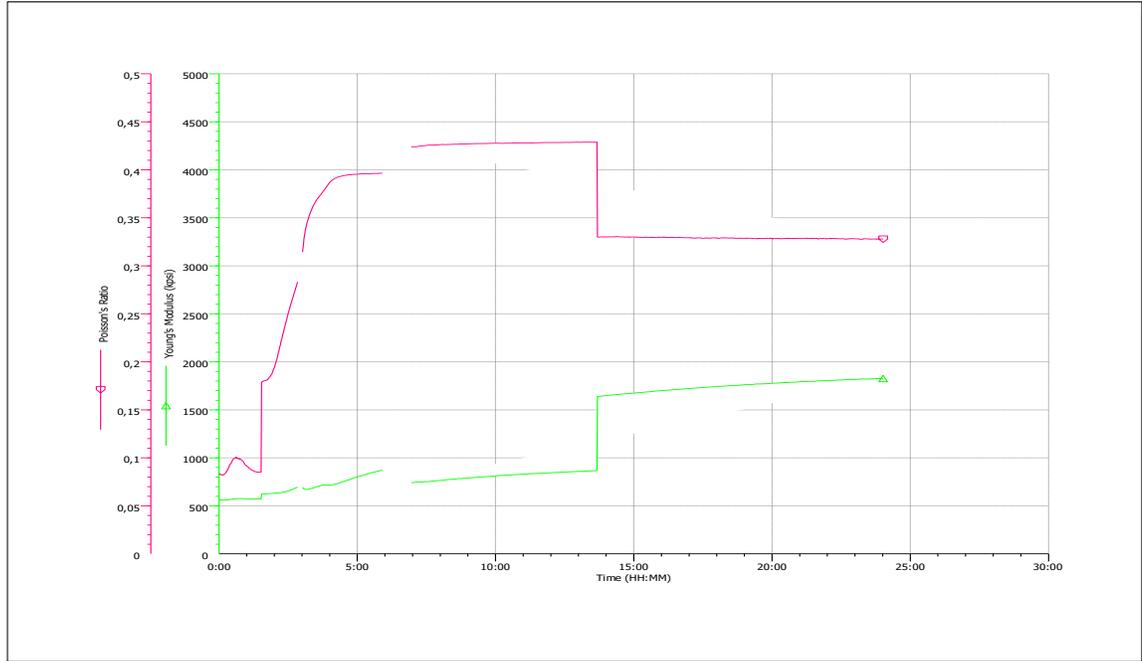
**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 15.** Módulo de Young y relación de Poisson con 2% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

**Gráfica 16.** Módulo de Young y relación de Poisson con 3% Nano-zeolita.



**Fuente:** CHANDLER ENGINEERING SOFTWARE.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestra el respectivo análisis de resultados para cada una de las pruebas realizadas en laboratorio.

### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS A TEMPERATURA AMBIENTE

Los resultados expuestos en la **Tabla 6.** muestran como la viscosidad de cada una de las lechadas analizadas aumentó a medida que el porcentaje de Nano-zeolita se incrementó, teniendo mayores efectos en las lecturas de 100, 200 y 300 rpm. Sin embargo, se evidenció que las lechadas tuvieron un comportamiento estable al hacer las lecturas a cada una de las velocidades y concentraciones de Nano-zeolita correspondientes, ya que la norma API 10B-2<sup>52</sup>, indica que las lecturas con una diferencia menor o igual a 5 unidades de medida, no presentan alteración alguna por el material utilizado, es decir, que no se presentó gelificación o sedimentación por el adiconamiento de la Nano-zeolita.

De la **Tabla 7.** se pudo deducir que el comportamiento de la viscosidad plástica (Vp) y el punto cedente (Yp) tienen un leve incremento con el adiconamiento de los respectivos porcentajes de Nano-zeolita, sin embargo, se ve una anomalía en los resultados obtenidos al haber adiconado 1% de este material, indicando que ha este porcentaje el efecto es el inverso al esperado, reduciendo la viscosidad plástica de la lechada que se evaluó en un 14%, por otra parte donde se pudo ver el mayor efecto provocado por este mineral fue cuando se le adicono 3% de este a la lechada de cementación aumentando la viscosidad plástica en un 20.9% y el punto cedente en un 95%, todo lo anteriormente dicho se puede encontrar a continuación en la **tabla 16.**

**Tabla 16.** Comparación de resultados de Vp y Yp a temperatura ambiente.

Propiedades reológicas a temperatura ambiente (80°F)				
% Nanozeolita	0%	1%	2%	3%
Vp (Cp)	32.25	27.75	36.75	39
% Incremento	0	-14.0	14.0	20.9
Yp (Lb/100ft <sup>2</sup> )	29.75	43.25	41.25	58
% Incremento	0	45.4	38.7	95.0

**Fuente:** elaboración propia.

Con respecto a la resistencia gel de las lechadas de cementación a 10 segundos y a 10 minutos siempre se vio un aumento de esta propiedad con respecto a la

<sup>52</sup> American Petroleum Institute, Recommended practice for testing well cements, p.67.

lechada base, teniendo mayores efectos al haber utilizado 3% de este mineral, obteniendo un incremento de 76.9% y 50% respectivamente. Ver **Tabla 17**.

**Tabla 17.** Comparación de resultados de resistencia gel a temperatura ambiente.

Propiedades reológicas a temperatura ambiente (80°F)					
Resistencia gel (Lb/100ft <sup>2</sup> )	10 segundos	13	18	15	23
	% incremento	0	38.5	15.4	76.9
	10 minutos	28	29	33	42
	% Incremento	0	3.6	17.9	50.0

**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS A TEMPERATURA CIRCULANTE

Los resultados que se han ilustrado en la **Tabla 8**. muestran que la temperatura tiene un efecto muy importante en el aumento de las propiedades reológicas de una lechada de cementación, esto se hace evidente en cada uno de los escenarios que se evaluó, además, se observó que la concentración que tuvo más efecto sobre las viscosidad fue cuando se adicionó 3% de Nano-zeolita a la lechada de cementación, teniendo mayores efectos en las lecturas de 100, 200 y 300 rpm, no obstante, todas las lechadas analizadas a temperatura circulante presentaron lecturas constantes a las diferentes velocidades a la cuales se realizaron, esto se puede decir debido a que la norma API 10B-2<sup>53</sup>, indica que las lecturas con una diferencia menor o igual a 5 unidades de medida, no presentan alteración alguna por el material utilizado, es decir, que no se presentó gelificación o sedimentación por el adicionamiento de la Nano-zeolita.

