

Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento de
pozo geotérmico

Silvia Fernanda Barajas Paredes y Daren Juliana Otero Anaya

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera de petróleos

Directora

Karina Andrea Mayorga Ribero

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector

Emiliano Ariza León

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Pregrado Presencial

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, a mi mamá por su amor y dedicación, a mi papá por confiar en mí más que nadie y apoyarme siempre, a mi nona Marina que fue un ejemplo de nobleza y perseverancia, a mi tía Zoila y a mi tío Jorge que han estado siempre presentes y han sido mi segundo hogar, a Josué que con su cariño y ternura me demuestra que en el mundo existe bondad y me motiva a ser una persona mejor.

Agradezco a mis amigos Valentina, Luisa, José, Julieth, Stephanie, Erika y Gabriela que han estado en los momentos más difíciles y han sido mi constante apoyo a lo largo de mi carrera.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander que fue el lugar en el que crecí y me formé profesional y personalmente, al ingeniero Manuel Mejía y a la empresa Tucker Energy que nos ayudaron a conseguir los materiales, a los técnicos Jairo y Jaime que nos ayudaron en el desarrollo de las pruebas en el laboratorio, a la profesora Zuly y al grupo de investigación de estabilidad de pozo que nos han brindado su ayuda.

Agradezco a nuestra directora la ingeniera Karina Mayorga que siempre estuvo presente y nos guio a lo largo de nuestro proyecto de investigación, también quiero agradecer a mi compañera de tesis por su comprensión y compromiso con la investigación.

Silvia Barajas.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, quienes me educaron con buenos valores y principios, que gracias a sus esfuerzos y sacrificios he llegado hasta acá, y que junto con mis hermanos me han apoyado y motivado para poder cumplir las metas que me he propuesto.

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de estudiar ingeniería de Petróleos bríndame los recursos y conocimientos necesarios.

A mis amigos, quienes me apoyaron y muchas veces me impulsaron a seguir adelante, y a mi compañera de tesis por sus conocimientos y ayuda.

A nuestra directora de tesis, la ingeniera Karina Mayorga, quiero expresar mis agradecimientos por su compromiso y orientación durante el proceso de investigación.

Agradezco a los profesores de la escuela de Ingeniería de Petróleos por sus enseñanzas y conocimientos compartidos.

A la empresa Tucker, en especial al ingeniero Manuel Mejía por proporcionar recursos esenciales para poder realizar la parte experimental de esta investigación

Daren Otero.

Tabla de Contenido

	Pág.
1.Introducción	15
2.Objetivos	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Generalidades.....	18
3.1 Energía geotérmica	18
4. Cementación de los Pozos geotérmicos	20
4.1 Cementos geotérmicos	22
4.1.1 Cemento Portland.....	22
4.1.1.1 Cemento Portland Clase G.....	22
4.1.1.2 Cemento de Fosfato de Aluminato de Calcio	23
4.1.1.3 Cemento resistente al choque térmico	23
4.2 Efectos de la temperatura en el cemento.....	24
4.2.1 Retroceso en la resistencia	24
4.2.2 Retracción del cemento.....	25
4.2.2.1 Retracción química	25
4.2.2.2 Retracción volumétrica	25
4.3 Tipos de falla en el cemento	25
4.3.1 Falla por cizallamiento.....	26
4.3.2 Falla por desprendimiento interior.....	27
4.3.3 Falla por desprendimiento exterior	27

4.3.4 Falla por fracturamiento radial.....	28
4.3.5 Falla por diskling	29
5. Geomecánica del cemento	30
5.1 Resistencia a la compresión	30
5.2 Módulo de Young	31
5.3 Relación de Poisson	32
5.4 Adherencia	33
5.4.1 Resistencia al cizallamiento.....	33
5.4.2 Resistencia a la tensión	34
6. Estado del arte.....	35
7. Pruebas experimentales.....	43
7.1 Prueba de resistencia a la compresión (Norma NTC 673 de 2021).....	43
7.2 Resistencia de la unión (Prueba de empuje)	44
8. Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento.....	46
8.1 Materiales y equipos	46
8.2 Prueba de resistencia a la compresión uniaxial.....	50
8.2.1 Cálculos de las cantidades de materiales necesarios.....	51
8.2.2 Preparación de las lechadas.	57
8.2.3 Curado de las muestras.	59
8.2.4 Exposición a alta temperatura de las muestras.	60
8.2.5 Desarrollo de la prueba de resistencia a la compresión.	61
8.2.6 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.	62
8.3 Prueba de empuje.....	80

8.3.1 Cálculos de las cantidades de materiales necesarios.....	80
8.3.2 Preparación de las lechadas.	82
8.3.3 Curado de las muestras.	83
8.3.4 Exposición a alta temperatura de las muestras.	84
8.3.5 Desarrollo de la prueba de empuje.....	84
8.3.6 Resultados de la prueba de empuje.....	85
9. Conclusiones	94
10. Recomendaciones	95
Referencias Bibliográficas	96

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Capacidad de instalación de energía geotérmica en el 2021	19
Tabla 2. Clasificación de los cementos según el American Petroleum Institute (API)	21
Tabla 3. Cantidad de adición de sílice recomendada.....	24
Tabla 4. Diseños de cemento con mejores resultados en los casos de estudio.	42
Tabla 5. Diseños de lechadas del último caso de estudio.	50
Tabla 6. Diseños de las lechadas.....	57
Tabla 7. Resultados de resistencia a la compresión diseño S40%	62
Tabla 8. Resultados de resistencia a la compresión diseño S35%	64
Tabla 9. Resultados de resistencia a la compresión diseño S0%	65
Tabla 10. Resultados de resistencia a la compresión diseño S40% a temperatura ambiente	68
Tabla 11. Resultados de resistencia a la compresión diseño S35% a temperatura ambiente.	69
Tabla 12. Resultados de resistencia a la compresión diseño S0% a temperatura ambiente.	70
Tabla 13. Especificaciones de la varilla de acero	82
Tabla 14. Resultados prueba de empuje para S40%-C	86
Tabla 15. Resultados prueba de empuje para S35%-C	86
Tabla 16. Resultados prueba de empuje para S0%-C.....	87
Tabla 17. Resultados prueba de empuje para S40%-CB temperatura ambiente.....	89
Tabla 18. Resultados prueba de empuje para S35%-CB temperatura ambiente.....	90
Tabla 19. Resultados prueba de empuje para S0%-CB temperatura ambiente.....	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esfuerzos radial y tangencial.....	25
Figura 2. Falla por cizallamiento en el cemento.....	26
Figura 3. Falla por desprendimiento interior.....	27
Figura 4. Falla por desprendimiento exterior.....	28
Figura 5. Falla por fracturamiento radial.....	28
Figura 6. Falla por diskings.....	29
Figura 7. Prueba de resistencia a la compresión.....	30
Figura 8. Deformaciones radial (ϵ_{radial}) y longitudinal ($\epsilon_{\text{longitudinal}}$).....	33
Figura 9. Ensayo de resistencia a la compresión.....	44
Figura 10. Prueba de empuje.....	45
Figura 11. Cemento Clase G.....	46
Figura 12. Harina de Sílice.....	46
Figura 13. Agua.....	47
Figura 14. Balanza.....	47
Figura 15. Mezcladora.....	48
Figura 16. Celdas.....	48
Figura 17. Horno.....	49
Figura 18. Prensa hidráulica.....	49
Figura 19. Celdas cilíndricas.....	50
Figura 20. Pesaje del cemento clase G en la balanza.....	58
Figura 21. Pesaje de la harina de sílice en la balanza.....	58

Figura 22. Lechada S40% 59

Figura 23. Curado de las muestras S35% 60

Figura 24. Muestras S40% en el horno 60

Figura 25. Prueba de resistencia a la compresión muestra S40% 61

Figura 26. Gráfica de Resistencia a la compresión T=200°C 66

Figura 27. Gráfica del Módulo de Young T=200°C 67

Figura 28. Gráfica de la relación de Poisson T=200°C 67

Figura 29. Gráfica de Resistencia a la compresión Temperatura ambiente 71

Figura 30. Gráfica del Módulo de Young Temperatura ambiente 72

Figura 31. Gráfica de la relación de Poisson Temperatura ambiente 73

Figura 32. Resistencia a la compresión con temperatura variable. S40% y S40%B 74

Figura 33. Resistencia a la compresión con temperatura variable. S35% y S35%B 74

Figura 34. Resistencia a la compresión con temperatura variable. S0% y S0%B 75

Figura 35. Módulo de Young con temperatura variable. S40% y S40%B 76

Figura 36. Módulo de Young con temperatura variable. S35% y S35%B 76

Figura 37. Módulo de Young con temperatura variable. S0% y S0%B 77

Figura 38. Relación de Poisson con temperatura variable. S40% y S40%B 78

Figura 39. Relación de Poisson con temperatura variable. S35% y S35%B 78

Figura 40. Relación de Poisson con temperatura variable. S0% y S0%B 79

Figura 41. Fraguado de las muestras S40% para la prueba de empuje 83

Figura 42. Muestras cilíndricas S40% en curado 83

Figura 43. Muestra cilíndrica en el horno 84

Figura 44. Ejecución prueba de empuje a una muestra de S40% 85

Figura 45. S40%-C1 estado final. 87

Figura 46. S40%-C3 estado final. 88

Figura 47. Gráfica de resistencia al corte - $T=200^{\circ}\text{C}$ 88

Figura 48. Gráfica de resistencia al corte - Temperatura ambiente. 91

Figura 49. Resistencia al corte con temperatura variable. S40%-C y S40%-CB. 92

Figura 50. Resistencia al corte con temperatura variable. S35%-C y S35%-CB. 92

Figura 51. Resistencia al corte con temperatura variable. S0%-C y S0%-CB. 93

Glosario

Activador alcalino: materiales activados con álcalis (AAM) que son obtenidos mediante la reacción entre precursores y activadores, y se separan en dos clases en función de los productos formados en la reacción, los ricos en calcio como la escoria de alto horno y los pobres en calcio que es la subclase de los geopolímeros.

Canasta energética: combinación de diversas fuentes de energía primaria utilizadas para satisfacer las necesidades energéticas.

Capacidad de bombeo: capacidad de una mezcla de cemento para ser bombeada a través de una tubería.

Cizallamiento: esfuerzo resultante de fuerzas aplicadas que genera que dos lados de un sólido se deslicen uno con respecto al otro en dirección paralela al plano de contacto.

Choque térmico: cambios térmicos súbitos que se generan en los pozos geotérmicos debido a la inyección de agua fría.