De la **Tabla 9**. Se pudo deducir que el comportamiento de la viscosidad plástica (Vp) y el punto cedente (Yp) tienen un incremento considerable con respecto a las mismas lechadas analizadas a temperatura ambiente, sin embargo, a temperatura circulante el incremento que estas tuvieron entre si fue moderado, teniendo mayores efectos al haber adicionado 3% de Nano-zeolita, siendo de 123.7% para la viscosidad plástica y 10.5% para el punto cedente, además, al 1% se encontró que existió una reducción del punto cedente en un 23.8% de cómo es indicado en la **Tabla 18**. Presentada a continuación.

---

<sup>53</sup> Idem.

**Tabla 18.** Comparación de resultados de Vp y Yp a temperatura circulante.

Propiedades reológicas a temperatura circulante (120°F)				
% Nanozeolita	0%	1%	2%	3%
Vp (Cp)	28.5	52.5	55.5	63.75
% De variación	0	84.2	94.7	123.7
Yp (Lb/100ft <sup>2</sup> )	92.5	70.5	102.5	102.25
% Incremento	0	-23.8	10.8	10.5

**Fuente:** elaboración propia.

Con respecto a la resistencia gel de las lechadas de cementación a 10 segundos y a 10 minutos siempre se vio un decremento de esta propiedad a los 10 segundos, sugiriendo que este mineral tiene un efecto controlador en la aparición de geles tempranos, teniendo un efecto campana en el cual los porcentajes que están entre el 1% y 3% poseen menos eficiencia al controlar la aparición de estos, la mayor reducción se evidencio al adicionar 1% de Nano-zeolita viendo una reducción del 28.2%, sin embargo tuvo el efecto contrario con los geles a 10 minutos los cuales tuvieron un incremento considerable al ir aumentando el porcentaje de Nano-zeolita utilizado teniendo un mayor efecto al haber adicionado 3% de esta y teniendo un incremento del 70.4%, todo lo anteriormente dicho se puede encontrar en la **Tabla 19**. La cual se presenta a continuación.

**Tabla 19.** Comparación de resultados de resistencia gel a temperatura circulante.

Propiedades reológicas a temperatura circulante (120°F)					
% Nanozeolita	0%	1%	2%	3%	
Resistencia gel (Lb/100ft <sup>2</sup> )	10 segundos	39	28	35	33
	% decremento	0	28.2	10.3	15.4
	10 minutos	54	55	62	92
	% Incremento	0	1.9	14.8	70.4

**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PERDIDA DE FILTRADO

Según los resultados mostrados en la **Tabla 10**. se demostró que la Nano-zeolita ha podido controlar de forma leve la perdida de filtrado, sin embargo, en todos los escenarios evaluados, las lechadas de cementación seguían presentando una deshidratación completa al poco tiempo de haber iniciado la prueba, además, no se encontró ninguna evidencia de que haya relación entre el control de filtrado y el porcentaje adicionado de Nano-zeolita en las lechadas de cementación tal y como se puede apreciar en la **Tabla 20** y la **Gráfica 17**. asimismo, se debe de tener en cuenta que el tiempo que se cronometró al finalizar la prueba, el cual es utilizado en

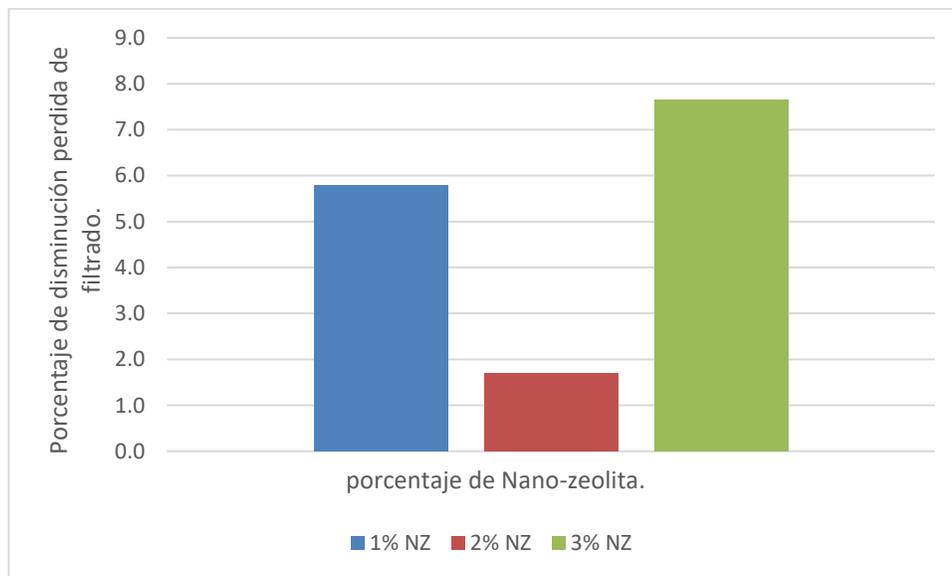
el cálculo del filtrado API, posee error humano, lo cual contribuye al comportamiento que exhibieron las lechadas de cementación.

**Tabla 20.** Comparación de resultados de pérdida de filtrado.

<b>Comparación de resultados de pérdida de filtrado</b>				
<b>%Nanozeolita</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>
<b>Filtrado API (ml)</b>	1293	1218	1271	1194
<b>% Decremento</b>	0	5.8	1.7	7.7

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 17.** Comparación de resultados de pérdida de filtrado.



**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

Según los datos obtenidos mediante la realización de la prueba de tiempo de bombeabilidad, se evidenció que las lechadas que contenían 0%, 1% y 2% de Nano-zeolita manifestaron un comportamiento similar en el desarrollo de consistencia a través del tiempo hasta alcanzar una consistencia de 70 Bc, esto se pudo apreciar en la **Gráfica 1**, **Gráfica 2** y **Gráfica 3**, no obstante, la lechada que contenía 3% de Nano-zeolita mostro un aumento sostenido en el desarrollo de la consistencia a través del tiempo, hasta que esta logro alcanzar 70 Bc tal como se puede ver en la **Gráfica 4**. Sin embargo, analizando los datos que se pueden encontrar en la **Tabla 21** y la **Gráfica 18**. Se deduce que hay una relación directa entre el porcentaje de Nano-zeolita adicionado y el tiempo de bombeabilidad, con una excepción, la cual se presentó al haber adicionado 1% de este mineral, alargando el tiempo de

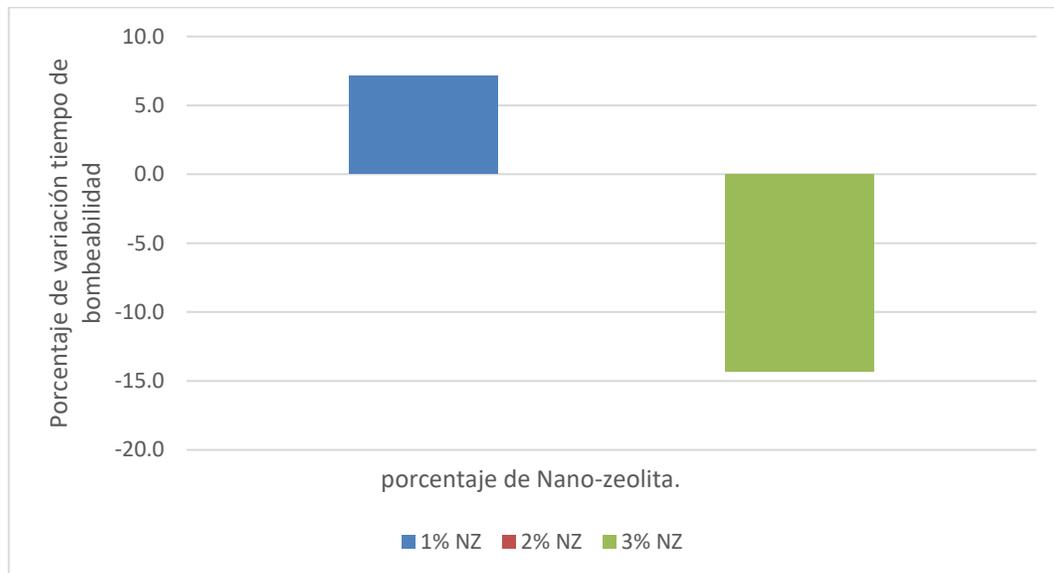
bombeabilidad de esta en 7.1% con respecto al tiempo de bombeabilidad de la lechada base.

**Tabla 21.** Comparación de resultados de tiempo de bombeabilidad.

Tiempo de bombeabilidad				
% Nanozeolita	0%	1%	2%	3%
tiempo en horas (70 Bc)	2.1	2.25	2.1	1.8
% De variación	0	7.1	0.0	-14.3

Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 18.** Comparación de resultados de tiempo de bombeabilidad.



Fuente: elaboración propia.

#### 4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DESARROLLO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La Nano-zeolita tuvo efectos considerables en el desarrollo de la resistencia a la compresión a través del tiempo, como puede observarse en la **Tabla 12**. Teniendo incrementos regulares de la resistencia a la compresión a las 6, 12, 18 y 24 horas en todos los escenarios evaluados. Generalmente se aprecia que el aumento que esta adquiere tiene una relación directa con el porcentaje de Nano-zeolita que se adicionó a la lechada de cementación, teniendo mayores efectos al haber adicionado 3% del mineral a la lechada.

A las 6 horas se pudo observar que la lechada de cementación tuvo un incremento de la resistencia a la compresión del 7.9% con respecto a la lechada base al haber

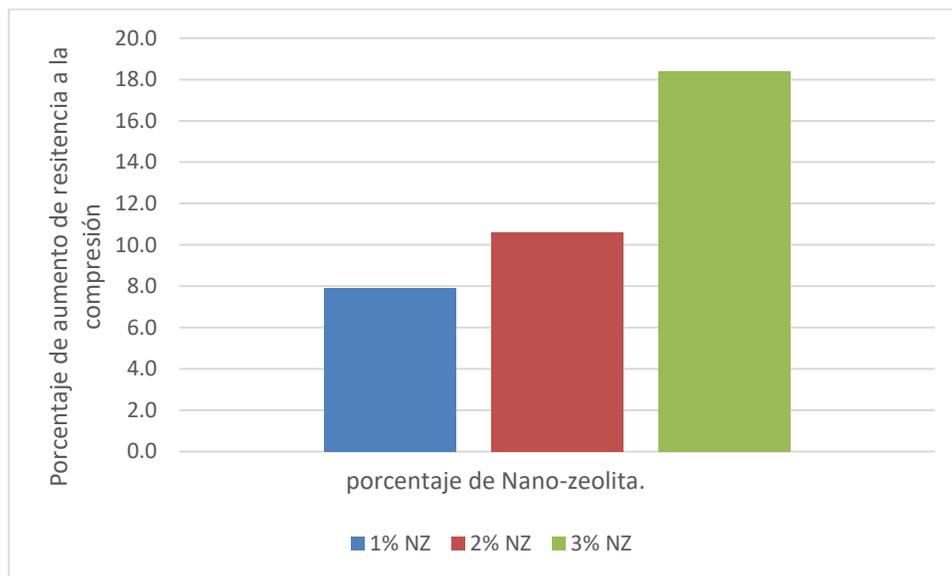
adicionado 1% de Nano-zeolita, 10.6% al haber utilizado 2% y finalmente 18.4% cuando se adiciono 3% del mineral. Ver **Tabla 22** y la **Gráfica 19**.

**Tabla 22.** Comparación resistencia a la compresión a 6 horas.

Comparación resistencia a la compresión a 6 horas.		
% Nanozeolita	Resistencia a la compresion a 6 horas (psi)	% De aumento
0% NZ	1300	0
1% NZ	1403	7.9
2% NZ	1438	10.6
3% NZ	1539	18.4

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 19.** Comparación resistencia a la compresión a 6 horas.



**Fuente:** elaboración propia.

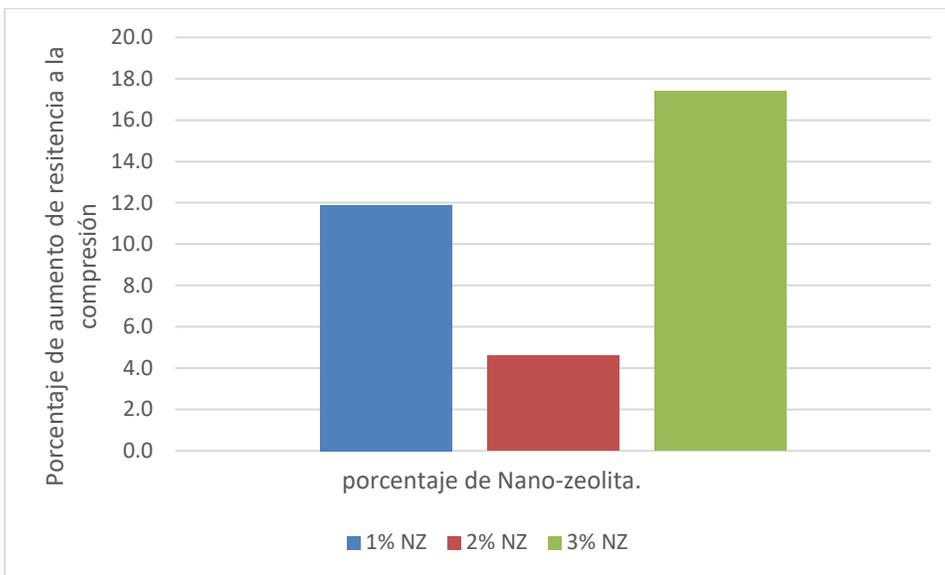
Al haber transcurrido 12 horas del inicio de la prueba, se observó que la lechada de cementación seguía ganando resistencia a la compresión a través del paso del tiempo, teniendo incrementos del 11.9%, 4.6% y 17.4% de esta con respecto a la lechada base, al haber adicionado 1%, 2% y 3% respectivamente, como se indica en la **Tabla 23** y la **Gráfica 20**. Sin embargo, se apreció una anomalía con el resultado obtenido al haber adicionado 2% de Nano-zeolita, debido a que no se obtuvo un incremento de la resistencia a la compresión mayor que el de la lechada con 1% de Nano-zeolita.