Clínker: mezcla de piedra caliza, cuarzo, hierro y arcilla fabricada a una temperatura de 1450 °C en un horno.

Curado: tiempo en el cual el cemento se endurece debido a su hidratación continua en el caso del cemento hidráulico.

Deformación: cambios de forma que puede llegar a sufrir un material debido a los esfuerzos a los que es expuesto.

Dúctil: deformación que se genera sin que se observen las fracturas en el material.

Esfuerzo: fuerza aplicada en diferentes direcciones a determinado material, esto puede llegar a generar deformaciones.

Esfuerzo radial: fuerza que se genera desde o hacia el eje central de un cilindro.

Esfuerzo tangencial: fuerzas que actúan perpendicularmente a los esfuerzos radiales.

Esfuerzo de tensión: fuerza que se aplica a un material que provoca un estiramiento de este.

Estabilizador: aditivo que impide la hidratación del cemento de forma temporal.

Fraguado: proceso en el cual el cemento pasa de su estado líquido a sólido debido a la reacción que se genera cuando el cemento es mezclado con agua.

Piroprocesamiento: proceso en el que se usa calor para lograr la mezcla de determinados materiales.

Presión intersticial: presión ejercida por el agua en los poros.

Retardador: aditivos que retrasan el fraguado del cemento.

Reventón: flujo incontrolado en un pozo de hidrocarburos y agua debido a un fallo en el sistema regulador de presión.

Sistema de cemento: diseños de lechadas de cementos

Termogravimétrica: técnica en la que se monitorea en tiempo y temperatura la masa de una muestra para determinar la cantidad de los compuestos presentes en el cemento.

Triaxial: prueba se intenta exponer a la muestra que es confinada a los esfuerzos presentes en subsuelo.

%bwoc: porcentaje de la cantidad de un aditivo implementado en el diseño de una lechada de cemento.

Resumen

Título: Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento de pozo geotérmico. *

Autoras: Silvia Fernanda Barajas Paredes y Daren Juliana Otero Anaya. **

Palabras clave: cemento; pozo geotérmico; propiedades mecánicas; aditivo; adherencia.

Descripción:

Uno de los principales problemas a la hora de realizar la cementación de los pozos geotérmicos es la pérdida de resistencia del cemento debido a las complicadas condiciones presentes en el ambiente del yacimiento. Es importante realizar pruebas de laboratorio para predecir el comportamiento de la lechada ante una exposición a altas temperaturas, determinando propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, el módulo de Young estático y la relación de Poisson. La adherencia es otro factor relevante a la hora de seleccionar un diseño adecuado para la cementación, ya que proporciona una idea de la resistencia de la unión del cemento tanto con el casing como con la formación, esta resistencia se puede llegar a ver afectada, por ejemplo, debido a un choque térmico, que es el efecto que se provoca al momento de inyectar agua fría para producir vapor que después es aprovechado para generar electricidad. Con base en la revisión bibliográfica se seleccionan dos diseños de lechadas para realizar pruebas experimentales de resistencia a la compresión uniaxial a partir de la norma NTC 673 de 2021 y el método de empuje para evaluar la resistencia al corte, para así determinar las propiedades mecánicas y la adherencia de las muestras que son calentadas en un horno a 392°F (200°C). El análisis del efecto de la temperatura es muy importante para identificar los daños que se pueden llegar a presentar después de cementar un pozo y daría claridad a la hora de seleccionar los aditivos más adecuados para los diseños de las lechadas.

* Trabajo de grado.

** Grupo de investigación de estabilidad de pozo (GIEP), Escuela de Ingeniería de Petróleos. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander (UIS).

Abstract

Title: Effect of temperature on bond and compressive strength of geothermal well cement. *

Authors: Silvia Fernanda Barajas Paredes y Daren Juliana Otero Anaya. **

Keywords: cement; geothermal well; mechanical properties; additive; bonding.

Description:

One of the main problems in cementing geothermal wells is the loss of cement strength due to the complex conditions in the reservoir environment. It is important to perform laboratory tests to predict the behavior of the slurry when exposed to high temperatures, determining mechanical properties such as compressive strength, static Young's modulus and Poisson's ratio. Bonding is another relevant factor when selecting an appropriate design for cementing since it provides an idea of the strength of the cement bond with casing and the formation. This strength can be affected, for example, due to thermal shock, which is the effect caused when cold water is injected to produce steam that is later used to generate electricity. Based on the literature review, two grout designs are selected to perform experimental tests of uniaxial compressive strength based on the NTC 673 of 2021 standard and the thrust method to evaluate the shear strength, to determine the mechanical properties and adhesion of the samples that are heated in an oven at 392°F (200°C). Analysis of the effect of temperature is very important to identify damage that may occur after cementing a well and would give insight into the selection of the most appropriate additives for slurry designs.

* Thesis.

** Wellbore stability research group, Petroleum engineering school. Physical-chemical engineering faculty. Industrial University of Santander.

1. Introducción

En los pozos de altas temperaturas se pueden llegar a presentar complicaciones en las propiedades mecánicas y en la adherencia del cemento debido al complicado ambiente. Un estudio encontró que más de 380.000 pozos en todo el mundo casi el 7 % de estos experimenta fallas siendo una de las principales razones la alta temperatura (hasta 752°F (400 °C)) y los ciclos térmicos típicos de los sistemas geotérmicos (Rod et al., 2020), partiendo de esto es importante identificar el efecto que tienen las temperaturas en las propiedades de los cementos que serán usados para el completamiento de los pozos.

Las energías no convencionales están tomando cada vez más fuerza alrededor del mundo, una de las energías que ha venido creciendo a medida del paso del tiempo es la energía geotérmica que implica el aprovechamiento del calor interno de la tierra transformándolo en energía eléctrica, para obtener esta energía es necesario la construcción de pozos lo que es una tarea compleja debido a que los ambientes geotérmicos son bastante difíciles, principalmente a causa de las altas temperaturas (Huttrer, 2020).

En los pozos geotérmicos el cemento es sinónimo de integridad y calidad porque con él se logran aislar la formación y el pozo. A medida que aumenta la temperatura estática del fondo del pozo, comienza a disminuir la capacidad del cemento que proporciona las propiedades mecánicas necesarias (Di Martino & Ruch, 2018) y se empiezan a generar diferentes tipos de falla en el cemento. Para la construcción de estos pozos el cemento más usado es el Portland, al que se le deben incluir aditivos durante la preparación de la lechada con la finalidad de darle resistencia al cemento.

Existen diferentes propiedades geomecánicas del cemento algunas de ellas son las resistencias a la compresión, al cizallamiento, a la tensión, el módulo de Young y la relación de Poisson. La determinación de estas propiedades puede servir como estimación de la capacidad de los sistemas de cemento para soportar los diferentes esfuerzos a los que pueden estar expuestos en el yacimiento.

Diferentes investigadores han desarrollado investigaciones sobre la influencia de la temperatura en las propiedades geomecánicas de distintos sistemas de cemento, lo que sirve como referencia para la selección del diseño del sistema cemento.

Esta investigación se enfoca en evaluar experimentalmente el comportamiento de las propiedades mecánicas y de la adherencia del cemento con respecto al casing que se ven afectadas debido a las altas temperaturas a las cuales se expone, tomando como métodos experimentales la norma NTC 673 de 2021 y la prueba de empuje.

Con los resultados obtenidos en el laboratorio se realiza un análisis gráfico con el fin de determinar el efecto de la temperatura en los sistemas de cemento seleccionados. A partir del análisis de los resultados, se llega a una conclusión general donde indica que la temperatura genera una disminución en las propiedades geomecánicas del cemento y se recomienda que se realicen más pruebas con otros sistemas de cemento para determinar el efecto de la temperatura en otro tipo de aditivos y cementos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar experimentalmente el efecto de la temperatura en la adherencia y la resistencia a la compresión del cemento de pozo geotérmico.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar un estudio de los tipos y sistemas de cementos que han sido usados en pozos geotérmicos mediante revisión de artículos científicos.

Seleccionar dos sistemas de cemento teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada previamente.

Efectuar pruebas de laboratorio de alta temperatura a los sistemas de cemento seleccionados según la norma NTC 673 de 2021, determinando el comportamiento de la resistencia a la compresión, módulo de Young estático y relación de Poisson, y su capacidad de adherencia.

Determinar el efecto de la temperatura en la adherencia y la resistencia a la compresión del cemento de pozo geotérmico partiendo de los resultados obtenidos en cada sistema de cemento sometido a las pruebas de laboratorio.

3. Generalidades

El mundo se encuentra realizando de forma gradual una ampliación en su canasta energética, implementando las energías renovables para la generación de electricidad. Una de las fuentes renovables más prometedoras es la energía geotérmica, con la que se puede producir calor y electricidad de forma continua (Stober y Bucher, 2021).

3.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica se puede definir como la energía térmica almacenada en el interior de la tierra, se estima que en el centro del planeta se tiene una temperatura aproximadamente de 5000°C (9032°F) (Stober y Bucher, 2021). Con las altas temperaturas que son constantes en el interior de la tierra se pueden construir pozos para inyectar agua que después se convierte en vapor, con este se impulsan turbinas de vapor para generar electricidad, además la geotermia no se ve afectada por las condiciones climáticas (Salhein et al., 2022). En la tabla 1 se presenta la capacidad de instalación de energía geotérmica para los 10 principales países.

Tabla 1

Capacidad de instalación de energía geotérmica en los 10 principales países en el 2021

País	Capacidad en megawatts (MW)
Estados Unidos	3722
Indonesia	2276
Filipinas	1918
Turquía	1710
Nueva Zelanda	1037
México	963
Italia	944
Kenia	861
Islandia	754
Japón	603

Nota. Capacidad instalada en megawatts por los diez países que han implementado a mayor escala la energía geotérmica en su canasta energética. Salhein et al., 2022.

4. Cementación de los Pozos geotérmicos

El proceso de cementación consiste en mezclar y bombear por el espacio anular que hay entre la tubería de revestimiento y la formación un sistema de cemento que se hace a partir de la mezcla de cemento, agua y aditivos. A diferencia de los pozos de petróleo y gas, las tuberías de revestimiento de los pozos geotérmicos suelen cementarse hasta la superficie.

Para que la cementación sea exitosa se debe generar un sello hidráulico entre el cemento y la tubería de revestimiento al igual que entre el cemento y la formación, esto es fundamental para el rendimiento del pozo ya que tiene las siguientes funciones: *i*) Impide la migración de los fluidos de la formación a la superficie, *ii*) Previene el colapso de las formaciones, *iii*) Impide reventones; entre otras (Bett, 2017).