**Tabla 23.** Comparación resistencia a la compresión a 12 horas.

Comparación resistencia a la compresión a 12 horas.		
% Nanozeolita	Resistencia a la compresión a 12 horas (psi)	% De aumento
0% NZ	2052	0
1% NZ	2296	11.9
2% NZ	2146	4.6
3% NZ	2409	17.4

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 20.** Comparación resistencia a la compresión a 12 horas.



**Fuente:** elaboración propia.

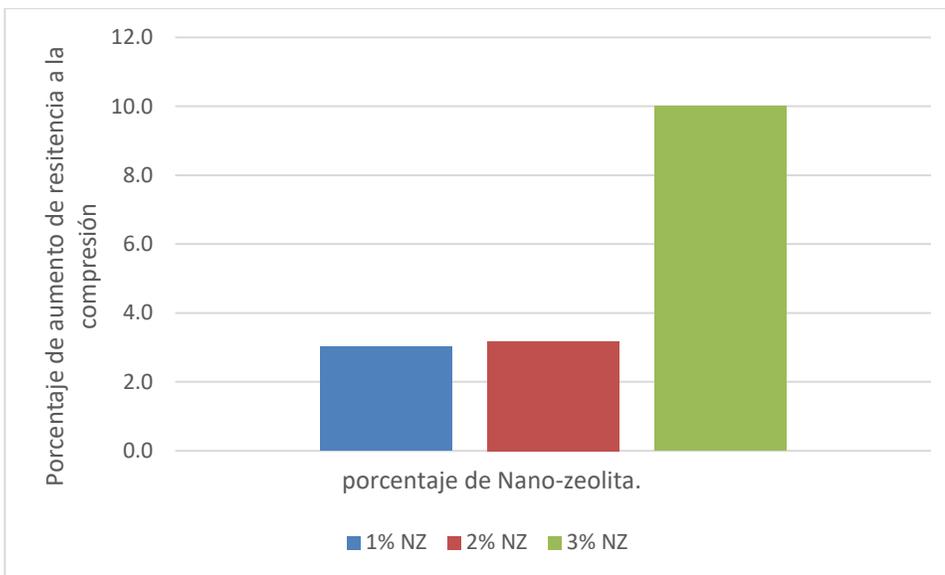
Cuando la prueba completo 18 horas de iniciada, las lechadas con 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita obtuvieron un incremento a la resistencia de la compresión de 3%, 3.2% y 10% respectivamente, en este instante se aprecia que el efecto del mineral ha empezado a disminuir, pero aún sigue manteniendo la tendencia de que entre más Nano-zeolita se adiciona a la lechada de cementación el incremento de resistencia a la compresión es mayor, tal y como se expone en la **Tabla 24** y la **Gráfica 21**.

**Tabla 24.** Comparación resistencia a la compresión a 18 horas.

Comparación resistencia a la compresión a 18 horas.		
% Nanozeolita	Resistencia a la compresion a 18 horas (psi)	% De aumento
0% NZ	2579	0
1% NZ	2657	3.0
2% NZ	2661	3.2
3% NZ	2837	10.0

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 21.** Comparación resistencia a la compresión a 18 horas.



**Fuente:** elaboración propia.

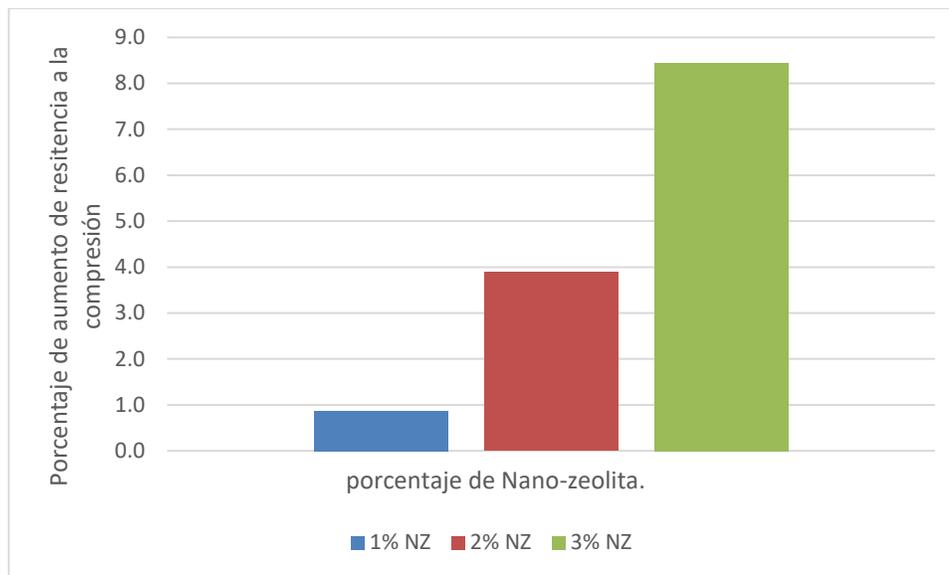
A las 24 horas se dio por finalizada la prueba y a este mismo tiempo se tomaron las ultimas lecturas correspondientes para cada una de las lechadas analizadas, para la lechada con 1% de Nano-zeolita se tuvo un incremento de la resistencia de compresión del 0.9% con respecto a la lechada de cementación base, un 3.9% de aumento de la resistencia a la compresión cuando se adicionó 2% de Nano-zeolita y al haber adicionado un 3% de esta se obtuvo un incremento de la resistencia a la compresión de un 8.4% con respecto a la lechada base, igualmente se puede apreciar que se sigue manteniendo la relación directa entre el desarrollo de resistencia a la compresión y el porcentaje de Nano-zeolita utilizado en la preparación de la lechada de cementación tal y como se puede observar en la **Tabla 25** y la **Gráfica 22**.

**Tabla 25.** Comparación resistencia a la compresión a 24 horas.

Comparación resistencia a la compresión a 24 horas.		
% Nanozeolita	Resistencia a la compresion a 24 horas (psi)	% De aumento
0% NZ	2854	0
1% NZ	2879	0.9
2% NZ	2965	3.9
3% NZ	3095	8.4

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 22.** Comparación resistencia a la compresión a 24 horas.



**Fuente:** elaboración propia.

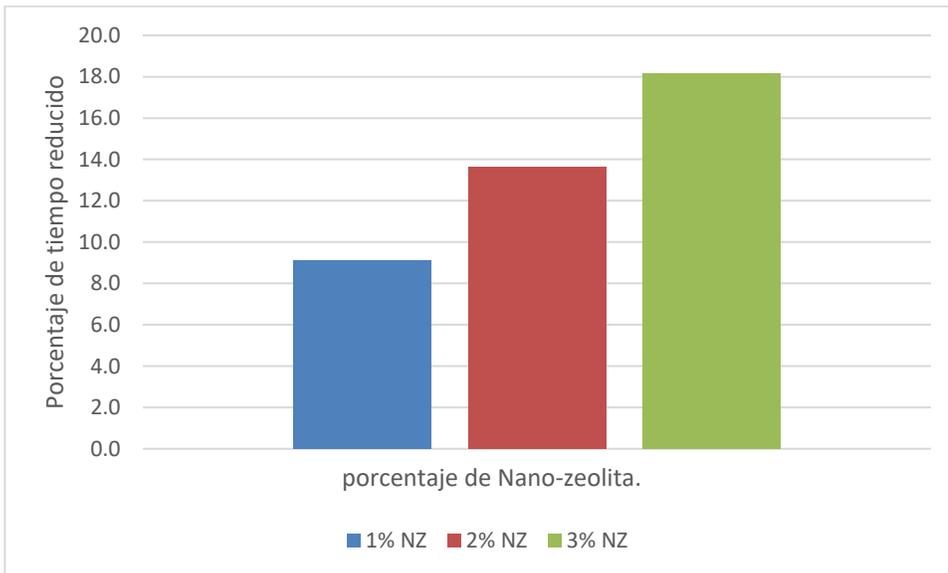
Por otra parte, se evidencio que existe una relación directa entre el porcentaje de Nano-zeolita utilizado en la preparación de la lechada de cementación y la disminución del tiempo necesario para alcanzar resistencias a la compresión a 50, 500 y 2000 psi., ver **Tabla 13**. Es decir, que al aumentar el porcentaje de Nano-zeolita, el tiempo que requería la lechada para alcanzar determinada resistencia a la compresión decrecía, de igual modo se puede ver en la **Tabla 26** y en la **Gráfica 23** cómo el tiempo disminuyo en cada una de las lechadas analizadas para alcanzar una resistencia la compresión de 50 psi, teniendo mejores resultados al haber adicionado 3% de Nano-zeolita a la lechada de cementación, teniendo como resultado una disminución de 18.2% con respecto a la lechada de cementación base.

**Tabla 26.** Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 50 psi.

<b>Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 50 psi.</b>		
<b>% Nanozeolita</b>	<b>Tiempo en horas (50 psi)</b>	<b>% De reducción</b>
<b>0% NZ</b>	2.2	0
<b>1% NZ</b>	2	9.1
<b>2% NZ</b>	1.9	13.6
<b>3% NZ</b>	1.8	18.2

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 23.** Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 50 psi.



**Fuente:** elaboración propia.

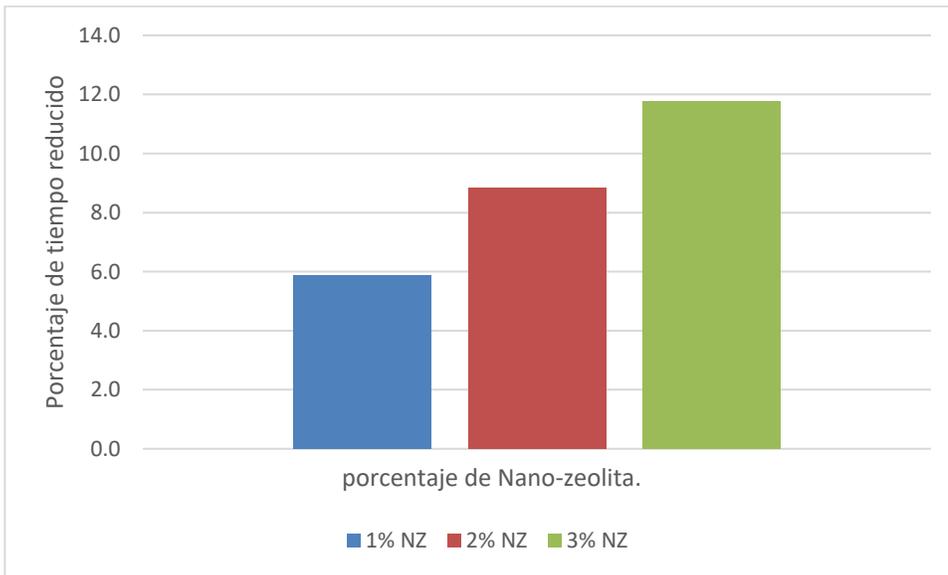
A los 500 psi de resistencia a la compresión se considera que ya se puede reanudar la operación de perforación, siendo uno de valores de mayor interés. En la **Tabla 27** y en la **Gráfica 24** se puede apreciar que hubo una disminución del tiempo para alcanzar dicha resistencia a la compresión en cada una de las lechadas de cementación analizadas con respecto a la lechada de cementación base y de igual manera se tuvo mayor porcentaje de disminución siendo de 11.8% al haber utilizado 3% de Nano-zeolita en la preparación de la lechada de cementación.

**Tabla 27.** Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 500 psi.

<b>Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 500 psi.</b>		
<b>% Nanozeolita</b>	<b>Tiempo en horas (500 psi)</b>	<b>% De reducción</b>
<b>0% NZ</b>	3.4	0
<b>1% NZ</b>	3.2	5.9
<b>2% NZ</b>	3.1	8.8
<b>3% NZ</b>	3	11.8

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 24.** Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 500 psi.