El cemento más usado para el completamiento en los pozos geotérmicos es el cemento Portland que es esencialmente un material de silicato de calcio, y sus componentes más abundantes son: Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) y Ferroaluminato de tetracálcico (C_4AF) (Aïtcin, 2016, p. 27-28). Según la norma API 10A del American Petroleum Institute los cementos usados se pueden clasificar como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2*Clasificación de los cementos según el American Petroleum Institute (API)*

Clases de cemento	Especificaciones	Profundidad	Temperatura
Clase A	No se requieren propiedades especiales.	0 – 6000 ft	170,6 °F
Clase B	Tiene una resistencia moderada o alta a los sulfatos.	0 – 6000 ft	170,6 °F
Clase C	Alta resistencia a la compresión temprana y resistencia a los sulfatos.	0 – 6000 ft	170,6 °F
Clase D	Temperaturas y presiones moderadamente altas.	6000 – 10000 ft	230 °F
Clase E	Altas temperaturas y presiones.	10000 – 14000 ft	289,4 °F
Clase F	Temperaturas y presiones extremadamente altas.	10000 – 16000 ft	320 °F
Clase G	Cemento básico para pozos.	0 – 8000 ft	392 °F
Clase H	Cemento básico para pozos.	0 – 8000 ft	392 °F

Nota. Clases de cementos y sus propiedades que nos indican para que ambiente es adecuado cada uno. Bett, 2017.

4.1 Cementos geotérmicos

Los cementos geotérmicos suelen estar diseñados para tener una permeabilidad al agua inferior a 0,1 mD, una resistencia a la compresión de al menos 1015.26 psi (7 MPa) y deben tolerar las condiciones que se generan por el choque térmico que ocasiona considerables variaciones de temperatura que provocan un desprendimiento de la tubería de revestimiento (Pyatina, 2018). A continuación se mencionan algunos de los cementos utilizados en los pozos geotérmicos.

4.1.1 Cemento Portland.

El cemento Portland es elaborado a partir de la piedra caliza y la arcilla. Se deben mezclar cantidades muy precisas de estos dos materiales básicos con algunas adiciones para crear el clínker mediante el complejo piropcesamiento que consiste básicamente en someter los materiales a altas temperaturas hasta los 2642° F (1450°C) para producir cambios químicos y físicos (Nalobile et al., 2020). El clínker sale del horno en forma de gránulos grises el color de estos gránulos depende de la cantidad de hierro que contiene, después el clínker es almacenado temporalmente en una sala de homogeneización para después ser molido con sulfato de calcio, usualmente yeso, igualmente puede ser molido con anhidrita, hemihidrato, hemihidrato deshidratado y sulfato de calcio sintético, así finalmente se obtiene el cemento Portland (Aïtcin, 2016, p. 27-28).

4.1.1.1 Cemento Portland Clase G. En las cementaciones de los pozos, se utiliza comúnmente el cemento Portland clase G también conocido como cemento petrolero con una alta resistencia a los sulfatos de acuerdo con lo establecido en la norma API 10A, cuyos componentes al fraguar, desarrollan resistencia a la compresión como resultado de la hidratación y reacción química de los componentes con el agua (Cebreros et al., 2017, p. 7). La composición de estos cementos puede variar dependiendo su finalidad, por ejemplo el cemento clase G con resistencia moderada a los sulfatos especifica que el contenido de C_3S debe estar entre 48% y 58%, y que el

contenido de C_3A debe ser inferior al 8% y por otro lado, el cemento clase G con alta resistencia a los sulfatos especifica que el contenido de C_3S debe estar entre 48% y 65%, y que el contenido de C_3A debe ser inferior al 3% (Pang et al., 2022).

Existen otras alternativas usadas para la cementación que no son tan comunes y son abordadas a continuación (Bergen et al., 2022).

4.1.1.2 Cemento de Fosfato de Aluminato de Calcio. Los cementos de fosfato de calcio se forman mediante reacciones químicas entre el cemento de aluminato de calcio, las cenizas volantes de tipo F y el hexametáfosfato de sodio ($(NaPO_3)_6$). En comparación con el cemento Portland ordinario, los cementos de aluminato de calcio contienen una mayor cantidad de alúmina y una cantidad menor de sílice. Los cementos de aluminato de calcio se utilizan principalmente en ambientes de alta temperatura u otras aplicaciones que requieren una temprana resistencia a la compresión. El cemento de fosfato de calcio fue diseñado principalmente para su uso en entornos ligeramente ácidos ($pH \sim 5,0$) y ricos en CO_2 . Además de un rendimiento eficaz en este entorno específico, el cemento de fosfato de calcio también se diseñó para aumentar la aplicabilidad en el campo mediante la mejora de propiedades como la capacidad de bombeo, la densidad y la durabilidad de la unión (Bergen et al., 2022).

4.1.1.3 Cemento resistente al choque térmico. Es un sistema de cemento diseñado para soportar el choque térmico que se da debido a la inyección de agua. Está compuesto por dos reactivos: *i*) Cemento de aluminato de calcio. *ii*) Cenizas volantes clase F. También se compone por un activador alcalino que puede ser metasilicato de sodio (Pyatina & Sugama, 2014).

4.2 Efectos de la temperatura en el cemento

Cuando los cementos son expuestos a altas temperaturas tienden a sufrir ciertos cambios que pueden comprometer su integridad y por lo tanto también podría afectar la integridad del pozo, algunos de los efectos que pueden generarse en el cemento son mencionados a continuación.

4.2.1 Retroceso en la resistencia.

Cuando el cemento Portland es expuesto a temperaturas mayores a 230°F (110°C) se empieza a generar un fenómeno conocido como retroceso de la resistencia que puede definirse como un cambio en los productos de hidratación como por ejemplo en el gel amorfo C-S-H, lo que provoca una disminución en la resistencia y un aumento en la permeabilidad del cemento lo que compromete la integridad y el aislamiento del pozo. Es común considerar la adición de sílice para controlar y evitar este fenómeno (Zhu, 2019). Se recomienda utilizar cierta cantidad de sílice dependiendo de la temperatura a la que esté expuesto el cemento (Di Martino & Ruch, 2018), como se muestra en la tabla 3

Tabla 3

Cantidad de adición de sílice recomendada.

°C	93	121	149	177	204	232	260	288	316
°F	199,4	249,8	300,2	350,6	399,2	449,6	500	550,4	600,8
Sílice	0	35	35	35	40	50	60	60	70
(%bwoc)									

Nota. Cantidades de sílice en porcentaje que se adicionan al cemento (%bwoc) dependiendo de la temperatura. [Modificado]. Di Martino & Ruch, 2018.

4.2.2 Retracción del cemento.

La retracción del cemento se puede clasificar en dos tipos retracción química y volumétrica.

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

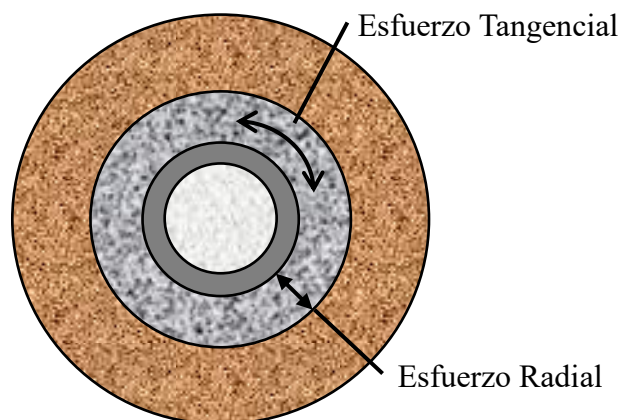
4.2.2.2 Retracción volumétrica. Es una reducción del volumen externo que ocurre durante la hidratación del cemento y su período más crítico es el tiempo posterior al fraguado, es una respuesta mecánica a las tensiones y a los cambios de presión intersticial generados por la retracción química (Sukhachev et al., 2022).

4.3 Tipos de falla en el cemento

En el cemento se pueden presentar diversos tipos de falla debido al ambiente al que se encuentra expuesto y por los esfuerzos a los que será sometido en el yacimiento como por ejemplo los esfuerzos radial y tangencial que son mostrados en la figura 1. A continuación se mencionan algunos tipos de fallamiento.

Figura 1.

Esfuerzos radial y tangencial



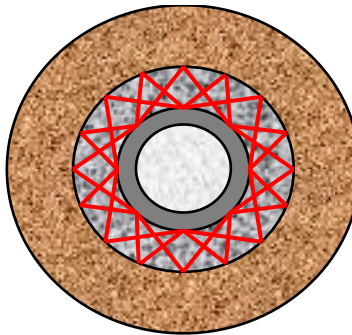
Nota. Esfuerzos radiales y tangenciales que se pueden presentar en el cemento. Tomado de *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation* (pp. 68-75), por A. Shadravan et al., 2015, SPE Drilling & Completion.

4.3.1 Falla por cizallamiento.

La causa principal de la falla por cizallamiento en el cemento ubicado en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación son los altos esfuerzos de compresión que exceden la resistencia a la compresión y esto deriva en el fracturamiento del cemento como se muestra en la figura 2. La falla por cizallamiento es típica cuando se presentan aumentos de temperatura y presión del pozo, cuando la formación es consolidada, tiene un módulo de Young alto o cuando el revestimiento del cemento se encuentra entre dos revestimientos (Al-Yami et al., 2022).

Figura 2

Falla por cizallamiento en el cemento



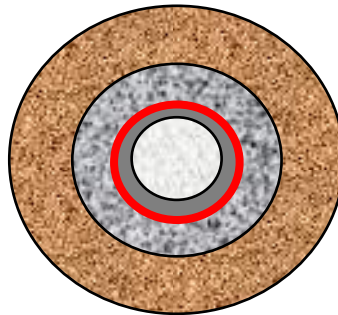
Nota. Fracturas que se generan debido a los esfuerzos de compresión que no pueden ser soportados por el cemento. Tomado de *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation* (pp. 68-75), por A. Shadravan et al., 2015, SPE Drilling & Completion.

4.3.2 Falla por desprendimiento interior.

Este tipo de falla se genera debido al aumento de la temperatura en la tubería de revestimiento que se expande ocasionando un esfuerzo de tensión en una dirección circunferencial dando lugar a fracturas radiales lo que provoca un desprendimiento de la interfaz revestimiento-cemento como se muestra en la figura 3 (Abdulsalaam et al., 2021).