**Fuente:** elaboración propia.

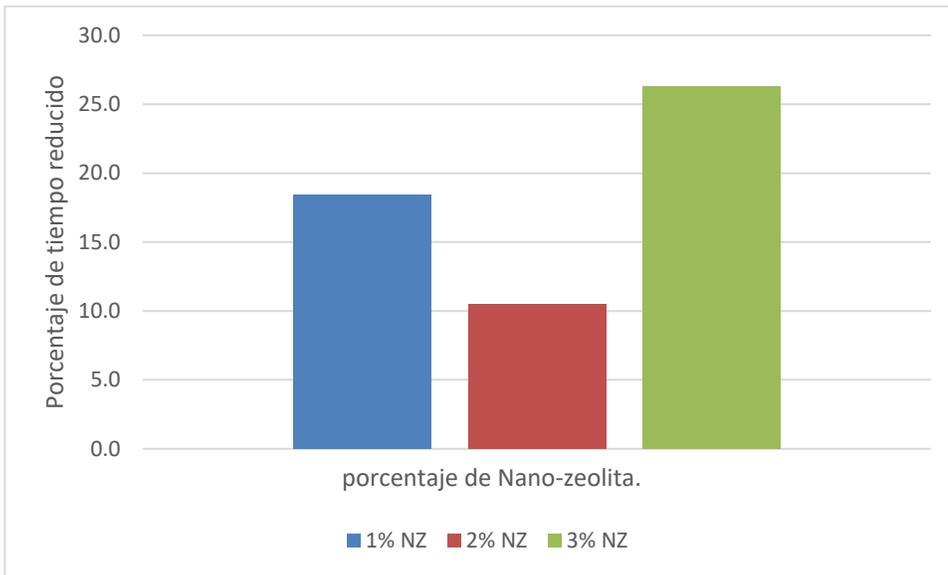
Del mismo modo las diferentes lechadas analizadas disminuyeron el tiempo que necesitaron para alcanzar una resistencia a la compresión de 2000 psi, como se observa en la **Tabla 28** y en la **Gráfica 25**. Sin embargo, se presentó una anomalía en la medición que se obtuvo para la lechada de cementación que se preparó utilizando 2% de Nano-zeolita, que a pesar de haber tenido una disminución de 10.5% en el tiempo necesario para alcanzar 2000 psi de resistencia a la compresión con respecto a la lechada base, esta fue menor con respecto a la lechada que se preparó con 1% del mineral la cual tuvo una reducción del tiempo de 18.4%. Sin embargo, la lechada preparada con 3% de Nano-zeolita fue la que tuvo el mejor desempeño al mostrar una disminución en el tiempo de 26.3% con respecto a la lechada base.

**Tabla 28.** Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 2000 psi.

<b>Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 2000 psi.</b>		
<b>% Nanozeolita</b>	<b>Tiempo en horas (2000 psi)</b>	<b>% De reducción</b>
<b>0% NZ</b>	11.4	0
<b>1% NZ</b>	9.3	18.4
<b>2% NZ</b>	10.2	10.5
<b>3% NZ</b>	8.4	26.3

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 25.** Comparación del tiempo necesario para alcanzar resistencia a la compresión de 2000 psi.



**Fuente:** elaboración propia.

#### **4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DESARROLLO DE GEL ESTÁTICO**

La propiedad analizada a continuación y que se puede ver en la **Tabla 14**, hace referencia al tiempo necesario requerido para completar su estado de transición entre sólido y líquido, siendo importante debido a que en esta transición una lechada de cementación no presenta presión hidrostática, debido a esto, es un periodo crítico en el cual puede existir percolación y tal como dice Nelson<sup>54</sup>, durante este periodo que comprende entre los intervalos de 21 Lb/Ft<sup>2</sup>-100 Lb/Ft<sup>2</sup> a 250 Lb/Ft<sup>2</sup>-500 Lb/Ft<sup>2</sup> la lechada es susceptible a la percolación de gas a través de esta, una

<sup>54</sup> Nelson Erik B, Guillot Dominique, Well Cementing second edition, p.295.

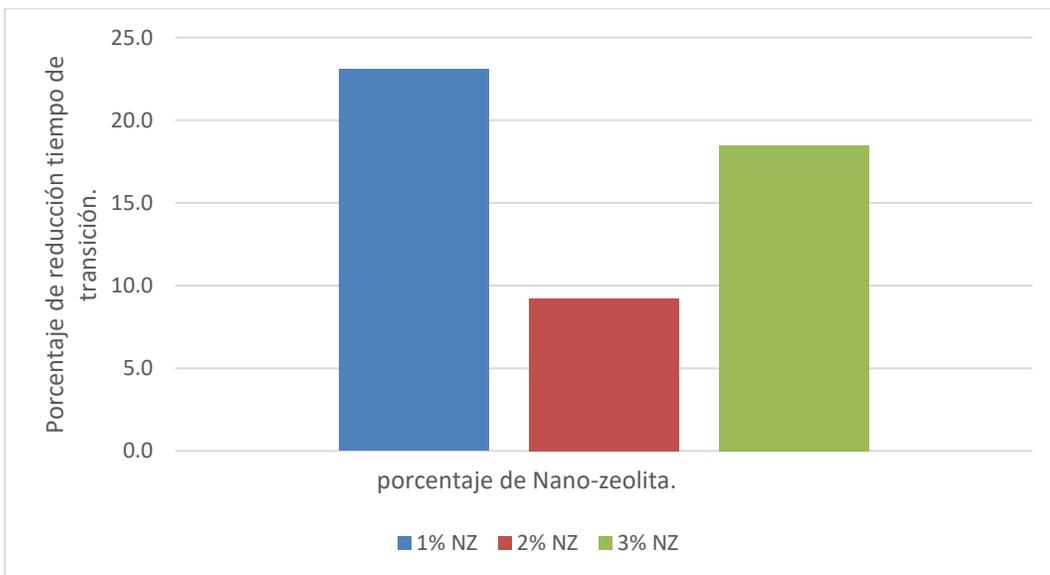
vez alcanzado el límite superior se considera que la lechada de cementación ya no permite la percolación de gas, cabe aclarar que se esperaba un tiempo de desarrollo de gel estático no mayor a 30 minutos para que esta lechada de cementación se considerara una lechada de cementación anti migratoria, siendo un criterio que utiliza la empresa. Como se ve en la **Tabla 29** y **Gráfica 26**. La Nano-zeolita tuvo como resultado la reducción del tiempo que la lechada requirió para pasar de 100 Lb/Ft<sup>2</sup> a 500 Lb/Ft<sup>2</sup>, sin embargo, no se pudo evidenciar que entre más Nano-zeolita se adicionaba a la lechada hubiese una mayor reducción del tiempo de transición de esta, respectivamente las lechadas de cementación con 1%, 2% y 3% tuvieron una reducción del 23%, 9% y 18%, y tal como se pudo evidenciar ninguna de las lechadas de cementación analizadas obtuvo un tiempo de desarrollo de geles no mayor a 30 minutos, por lo cual ninguna de estas es considerada anti migratoria.

**Tabla 29.** Comparación del tiempo necesario para pasar de 100 Lb/Ft<sup>2</sup> a 500 Lb/Ft<sup>2</sup>.

Comparación del tiempo necesario para pasar de 100 a 500 Lb/100ft <sup>2</sup>			
Lechada analizada	Tiempo en minutos	% De reducción	
0% NZ	65	0	
1% NZ	50	23	
2% NZ	59	9	
3% NZ	53	18	

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 26.** Comparación del tiempo necesario para pasar de 100 Lb/Ft<sup>2</sup> a 500 Lb/Ft<sup>2</sup>.



**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS

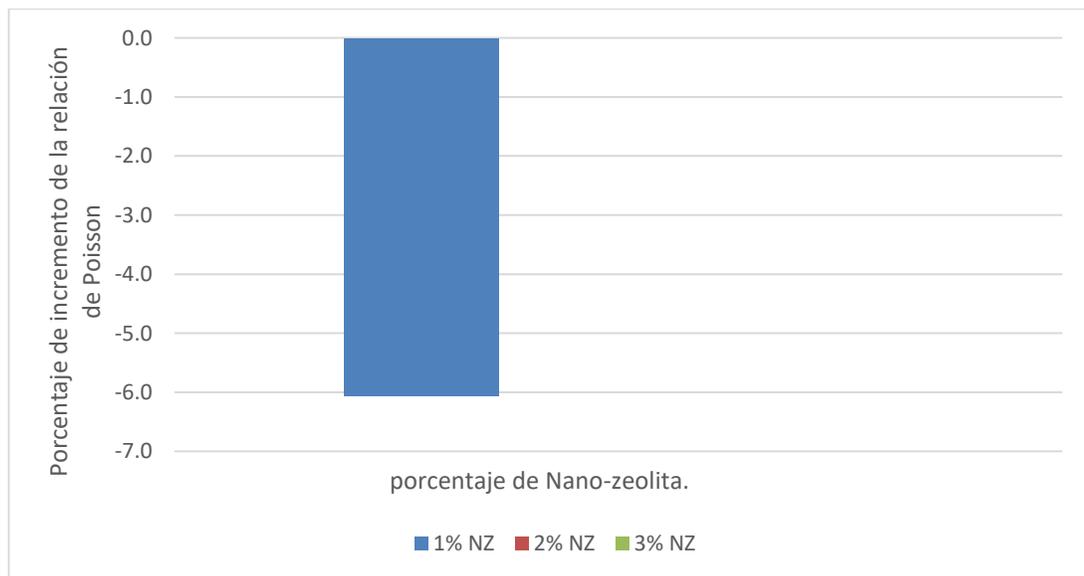
Según Schlumberger<sup>55</sup>, la Relación de Poisson es una constante elástica que es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, o la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal. Y como dice Chandler<sup>56</sup>, un material con una relación de Poisson de exactamente 0.5 se considera que es un material verdaderamente incompresible. A continuación, en la **Tabla 30** y la **Gráfica 27** se puede apreciar que la zeolita no tuvo efectos reales sobre esta propiedad de las lechadas de cementación evaluadas, teniendo un decremento de 6.1% al haber adicionado 1% de Nano-zeolita sin embargo este efecto se atribuye a una anomalía en las lecturas realizadas por la maquina debido a que los otros escenarios evaluados no hubo ningún efecto sobre la lechada de cementación.

**Tabla 30.** Comparación del porcentaje de incremento de la relación de Poisson.

Comparación del porcentaje de incremento de la relación de Poisson.				
%Nanozeolita	0% NZ	1% NZ	2% NZ	3% NZ
Relación de Poisson	0.33	0.31	0.33	0.33
% De incremento	0.0	-6.1	0.0	0.0

**Fuente:** elaboración propia.

**Gráfica 27.** Comparación del porcentaje de incremento de la relación de Poisson.



**Fuente:** elaboración propia.

<sup>55</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Relación de Poisson.

<sup>56</sup> CHANDLER, Application Note model 6265 Mechanical properties analyzer (MPRO), p.5.

Por otro lado, Schlumberger<sup>57</sup>, dice que el módulo de Young es la relación entre el esfuerzo y la deformación longitudinales que experimenta un material dado, además Erick y Guillot<sup>58</sup>, expresan que el encogimiento y la expansión de las lechadas de cementación son un problema de suma importancia durante la operación de cementación y una medida para evitar estos problemas es mantener un módulo de Young bajo, asimismo, Erick y Guillot<sup>59</sup>, dicen que el soporte mecánico está relacionado con la relación entre el módulo de Young del cemento fraguado y el módulo de Young de la roca, por lo que una roca con un módulo de Young más alto mostrará un comportamiento similar al reducir la tensión de tensión en el cemento. Cómo se puede observar en la **Tabla 31** y la **Gráfica 28** al haber adicionado 1% y 2% de Nano-zeolita hubo un incremento del módulo de Young teniendo el efecto contrario al esperado debido a que se vio un incremento de esta propiedad en un 12.8% y 4.6% respectivamente, sin embargo, se empezó a ver el veneficio de la adición de este mineral al 3% cuando se vio una reducción del módulo de Young de un 5.3%.

**Tabla 31.** Comparación del porcentaje de decremento del Módulo de Young.

<b>Comparación del porcentaje de decremento del Módulo de Young.</b>				
<b>%Nanozeolita</b>	<b>0% NZ</b>	<b>1% NZ</b>	<b>2% NZ</b>	<b>3% NZ</b>
<b>Módulo de Young (Kpsi)</b>	1928	2174	2017	1825
<b>% De reducción</b>	0.0	12.8	4.6	-5.3

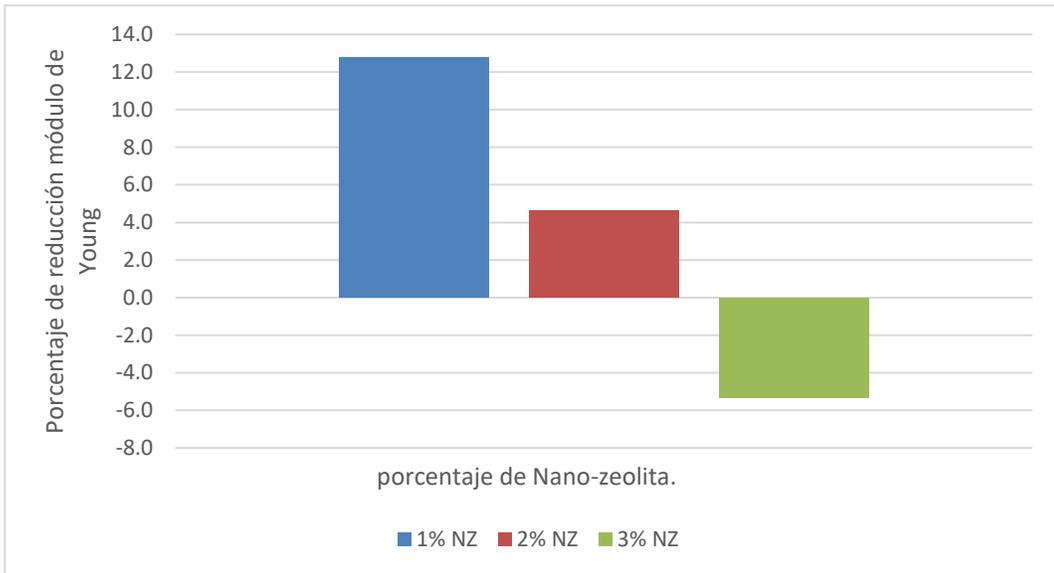
**Fuente:** elaboración propia.