Figura 3

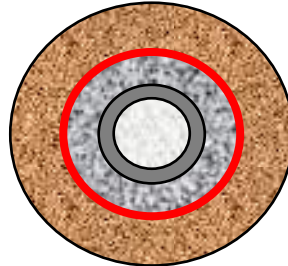
Falla por desprendimiento interior



Nota. Desprendimiento en la interfaz revestimiento-cemento que se genera debido a los esfuerzos de tensión. Tomado de *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation* (pp. 68-75), por A. Shadravan et al., 2015, SPE Drilling & Completion.

4.3.3 Falla por desprendimiento exterior.

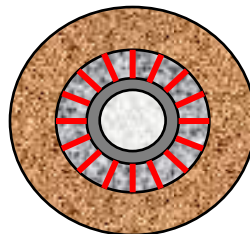
Cuando el esfuerzo de tensión supera a la resistencia de tensión que tiene el cemento en la interfaz cemento-formación se da un desprendimiento exterior mostrado en la figura 4 (Xu et al., 2018).

Figura 4*Falla por desprendimiento exterior*

Nota. Desprendimiento en la interfaz cemento-formación que se genera debido a los esfuerzos de tensión que superan a la resistencia a la tensión del cemento. Tomado de *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation* (pp. 68-75), por A. Shadravan et al., 2015, SPE Drilling & Completion.

4.3.4 Falla por fracturamiento radial.

Si el esfuerzo de tensión tangencial en el cemento sobrepasa su resistencia a la tensión se comenzará a formar una fractura que se propagará a lo largo de la dirección radial como se puede evidenciar en la figura 5 (Xu et al., 2018).

Figura 5*Falla por fracturamiento radial*

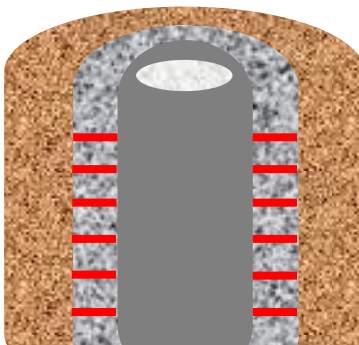
Nota. Fracturamiento radial que se da debido a esfuerzos tangenciales. Tomado de *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation* (pp. 68-75), por A. Shadravan et al., 2015, SPE Drilling & Completion.

4.3.5 Falla por diskings.

Cuando el esfuerzo de tensión axial en el cemento excede su resistencia a la tensión comenzara a formarse el diskings y a correr a través de la columna de cemento como se ilustra en la figura 6 (Xu et al., 2018).

Figura 6

Falla por diskings



Nota. Diskings que se da debido al esfuerzo de tensión en dirección axial. Tomado de *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation* (pp. 68-75), por A. Shadravan et al., 2015, SPE Drilling & Completion.

5. Geomecánica del cemento

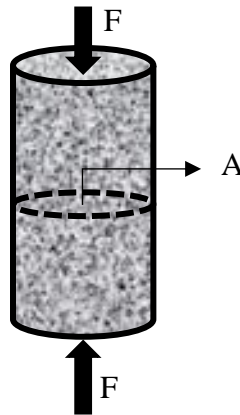
Es fundamental realizar el estudio de las propiedades geomecánicas del cemento para lograr predecir su resistencia a los diferentes esfuerzos a los que será sometido en el pozo. Para desarrollar el análisis geomecánico es necesario tener en cuenta propiedades como la resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson.

5.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es el máximo esfuerzo de compresión que un material sólido puede soportar bajo una carga aplicada gradualmente sin fracturarse, como se puede observar en la figura 7. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área de la sección transversal original de una muestra en una prueba de compresión (Rageh et al., 2017).

Figura 7

Prueba de resistencia a la compresión.



Nota. Esquema de la prueba de resistencia a la compresión. Tomada de: Effect of aging and curing mode on the compressive and indirect tensile strength of resin composite cements (pp. 13-14), por N. Rohr. & J. Fischer., 2017, Head & Face Medicine.

La resistencia a la compresión se puede calcular con la ecuación (I) que se muestra a continuación (Rageh et al., 2017).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{I})$$

Donde:

σ : Resistencia a la compresión [MPa].

F : Fuerza axial que se ejerce en las caras superior e inferior de la muestra [N].

A : Área transversal de la muestra [mm²].

5.2 Módulo de Young

El módulo de Young se define como la relación entre el esfuerzo axial y la deformación axial del cemento que puede expresarse con la ecuación (II) y describe que tanto se deforma el cemento a medida que aumenta el esfuerzo axial sobre él (Fernández et al., 2015).

$$E = \frac{\partial \sigma_{axial}}{\partial \varepsilon_{axial}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (\text{II})$$

Donde:

E : Módulo de Young [MPa].

$\partial \sigma_{axial}$: Esfuerzo axial [MPa].

$\partial \varepsilon_{axial}$: Deformación axial [adimensional].

ΔL : Cambio de la longitud [mm].

L : Longitud original [mm].

El módulo de Young se puede obtener tanto en principios estáticos como dinámicos. Las técnicas estáticas para la determinación de propiedades elásticas se basan generalmente en la medición de tensiones y deformaciones durante la carga mecánica (prueba de compresión, entre otras) y el módulo de elasticidad se determina a partir de la pendiente de la región lineal de la curva

tensión-deformación. Esta técnica tiene una gran desventaja ya que es destructiva y sólo se puede realizar en el laboratorio debido a los grandes equipos que se necesitan. Entre los métodos dinámicos, la prueba de impacto de frecuencia de resonancia y la prueba de pulso ultrasónico son populares debido a que son técnicas no destructivas, los equipos son portátiles y tienen un menor costo (Pavlík et al., 2019).

5.3 Relación de Poisson

La relación de Poisson se define como la relación entre la deformación radial y la deformación longitudinal del cemento que es sometido a un esfuerzo axial como se ilustra en la figura 8. A partir de esta definición se utiliza la ecuación (III) para determinar el coeficiente de Poisson.

$$\nu = \frac{\partial_{\epsilon_{radial}}}{\partial_{\epsilon_{longitudinal}}} = \frac{\Delta W/W}{\Delta L/L} \quad (III)$$

Donde:

ν : Relación de Poisson [adimensional].

$\partial_{\epsilon_{radial}}$: Deformación radial [adimensional].

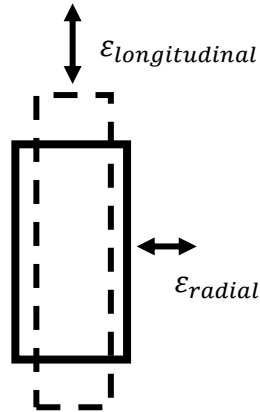
$\partial_{\epsilon_{longitudinal}}$: Deformación longitudinal [adimensional].

ΔW : Cambio de la longitud radial [mm].

W : Longitud radial original [mm].

Figura 8

Deformaciones radial (ϵ_{radial}) y longitudinal ($\epsilon_{longitudinal}$).



Nota. Deformaciones que puede llegar a sufrir la muestra de cemento. Modificada de: Fundamentals of Aerospace Composite Materials (pp. 25-65), por V. Giurgiutiu, 2016, Structural Health Monitoring of Aerospace Composites.

5.4 Adherencia

Las propiedades de unión del cemento al revestimiento o a la formación son importantes porque estos valores reflejan directamente la capacidad del cemento para evitar la comunicación entre estratos. Las resistencias de la unión al cizallamiento y a la tensión, son dos medidas que se pueden utilizar para evaluar las propiedades de unión en las interfaces (Liu et al., 2015).

5.4.1 Resistencia al cizallamiento.

Se define como la unión que soporta mecánicamente la tubería y se determina midiendo la fuerza requerida para iniciar el movimiento de la tubería en una cubierta de cemento. Cuando esta fuerza se divide por el área de la superficie de contacto entre el cemento y el revestimiento da

como resultado la resistencia de la unión al cizallamiento o corte (Liu et al., 2015), como se muestra en la ecuación (IV).

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (IV)$$

Donde:

F_c : Resistencia de la unión al cizallamiento [Pa].

F: Fuerza requerida para iniciar el desplazamiento a lo largo de la interfaz cemento-revestimiento o cemento-formación [N].

A: Área transversal [m²].

5.4.2 Resistencia a la tensión. Se puede definir de manera similar a la unión por cizallamiento, la diferencia es que el esfuerzo a lo largo de la interfaz está en tensión y no en corte. La resistencia de la unión a la tensión puede ser calculada como la relación entre la carga de fractura y el área adherida (Liu et al., 2015), como se muestra en la ecuación (V):

$$F_t = \frac{FL}{BA} \quad (V)$$

Donde:

F_t : Resistencia de la unión a la tensión [Pa].

FL: Carga de fractura [N].

BA: Área adherida [m²].

6. Estado del arte

Para el estado del arte se presentan los casos de estudio de mayor interés para el desarrollo de este proyecto, publicados recientemente.

Li et al., (2022) estudiaron la resistencia del cemento a altas temperaturas para pozos de petróleo modificado con harina de sílice. Las cantidades utilizadas del sílice varían entre el 40% y el 70% de BWOC, con un tamaño de partículas de 6 μm y 53 μm a una temperatura de exposición de 716°F, 932°F, 1022°F y 1202°F (380°C, 500°C, 550°C y 650°C). La investigación también presentó las propiedades físicas y mecánicas del cemento como la permeabilidad, la resistencia a la compresión, el módulo de Young y tensión-deformación, cada una de estas propiedades se revisaron antes y después de la exposición a las diferentes temperaturas. Los materiales utilizados fueron: *i)* Cemento clase G con 19.83 μm . *ii)* Harina de sílice con un tamaño de 6 μm y 53 μm . *iii)* Aditivos químicos como el agente de pérdida de fluido (BXF-200L) *iv)* Agente antiespumante (G603). Luego de la preparación de la muestra bajo la norma API 10B, realizaron las pruebas de permeabilidad del gas, resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y termogravimétrica. Una vez presentados y analizados los resultados concluyeron que cuando la temperatura cambia entre 716°F (380°C) y 1022°F (550°C) la resistencia a la compresión de la muestra con sílice permaneció estable, el módulo de Young se redujo y con una temperatura de 1202°F (650°C) las dos propiedades disminuyeron.

Pyatina y Sugama (2020) analizaron la recuperación de la resistencia, el sellado de grietas, el choque térmico y la resistencia a los ácidos de varios compuestos en agua, carbonato alcalino o salmuera geotérmica con una temperatura de 572°F (300°C). Los compuestos que se utilizaron fueron OPC/SiO₂ de alta temperatura, un cemento de aluminato de calcio con FAF activada con álcali (TSRC), escoria granulada de alto horno activada con álcali (GBFS/SiO₂) y una mezcla de

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

Wang et al., (2020) presentaron un nuevo compuesto de nano SiO₂-Basalto (NSBF) para la aplicación en ambientes geotérmicos, basados en un enfoque sistemático de análisis teórico, investigación experimental y análisis microscópico. El NSBF es una modificación del cemento clase G con aditivos como la ceniza volante, Nano SiO₂, fibra de basalto, agente de resistencia temprana (ZQ) y un agente reductor de agua (GB). Por medio de ensayos de laboratorio analizaron las propiedades físicas del NSBF (Fluidez, capacidad de bombeo, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión). Para medir el rendimiento a la alta temperatura del NSBF se efectuaron una serie de pruebas las cuales calcularon la fluidez y tiempo de fraguado, las propiedades reológicas, la resistencia a las altas temperaturas y su deformación a unas temperaturas de 212°F, 302°F y 392°F (100°C, 150°C y 200°C). Se concluyó que el NSBF bajo condiciones de altas temperaturas presentó una buena fluidez, tiempo de fraguado y una vez endurecido el cemento, una mejor

relación entre la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión entre el módulo de Young, demostrando una excelente resistencia.

Hazem et al., (2020) desarrollaron una investigación que tenía como objetivo tomar humo de sílice y ceniza volante que son dos aditivos que son comúnmente usados en operaciones de cementación de pozos geotérmicos y de alta temperatura, para determinar cuál presenta una mejor resistencia a la compresión. Elaboraron tres diseños con cemento clase G: *i)* El primero era un diseño base sin ningún tipo de aditivo. *ii)* El segundo diseño con un 5% en peso de cemento de humo de sílice. *iii)* El tercer y último diseño con una adición del 5% en peso de cemento de cenizas volantes. Cada diseño fue expuesto durante el proceso de curado a tres temperaturas 140°F, 212°F y 302°F (60°C, 100°C y 150°C) y tres presiones 2.9 psi; 14,5 psi y 69,62 psi (0,02 MPa; 0,1 MPa y 0,48 MPa). Determinaron la resistencia a la compresión para cada una de las muestras con las diferentes temperaturas empleadas y observaron que comparando el diseño base con los diseños en los que se implementaron los aditivos, se obtuvieron mejores valores de resistencia a la compresión en los diseños con aditivos, principalmente en el diseño con adición del 5% de cenizas volantes.

Mahmoud y Elkatatny (2019) observaron el comportamiento de dos diseños de lechadas, el primer diseño base sin ningún tipo de aditivo y el segundo con adición del 35% en peso de cemento de harina de sílice. Se expusieron los dos sistemas de cemento hasta una temperatura máxima de 302°F (150°C), después se realizaron pruebas para determinar propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson. A partir de los resultados se encontró que la lechada con adición de harina de sílice presenta mejores valores en sus propiedades mecánicas en comparación con la lechada base, y así concluyeron que la adición

de harina de sílice a un cemento Portland clase G, favorece el desarrollo adecuado de las propiedades mecánicas del cemento.

TerHeege et al., (2019) estudiaron los cambios en la mineralogía y las propiedades mecánicas del cemento API clase G, en el cual se usó un 40% de harina de sílice con tiempo de exposición de 1-4 semanas, a temperaturas de 140°F-788°F (60°C-420°C) y presiones de 290 psi-2175,6 psi (2MPa-15MPa). El análisis de la mineralogía se llevó a cabo mediante la difracción de rayos X y espectroscopia de dispersión de energía de rayos X. Las propiedades mecánicas como módulo de Young, resistencia a la fractura y resistencia residual se analizaron mediante experimentos triaxiales, las deformaciones axiales se midieron mediante un transformador diferencial variable lineal externo (LVTD), observando el desplazamiento de deformación. Como resultados del comportamiento mecánico dentro de la investigación se evidenció que el módulo de Young aumentó en las muestras en las cuales se curó a temperatura ambiente y a una temperatura de 248°F (120°C) por una semana. El módulo de Young disminuyó en las otras muestras expuestas a 482°F (250°C) por cuatro semanas y a 788°F (420°C) por dos semanas. La resistencia a la fractura y la resistencia residual en las muestras de cada temperatura incrementaron a medida que la presión aumentaba de a 290 psi a 2175,6 psi (2 MPa a 15 MPa), de esta manera se concluyó que en cada uno de los tiempos y temperaturas a la que se expusieron las muestras la deformación del cemento es una de las más frágiles a presiones bajas y también presentan una deformación dúctil a presiones altas.

Zhu (2019) presentó el diseño de un aditivo diferente llamado CemStal (estabilizador de la resistencia del cemento) el cual ayuda a mitigar el problema del retroceso de la resistencia del cemento a temperaturas ultra elevadas 610°F (320°C). Dentro del estudio también se realizó una comparación entre el CemStal y el sílice convencional. En las pruebas que se realizaron

(resistencia a la compresión, permeabilidad y SEM) en los dos compuestos se variaron las densidades de las lechadas: 1,35 SG (baja densidad), 1,88 SG (densidad normal) y 2,65 SG (alta densidad), a unas temperaturas de curado de 430°F (220°C) y 610°F (320°C) y un tiempo de curado de 2, 7, 14, 28, 49 y 98 días. Zhu realizó cuatro experimentos (A, B, C, D) en los cuales tenía diferentes diseños. Con el análisis y resultados de los datos se evidenció que el CemStal demostró una ventaja frente al retroceso de la resistencia en comparación con el sílice convencional, sin embargo durante las primeras horas de curado (48 horas) el sílice tuvo una mayor resistencia. También observó que el sílice en entornos de ultra temperatura no es adecuado para la integridad del pozo.

Di Martino y Ruch (2018) dentro del proyecto DESCRAMBLE, tenían el objetivo de desarrollar una lechada de cemento que fuera capaz de soportar las condiciones supercríticas del pozo Venelle – 2 en el campo Larderello, estas condiciones supercríticas se encontraban entre los 3000 y 3500 metros de profundidad, con temperaturas entre 536°F (280°C) y 752°F (400°C), para lograr esto se siguió la siguiente metodología: *i)* En la primera fase del proyecto, seleccionaron 3 diseños diferentes, dos con base de cemento Portland, cementos clase G con adición de sílice y otro cemento de fosfato de aluminato de calcio. *ii)* Realizaron las pruebas de laboratorio para estimar las propiedades mecánicas, difracción de rayos x, fluorescencia de rayos x, entre otras; para así determinar cuál de los tres diseños era el más adecuado para ser usado en el pozo Venelle – 2. *iii)* A partir de los resultados de las pruebas realizadas seleccionaron el diseño con cemento de fosfato de aluminato de calcio porque presentó mejores resultados y una mejor conservación de sus propiedades mecánicas. *iv)* Efectuaron una optimización de la lechada seleccionada, disminuyendo su gravedad específica, adicionando un retardador y un estabilizador no polimérico. *v)* Para la fase final, la lechada fue llevada a campo, teniendo en cuenta algunas limitaciones de

este tipo de cemento, como por ejemplo, que este cemento es incompatible con materiales con alto pH, por lo que se debió construir una nueva instalación para mezclar porque las instalaciones antiguas estaban contaminadas, debido a que en estas se mezclaban cementos Portland, que poseen un alto pH. El pozo Venelle – 2 se cementó exitosamente, poco tiempo después fue cerrado para realizar la evaluación del yacimiento y de la calidad del cemento, se logró observar que las propiedades mecánicas del cemento se conservaron dentro de los valores deseados con el paso del tiempo. Con esto finalmente se concluyó que es viable el uso del diseño de lechada de cemento de fosfato de aluminato de calcio, para pozos geotérmicos y también para pozos de petróleo y gas con condiciones HPHT, ya que conserva sus propiedades y su integridad ante la exposición a las condiciones supercríticas del yacimiento.

Pyatina et al., (2018) tenían como finalidad tomar tres diseños de lechadas y observar cual presentaba una mejor generación de propiedades de autocuración en el cemento, estas propiedades pueden ser generadas gracias a la implementación de materiales cementantes de reacción lenta como las zeolitas. Los investigadores encontraron en la literatura un cemento llamado FlexCem que fue desarrollado especialmente para pozos geotérmicos, este cemento está compuesto por cemento Portland ordinario, con una mezcla de yeso y una adición del 30% de zeolitas ferrierita naturales, seleccionaron el FlexCem como uno de los diseños para las pruebas experimentales. Los otros dos diseños fueron: *i)* Diseño con cemento clase G con adición de zeolitas naturales clinoptilolita. *ii)* OPC con adición del 30% en peso de cemento de harina de sílice. Para garantizar que las muestras se dañaran y así, poder observar posteriormente la autocuración de los diseños, se adicionaron a todas las muestras 5,7% de microfibras de carbono. Después de preparar las muestras y realizar un proceso de curado, determinaron con las mismas muestras dos veces la resistencia a la compresión y el módulo de Young, para observar el porcentaje de recuperación de

estas propiedades después de las fracturas y fisuras generadas en la primera prueba de resistencia. Se concluyó, a partir de los resultados obtenidos, que la lechada con un mejor porcentaje de recuperación tanto de la resistencia a la compresión como del módulo de Young fue la del diseño FlexCem.

De Sena Costa et al., (2017) presentaron cuatro diseños de lechadas con cemento clase G variando la cantidad del aditivo con un contenido de 0%, 30%, 35% y 40% de harina de sílice en peso de cemento. Las muestras fueron expuestas a temperaturas entre 100°F (38°C) y 572°F (300°C) durante 7 y 28 días para su curado. Se realizaron pruebas de compresión uniaxial para determinar la resistencia a la compresión de los diferentes diseños. Los resultados obtenidos mostraron que para las muestras que fueron curadas por 7 días y expuestas a 100°F (38°C) los valores de resistencia a la compresión son similares en los cuatro diseños con un promedio de 4351.13 psi (30 MPa). Por otro lado, las muestras que también fueron curadas por 7 días pero expuestas a una temperatura de 572°F (300°C) presentaron valores diferentes de resistencia y el diseño que presentó un mejor resultado con 4061.06 psi (28 MPa) fue el que tenía 35% de adición de harina de sílice. Los resultados para las muestras curadas por 28 días expuestas a 100°F (38°C) presentan valores semejantes con un promedio de 5076.32 psi (35 MPa) y las muestras que estuvieron expuestas a 572°F (300°C) exhibieron resultados diferentes, los diseños con adición de 35% y 40% de sílice mostraron mejores resultados con 3916.02 psi (27 MPa) y 4206.09 psi (29 MPa) respectivamente. Se concluyó a partir de los resultados obtenidos que para el curado de alta temperatura la lechada que más daño presentó fue la que no tenía adición de sílice y la que presentó valores más altos de resistencia fue la que se tuvo un proceso de curado por 28 días con adición de harina de sílice de 35% en peso de cemento.