<sup>57</sup> SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, Módulo de Young.

<sup>58</sup> Nelson Erik B, Guillot Dominique, Well Cementing second edition, p.280.

<sup>59</sup> Ibid. p.283.

**Gráfica 28.** Comparación del porcentaje de decremento del Módulo de Young.



**Fuente:** elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES

- Se determinó que el mejor escenario evaluado es cuando se adiciona 3% de Nano-zeolita a la lechada de cementación, debido a que en este se evidencian los mayores beneficios para la lechada de cementación, teniendo a las 24 horas un incremento de resistencia a la compresión de un 8.4% con respecto a la lechada base, y la disminución de tiempo que la lechada de cementación necesita para alcanzar resistencias de 50 psi, 500 psi y 2000 psi, siendo de 18.2%, 11.8% y 26.3% la reducción del tiempo con respecto a la lechada base respectivamente.
- Se determinó que la Nano-zeolita tiene efectos de viscosificante al haber utilizado 2% y 3% de este, viendo un incremento de la viscosidad de 14% y 20.9% en la lechada de cementación, sin embargo, al haber utilizado 1% del mineral se ve el efecto inverso, teniendo una reducción del 14% de la viscosidad de la lechada de cementación.
- Se evidenció que la Nano-zeolita no tiene efectos sobre el control de la pérdida de filtrado en una lechada de cementación, las posibles variaciones que se obtuvieron fueron producto del error humano al momento de la medición del tiempo.
- Se determinó que la Nano-zeolita tiene efectos de reducción del tiempo de bombeabilidad al haber utilizado 3% de este mineral en la preparación de la lechada de cementación, teniendo una reducción de tiempo de 14.3%, sin embargo, al haber adicionado 1% del mineral se ve el efecto inverso, es decir que aumenta el tiempo de bombeabilidad de la lechada de cementación, en este caso hubo un incremento del 7.1%.
- La Nano-zeolita tuvo efectos sobre la reducción del tiempo de desarrollo de geles estáticos entre 100 Lb/Ft<sup>2</sup> a 500 Lb/Ft<sup>2</sup>, sin embargo, no hay ninguna relación entre el aumento del porcentaje del mineral utilizado y la disminución del tiempo, además, al no haber obtenido tiempos iguales o menores a 30 minutos, ninguna de las lechadas puede ser considerada anti migratoria.
- La relación de Poisson no presentó ninguna alteración en las lechadas de cementación analizadas por la adición de Nano-zeolita.
- La adición de Nano-zeolita en 1% y 2% a las lechadas de cementación hizo que se presentara un efecto adverso en el módulo de Young, debido a que este tuvo un incremento de 12.8% y 4.6% respectivamente, significando que puede que estas lechadas presenten más problemas por encogimiento o expansión,

sin embargo, se vio una mejoría al haber adicionado 3% de este mineral debido a que se presentó una reducción de 5.3% de la propiedad evaluada.

- Las fluctuaciones de los datos que se obtuvieron en las pruebas de laboratorio por el adicionamiento de 1% de Nano-zeolita se atribuyen a la baja cantidad de material utilizado teniendo una mala distribución dentro de la lechada de cementación.
- El proyecto de grado no es económicamente viable debido a la escala a la cual se trabajó, teniendo altos costos de compra e importación de la Nano-zeolita.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se propone realizar el mismo estudio a diferentes condiciones de temperatura con concentraciones de 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita, para poder evaluar como el aumento o la disminución de esta afecta el comportamiento de la lechada de cementación.
- Se recomienda hacer el mismo estudio a diferentes condiciones de presión con concentraciones de 1%, 2% y 3% de Nano-zeolita, para poder evaluar como el aumento o la disminución de esta afecta el comportamiento de la lechada de cementación.
- Hacer la evaluación de las propiedades de la lechada de cementación al usar porcentajes intermedios del 0%, 1%, 2% y 3%, además de porcentajes superiores al 3% de Nano-zeolita, para conocer los efectos que estos diferentes porcentajes del mineral tienen sobre la lechada de cementación evaluada.
- Elaborar un diseño de lechada de cementación con el uso de 3% Nano-zeolita en la preparación de esta, debido a que en este porcentaje se evidencian mayores beneficios en las propiedades que se evaluaron en el estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practice for testing well cements, Segunda edición. Washington: American Petroleum Institute. 2013

CHANDLER, Instruction manual model 6265 Mechanical properties analyzer (MPRO), Broken Arrow: Ametek Chandler Engineering. 2015

\_\_\_\_\_, Application Note model 6265 Mechanical properties analyzer (MPRO), Broken Arrow: Ametek Chandler Engineering. 2015

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El Instituto, 2018.

JACOME MARCO, Ingeniería de cementaciones. Primera edición.

KLEIN CORNELIS, HURLBUT CORNELIUS S. Manual of mineralogy. Vigésimo primera edición. New York: Jhon wiley & Sons, inc. 1998

Nelson Erik B, Guillot Dominique, Well Cementing, second edition, Sugar land: Schulmberger. 2006

RENPU WAN, Advanced well completion engineering, Tercera edición, Kidlington: Gulf Professional Publishing. 2011

SCHLUMBERGER, Oilfield Glossary, free water. {en linea} disponible en: ([https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/free\\_water.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/f/free_water.aspx)), {18 agosto de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, Relación de Poisson. {en linea} disponible en: ([https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/poissons\\_ratio.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/poissons_ratio.aspx)), {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, Módulo de Young. {en linea} disponible en: ([https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/y/youngs\\_modulus.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/y/youngs_modulus.aspx)), {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, Mineral. {en linea} disponible en: (<https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/mineral.aspx>) {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, Reología. {en linea} disponible en: (<https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/rheology.aspx>) {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, Squeeze. {en línea} disponible en: (<https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/squeeze.aspx>) {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, Esfuerzo cortante. {en línea} disponible en: ([https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/shear\\_stress.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/shear_stress.aspx)) {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, viscosidad. {en línea} disponible en: (<https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/v/viscosity.aspx>) {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, temperatura de fondo de pozo estática. {en línea} disponible en: ([https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bottomhole\\_static\\_temperature.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bottomhole_static_temperature.aspx)) {24 octubre de 2019}

\_\_\_\_\_, Oilfield Glossary, temperatura de fondo de pozo en circulación. {en línea} disponible en: ([https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bottomhole\\_circulating\\_temperature.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/bottomhole_circulating_temperature.aspx)) {24 octubre de 2019}

TALHA BAIG, KALIMUR RAHMAN, AL-MAJED, Application of Nanotechnology in oil well cementing {en línea}. {21 febrero de 2019} disponible en: (<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-187543-MS>)

ZORPAS ANTONIS A. Handbook of natural zeolites. Primera edición, Salford: Bentham ebooks, 2012