Los diseños de cemento que presentaron mejores resultados ante la exposición a alta temperatura en los estudios realizados por los diferentes autores expuestos con anterioridad se presentan en la tabla 4, a continuación.

Tabla 4.

Diseños de cemento con mejores resultados en los casos de estudio.

Autores	Temperatura [°F, °C]	Resistencia a la compresión [Psi, MPa]	Módulo de Young [Psi, MPa]	Relación de Poisson
Li et al., 2022	1202, 650	2030.53; 14	304579.2; 2100	-
Pyatina & Sugama, 2020	572, 300	8513.7; 58.7	609158.5; 4200	-
Wang et al., 2020	392, 200	1450.38; 10	-	-
Hazem et al., 2020	302, 150	10442.7; 72	-	-
Mahmoud & Elkatatny, 2019	302, 150	6193.1; 42.7	3799988.7; 26200	0.2
TerHeege et al., 2019	788, 420	11617.5; 80.1	1377859; 9500	-
Zhu, 2019	610, 320	5670.9; 39.1	-	-
Di Martino & Ruch, 2018	1022, 550	5453.4; 37.6	1290836; 8900	0.18
Pyatina et al., 2018	572, 300	2596.2; 17.9	3393883.1; 23400	-
De Sena Costa et al., 2017	572, 300	4061.1; 28	-	-

Nota. Mejores resultados obtenidos por los autores en las pruebas de laboratorio ante una exposición de los sistemas de cemento a altas temperaturas. Fuente: Autoras.

7. Pruebas experimentales

Para determinar experimentalmente la resistencia a la compresión y la resistencia de la unión se tienen la norma NTC 673 de 2021 y la prueba de empuje respectivamente, estas pruebas son detalladas a continuación.

7.1 Prueba de resistencia a la compresión (Norma NTC 673 de 2021)

La Norma NTC 673 de 2021 es usada como método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muestras de cemento cilíndricas. En seguida se enumeran los pasos del procedimiento para llevar a cabo la prueba en el laboratorio.

1. Los ensayos de compresión de especímenes curados en ambiente húmedo deben ser realizados tan pronto como sea posible después de retirarlos del almacenamiento húmedo y se deben mantener húmedos durante el período entre su retiro del almacenamiento y el ensayo.
2. Se deben limpiar las caras de apoyo superior e inferior, espaciadores y del espécimen de ensayo.
3. Colocar el espécimen sobre el bloque de apoyo inferior y alinee cuidadosamente el eje del espécimen con el centro de empuje del bloque de apoyo superior, como se muestra en la figura 9.
4. Verificar que el indicador de carga esté en cero.
5. Aplicar la carga de forma continua y sin impacto.
6. Durante la aplicación de la primera mitad debe ser permitida una tasa de carga mayor y la tasa de carga mayor debe ser aplicada de manera controlada de modo tal que el espécimen no esté sometido a una carga de impacto.

7. Aplique la carga de compresión hasta que el indicador de la carga de la máquina muestre que la carga está decreciendo constantemente y el espécimen muestre un patrón de fractura.
8. Registrar la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo y anote el tipo de patrón de fractura.

Figura 9

Ensayo de resistencia a la compresión.



Nota. Muestra sometida a una prueba de resistencia a la compresión. Tomada de: Prueba técnica en ensayos de resistencia al concreto, por ACI Sección Noreste de México A.C.

7.2 Resistencia de la unión (Prueba de empuje)

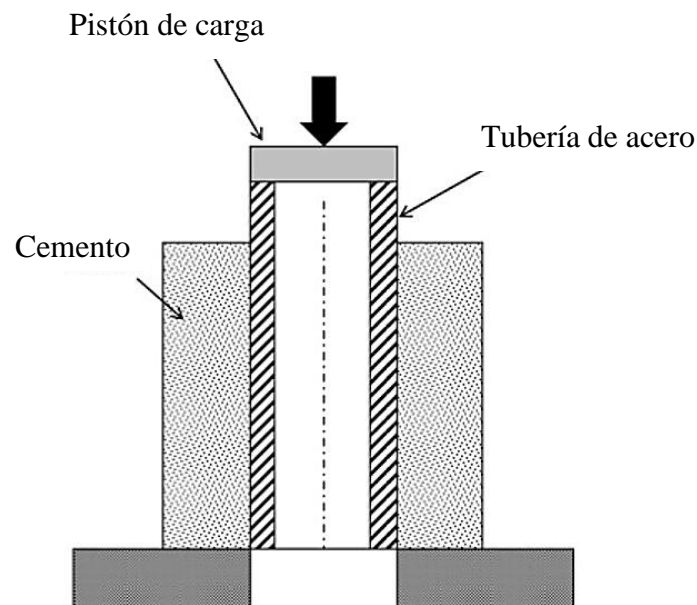
Una de las pruebas usadas para estimar la resistencia de la unión en el laboratorio es la prueba de empuje, que ayuda a determinar la resistencia a los esfuerzos de corte o cizallamiento de la unión entre el cemento y el casing o entre el cemento y la formación. Para este proyecto en específico se desarrolla la prueba de empuje para estimar la resistencia al corte del cemento con respecto al casing.

Para esta prueba se construye un esquema que consiste en una celda compuesta por un tubo de acero que representa el casing y el cemento estaría presente alrededor como se puede observar en la figura 10, el tubo de acero se puede cambiar por un cilindro de roca en el caso que se quiera determinar la resistencia de la unión con respecto a la formación. La resistencia al corte suele estar en el rango de 0.1 MPa – 1 MPa (Lavrov et al., 2019).

La metodología para el desarrollo de esta prueba consiste en: *i*) Construir la celda dependiendo del objetivo que se tenga con la prueba. *ii*) Se ejerce una carga sobre el tubo de acero como se puede ver en la figura. *iii*) Se mantiene la fuerza de empuje hasta que se da el rompimiento de la unión de la interfaz cemento-casing. *iv*) Finalmente para cuantificar la resistencia de la unión al corte se toma la ecuación (IV) presentada en el capítulo 5.

Figura 10.

Prueba de empuje.



Nota. Celda en la que se realiza una prueba de empuje para determinar la resistencia de la unión entre el cemento y el casing. Modificada de: Push-out test: Why bother?, (pp. 297-302), por A. Lavrov et al., 2019, Journal of Petroleum Science and Engineering.

8. Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento

Se aplicaron los procedimientos que fueron descritos previamente para la norma NTC 673 de 2021 y la prueba de empuje, con el objetivo de determinar la resistencia a la compresión y la resistencia de la unión del cemento con respecto al casing. Se realiza una variación en la temperatura de las muestras para determinar el efecto de la temperatura.

8.1 Materiales y equipos

Para la elaboración de las muestras se emplearon los siguientes materiales: el cemento clase G (figura 11), harina de sílice (figura 12) y agua (figura 13). Los equipos empleados fueron: la balanza (figura 14), la mezcladora (figura 15), las celdas (figura 16), el horno (figura 17), la prensa hidráulica (figura 18) y las celdas cilíndricas (figura 19).

Figura 11.

Cemento Clase G.



Nota. Cemento clase G utilizado para la elaboración de las muestras. Fuente: Autoras.

Figura 12.

Harina de sílice.



Nota. Harina de sílice utilizada para la elaboración de las muestras. Fuente: Autoras.

Figura 13.

Agua.



Nota. Agua utilizada para la elaboración de las muestras. Fuente: Autoras.

Figura 14.

Balanza.



Nota. Balanza utilizada para el pesaje de los materiales. Fuente: Autoras.

Figura 15.

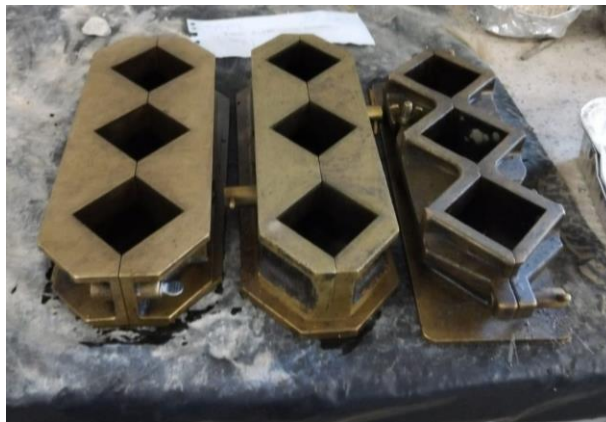
Mezcladora



Nota. Mezcladora usada para el mezclado de los materiales. Fuente: Autoras.

Figura 16.

Celdas.



Nota. Celdas usadas para el fraguado de las muestras. Fuente: Autoras.

Figura 17.

Horno.



Nota. Horno con muestras de los tres diseños (S0%, S35% y S40%) listas para la exposición a 200°C. Fuente: Autoras.

Figura 18.

Prensa hidráulica.



Nota. Prensa hidráulica usada para el desarrollo de las pruebas de resistencia a la compresión y empuje. Fuente: Autoras.

Figura 19.*Celdas cilíndricas.*

Nota. Celdas cilíndricas usadas para la prueba de empuje. Fuente: Autoras.

8.2 Prueba de resistencia a la compresión uniaxial

Para la prueba de resistencia a la compresión uniaxial se utilizaron moldes cúbicos con medidas de 5x5 cm. Se prepararon 10 muestras con un contenido de sílice del 40% (S40%), 10 variando el contenido de sílice al 35% (S35%) y 10 sin aditivo (S0%) tomándola como muestra base.

En la tabla 5 se muestran los diseños presentados en el artículo de De Sena Costa et al., (2017) que fue considerado en el estado del arte, estos son tomados como referencia para la elaboración de las muestras.

Tabla 5.*Diseños de lechadas del último caso de estudio.*

Diseños de lechadas	Agua [ft³, ml]	Cemento Portland [lb, g]	Sílice [lb, g]
S0%	0.01; 354,28	1.7; 767,27	0; 0
S35%	0.01; 337,42	1.3; 580,83	0.45; 203,29
S40%	0.01; 335,66	1.2; 561,35	0.49; 224,54

Nota. Diseños considerados como referencia para la elaboración de las muestras. [Modificado].

De Sena Costa et al., 2017.

8.2.1 Cálculos de las cantidades de materiales necesarios.

En esta primera etapa se realizaron los cálculos de las cantidades necesarias para la elaboración de las muestras tomando como base el volumen de los moldes que se determina con la ecuación (VI)

$$V = x^3 \quad (VI)$$

Donde:

V: Volumen de los moldes [cm^3]

x: Longitud del lado del cubo [cm]

Reemplazando la x por la longitud del lado del cubo, se obtiene el volumen de la muestra.

$$V = 5^3 = 125 \text{ cm}^3 = 0.004 \text{ ft}^3$$

Considerando la pérdida de material se asume un volumen con 10 cm^3 adicionales, es decir, que el volumen considerado para los cálculos de las cantidades de materiales es de 135 cm^3 y se determina una relación porcentual (x%) con la ecuación (VII).

$$x\% = \frac{10 \text{ cm}^3 * 100\%}{125 \text{ cm}^3} \quad (VII)$$

$$x\% = 8\%$$

Se calculan los volúmenes del cemento y de la harina de sílice con la ecuación (VIII) teniendo en cuenta las cantidades usadas en el quinto caso de estudio y que son presentadas en la tabla 8

$$V_{material} = \frac{M [g]}{\rho [g/cm^3]} \quad (VIII)$$

Donde:

$V_{material}$: Volumen del material [cm^3]

M : Masa [g]

ρ : Densidad del material [g/cm^3]

Con la información anterior se calculan los volúmenes del cemento, de la harina de sílice y agua, además se tiene en cuenta que la densidad del cemento es de $3,15 [g/cm^3]$ y la del sílice es de $2,65 [g/cm^3]$.

- S40%

$$V_{cemento} = \frac{561,35 [g]}{3,15 [g/cm^3]} = 178,21 [cm^3] = 0.006 [ft^3]$$

$$V_{silice} = \frac{224,54 [g]}{2,65 [g/cm^3]} = 84,73 [cm^3] = 0.003 [ft^3]$$

$$V_{H_2O} = 335,66 [ml] = 335,66 [cm^3] = 0.012 [ft^3]$$

Se calcula el volumen total para las muestras S40%

$$V_{S40\%} = 178,21 [cm^3] + 84,73 [cm^3] + 335,66 [cm^3] = 598,6 [cm^3] = 0.021 [ft^3]$$

- S35%

$$V_{cemento} = \frac{580,83 [g]}{3,15 [g/cm^3]} = 184,39 [cm^3] = 0.006 [ft^3]$$

$$V_{silice} = \frac{203,29 [g]}{2,65 [g/cm^3]} = 76,71 [cm^3] = 0.003 [ft^3]$$

$$V_{H_2O} = 337,42 [ml] = 337,42 [cm^3] = 0.012 [ft^3]$$

Se calcula el volumen total para las lechadas S35%

$$V_{S40\%} = 184,39 [cm^3] + 76,71 [cm^3] + 337,42 [cm^3] = 598,52 [cm^3] = 0.021 [ft^3]$$

- S0%

$$V_{\text{cemento}} = \frac{767,27 \text{ [g]}}{3,15 \text{ [g/cm}^3\text{]}} = 178,21 \text{ [cm}^3\text{]} = 0.006 \text{ [ft}^3\text{]}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 334,28 \text{ [ml]} = 335,66 \text{ [cm}^3\text{]} = 0.013 \text{ [ft}^3\text{]}$$

Se calcula el volumen total para los diseños sin adición

$$V_{0\%} = 243,58 \text{ [cm}^3\text{]} + 354,28 \text{ [cm}^3\text{]} = 597,86 \text{ [cm}^3\text{]} = 0.021 \text{ [ft}^3\text{]}$$

Después se determina la relación porcentual X de los materiales usados para cada diseño como se muestra en la ecuación (IX)

$$X_{\text{material}} = \frac{V_{\text{material}} * 100\%}{V_{\text{total}}} \quad (\text{IX})$$

- S40%

$$X_{\text{cemento}} = \frac{178.21 * 100\%}{598.6}$$

$$X_{\text{cemento}} = 29.77\%$$

$$X_{\text{silice}} = \frac{84.73 * 100\%}{598.6}$$

$$X_{\text{silice}} = 14.16\%$$

$$X_{\text{agua}} = 100\% - (29.77\% + 14.16\%)$$

$$X_{\text{agua}} = 56.07\%$$

- S35%

$$X_{\text{cemento}} = \frac{184.39 * 100\%}{598.52}$$

$$X_{\text{cemento}} = 30.81\%$$

$$X_{\text{silice}} = \frac{76.71 * 100\%}{598.52}$$

$$X_{\text{silice}} = 12.82\%$$

$$X_{\text{agua}} = 100\% - (30.81\% + 12.82\%)$$

$$X_{\text{agua}} = 56.37\%$$

- S0%

$$X_{\text{cemento}} = \frac{243.58 * 100\%}{597.86}$$

$$X_{\text{cemento}} = 40.74\%$$

$$X_{\text{agua}} = 100\% - 40.74\%$$

$$X_{\text{agua}} = 59.26\%$$

Con las cantidades porcentuales para cada material se determina el volumen para cada diseño con la ecuación (X)

$$V_{\text{material}} = V * X \quad (X)$$

- S40%

$$V_{\text{cemento}} = 135 \text{ cm}^3 * 29.77\%$$

$$V_{\text{cemento}} = 40.19 [\text{cm}^3] = 0.001 [\text{ft}^3]$$

$$V_{sílice} = 135 \text{ cm}^3 * 14.16\%$$

$$V_{sílice} = 19.12 [\text{cm}^3] = 0.0007 [\text{ft}^3]$$

$$V_{agua} = 135 \text{ cm}^3 * 56.07\%$$

$$V_{agua} = 75.69 [\text{cm}^3] = 0.003 [\text{ft}^3]$$

- S35%

$$V_{cemento} = 135 \text{ cm}^3 * 30.81\%$$

$$V_{cemento} = 38.51 [\text{cm}^3] = 0.001 [\text{ft}^3]$$

$$V_{sílice} = 135 \text{ cm}^3 * 12.82\%$$

$$V_{sílice} = 17.31 [\text{cm}^3] = 0.0006 [\text{ft}^3]$$

$$V_{agua} = 135 \text{ cm}^3 * 56.37\%$$

$$V_{agua} = 76.10 [\text{cm}^3] = 0.003 [\text{ft}^3]$$

- S0%

$$V_{cemento} = 135 \text{ cm}^3 * 40.74\%$$

$$V_{cemento} = 54.99 [\text{cm}^3] = 0.002 [\text{ft}^3]$$

$$V_{agua} = 135 \text{ cm}^3 * 56.26\%$$

$$V_{agua} = 75.95 [\text{cm}^3] = 0.003 [\text{ft}^3]$$

Se determina la masa de cada material con la ecuación (XI).

$$M_{material} = V_{material} * \rho_{material} \tag{XI}$$

- S40%

$$M_{cemento} = 40.19 \text{ cm}^3 * 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{cemento} = 126.60 [\text{g}] = 0.28 [\text{lbs}]$$

$$M_{silice} = 19.12 \text{ cm}^3 * 2.65 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{silice} = 50.67 \text{ [g]} = 0.11 \text{ [lbs]}$$

$$M_{agua} = 75.69 \text{ cm}^3 = 0.003 \text{ [ft}^3\text{]}$$

$$M_{agua} = 75.69 \text{ [ml]}$$

- S35%

$$M_{cemento} = 38.51 \text{ cm}^3 * 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{cemento} = 121.31 \text{ [g]} = 0.27 \text{ [lbs]}$$

$$M_{silice} = 17.31 \text{ cm}^3 * 2.65 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{silice} = 45.87 \text{ [g]} = 0.10 \text{ [lbs]}$$

$$M_{agua} = 76.10 \text{ cm}^3 = 0.003 \text{ [ft}^3\text{]}$$

$$M_{agua} = 76.10 \text{ [ml]}$$

- S0%

$$M_{cemento} = 54.99 \text{ cm}^3 * 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{cemento} = 173.22 \text{ [g]} = 0.38 \text{ [lbs]}$$

$$M_{agua} = 75.95 \text{ cm}^3 = 0.003 \text{ [ft}^3\text{]}$$

$$M_{agua} = 75.95 \text{ [ml]}$$

Los resultados obtenidos anteriormente se presentan en la tabla 9, estos son los diseños considerados para la preparación de las lechadas usadas para el desarrollo de las pruebas experimentales.

Tabla 6.*Diseños de las lechadas.*

Diseño	Cantidad de Cemento [lb, g]	Cantidad de Harina de Sílice [lb, g]	Cantidad de Agua [ft^3 , ml]
Cemento Clase G + Sílice en 40% BWOC + Agua	0.28; 126.60	0.112; 50.67	0.003; 75.69
Cemento Clase G + Sílice en 35% BWOC + Agua	0.27; 121.31	0.101; 45.87	0.003; 76.10
Cemento Clase G + Agua	0.38; 173.22	0	0.003; 75.95

Nota. Cantidades de materiales necesarios para la elaboración de cada diseño. Fuente: Autoras.

8.2.2 Preparación de las lechadas.

Una vez definidas las cantidades requeridas de cada material, se prepararon las muestras empleando cemento clase G (figura 11), harina de sílice (figura 12) y agua (figura 13). Estos materiales también fueron empleados para preparar las muestras sometidas a la prueba experimental de empuje.

El pesaje de los materiales se realizó con la balanza (figura 14), tal como se muestra para el diseño S40% en las figuras 20 y 21.

Figura 20.

Pesaje del cemento clase G en la balanza.



Nota. Pesaje del cemento clase G usado para la elaboración de las muestras S40%. Fuente: Autoras.

Figura 21.

Pesaje de la harina de sílice en la balanza.



Nota. Pesaje de la harina de sílice usada para la elaboración de las muestras S40%. Fuente: Autoras.

Después de pesar las cantidades requeridas de cada material, se preparan las lechadas, utilizando la mezcladora (figura 15). La mezcla de la lechada S40% se muestra en la figura 22.

Figura 22.

Lechada S40%.



Nota. Lechada del diseño S40%. Fuente: Autoras.

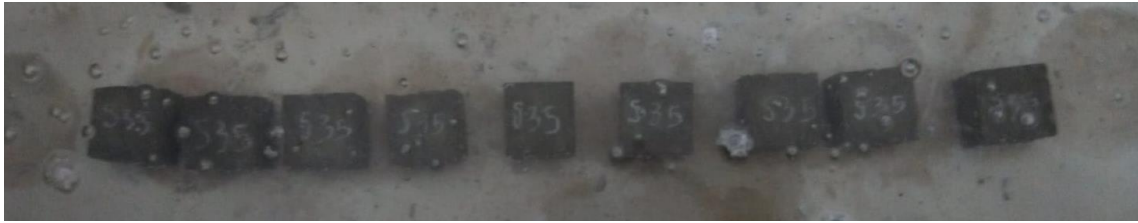
Se vierte la lechada obtenida en las celdas (figura 16) para el proceso de fraguado de las muestras que tiene una duración de 24 horas. Después de las 24 horas se sigue con el proceso de curado que es detallado a continuación.

8.2.3 Curado de las muestras.

El curado de las muestras para la prueba de resistencia a la compresión es de 3 días para las muestras cúbicas. Se tiene en cuenta que cuando el tiempo de curado es menor o igual a tres días se tienen valores de resistencia a la compresión que son prácticamente iguales a cuando se tienen muestras cilíndricas (Rincón et al., 2022). El proceso de curado se desarrolla en una cámara húmeda donde las muestras se sumergen en agua como se observa en la figura 23.

Figura 23.

Curado de las muestras S35%.



Nota. Muestras del diseño S35% en el proceso de curado en la cámara húmeda. Fuente: Autoras.

Cuando se cumplen los 3 días de curado las muestras son retiradas de la cámara húmeda y llevadas al horno.

8.2.4 Exposición a alta temperatura de las muestras.

Las muestras son llevadas al horno, en este se acomodan como se observa en la figura 24 y se exponen a una temperatura constante de 200°C durante 24 horas.

Figura 24.

Muestras S40% en el horno.



Nota. Muestras del diseño S40% acomodadas en el horno para la exposición a 200°C. Fuente: Autoras.

8.2.5 Desarrollo de la prueba de resistencia a la compresión.

Se desarrolla la prueba de resistencia a la compresión. La metodología en términos generales tomando como punto de partida la Norma NTC 673 de 2021 consiste en llevar a las muestras al equipo de compresión que para este caso es una prensa hidráulica (figura 18).

Se expone la muestra a una fuerza uniaxial como se observa en la figura 25 hasta que se genera su fracturamiento y en ese momento que es también conocido como punto de fractura se toma el valor arrojado por la prensa que corresponde al valor de la resistencia a la compresión.

Figura 25.

Prueba de resistencia a la compresión muestra S40%.



Nota. Ejecución de la prueba de resistencia a la compresión en la prensa a una muestra del diseño S40%. Fuente: Autoras.

8.2.6 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.

Los resultados que se obtuvieron de la prensa fueron valores de resistencia a la compresión mostrados para los diseños S40% (tabla 7), S35% (tabla 8) y S0% (tabla 9) que fueron expuestos a 200°C, además se calcula el módulo de Young con la ecuación (II), relación de Poisson con la ecuación (III) y la fuerza con la ecuación (XII) considerando que el área de las muestras es de 25 cm².

$$F = \sigma * A \quad (\text{XII})$$

Tabla 7.

Resultados de resistencia a la compresión diseño S40%

Muestra	Peso [g]	ΔL [mm]	L =W [mm]	ΔW [mm]	Resistencia a	Fuerza [N]	E [Psi, MPa]	ν
					la compresión [Psi, MPa]			
S40% - 1	181	33	50	29	3132.8; 21.6	54000	4747.08; 32.73	0.88
S40% - 2	186	30	50	8	2770.2; 19.1	47750	4616.55; 31.83	0.27
S40% - 3	186	35	50	13	3335.87; 23.0	57500	4765.94; 32.86	0.37
S40% - 4	192	42	50	31	3799.9; 26.2	65500	4523.73; 31.19	0.74
S40% - 5	180	41	50	9	2422.1; 16.7	41750	2954.42; 20.37	0.22
Promedio					3092.2; 21.32	53300	4322.12; 29.80	0.50

Nota. Resultados obtenidos en laboratorio y los cálculos realizados a partir de estos para las muestras del diseño S40%. Fuente: Autoras.

A continuación, se detalla el procedimiento de cómo se hallaron los resultados del área de las muestras, la fuerza, el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν) para la muestra S40%-

1.

$$A = 50 * 50 = 2500 [mm^2]$$

- Fuerza S40%-1

$$F_{S40\% - 1} = 21.6 [MPa] * 2500 [mm^2]$$

$$F_{S40\% - 1} = 54000 [N]$$

- Módulo de Young S40%-1

$$E = \frac{\partial \sigma_{axial}}{\partial \varepsilon_{axial}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$$E_{S40\% - 1} = \frac{54000[N]/2500[mm^2]}{33[mm]/50[mm]}$$

$$E_{S40\% - 1} = 32.73 [MPa]$$

- Relación de Poisson S40%-1

$$\nu_{S40\% - 1} = \frac{\Delta W/W}{\Delta L/L}$$

$$\nu_{S40\% - 1} = \frac{29[mm]/50[mm]}{33[mm]/50[mm]}$$

$$\nu_{S40\% - 1} = 0.88$$

Tabla 8.*Resultados de resistencia a la compresión diseño S35%*

Muestra	Peso [g]	ΔL [mm]	L =W [mm]	ΔW [mm]	Resistencia a la	Fuerza [N]	E [Psi, MPa]	ν
					compresión [Psi, MPa]			
S35% - 1	194	17	50	24	3248.8; 22.4	56000	9555.09; 65.88	1.41
S35% - 2	184	40	50	30	2436.6; 16.8	42000	3045.79; 21	0.75
S35% - 3	186	37	50	38	1987.0; 13.7	34250	2684.65; 18.51	1.02
S35% - 4	181	20	50	37	2407.6; 16.6	41500	6019.07; 41.5	1.85
S35% - 5	187	31	50	14	3016.8; 20.8	52000	48866.02; 33.55	0.45
Promedio					2619.38; 18.06	45150	5234.41; 36.09	1.10

Nota. Resultados obtenidos en laboratorio y los cálculos realizados a partir de estos para las muestras del diseño S35%. Fuente: Autoras.

- Fuerza S35%-1

$$F_{S35\% - 1} = 22.4 [MPa] * 2500 [mm^2]$$

$$F_{S35\% - 1} = 56000 [N]$$

- Módulo de Young S35%-1

$$E_{S35\% - 1} = \frac{56000[N]/2500[mm^2]}{17[mm]/50[mm]}$$

$$E_{S35\% - 1} = 65.88 [MPa]$$

- Relación de Poisson S35%-1

$$\nu_{S35\% - 1} = \frac{24[mm]/50[mm]}{17[mm]/50[mm]}$$

$$\nu_{S35\% - 1} = 1.41$$

Tabla 9.
Resultados de resistencia a la compresión diseño S0%

Muestra	Peso [g]	ΔL [mm]	L =W [mm]	ΔW [mm]	Resistencia a la	Fuerza [N]	E [Psi, MPa]	ν
					compresión [Psi, MPa]			
S0% - 1	203	36	50	5	2741.2; 18.9	47250	3807.24; 26.25	0.14
S0% - 2	190	16	50	8	2074.0; 14.3	35750	6481.74; 44.69	0.24
S0% - 3	195	39	50	25	3190.8; 22.0	55000	4090.06; 28.20	0.64
S0% - 4	187	37	50	16	2668.7; 18.4	46000	3605.64; 24.86	0.43
S0% - 5	201	33	50	24	3118.3; 21.5	53750	4725.33; 32.58	0.73
Promedio					2758.62; 19.02	47550	4542.58; 31.32	0.44

Nota. Resultados obtenidos en laboratorio y los cálculos realizados a partir de estos para las muestras del diseño S0%. Fuente: Autoras.

- Fuerza S0%-1

$$F_{S0\% - 1} = 18.9 [MPa] * 2500 [mm^2]$$

$$F_{S0\% - 1} = 47250 [N]$$

- Módulo de Young S0%-1

$$E_{S0\% - 1} = \frac{47250[N]/2500[mm^2]}{36[mm]/50[mm]}$$

$$E_{S0\% - 1} = 26.25 [MPa]$$

- Relación de Poisson S0%-1

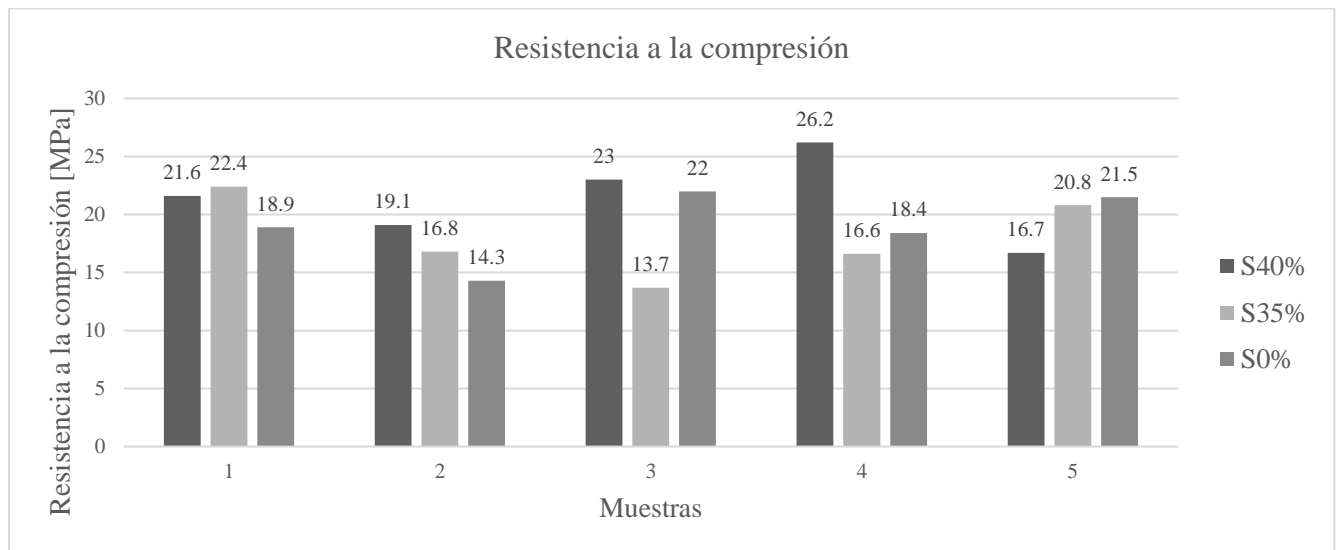
$$\nu_{S0\% - 1} = \frac{5[mm]/50[mm]}{36[mm]/50[mm]}$$

$$\nu_{S0\% - 1} = 0.14$$

Se grafica la resistencia a la compresión (figura 26), módulo de Young (figura 27) y relación de Poisson (figura 28) de las 5 muestras de cada diseño de cemento.

Figura 26.

Gráfica de Resistencia a la compresión $T=200^{\circ}\text{C}$.



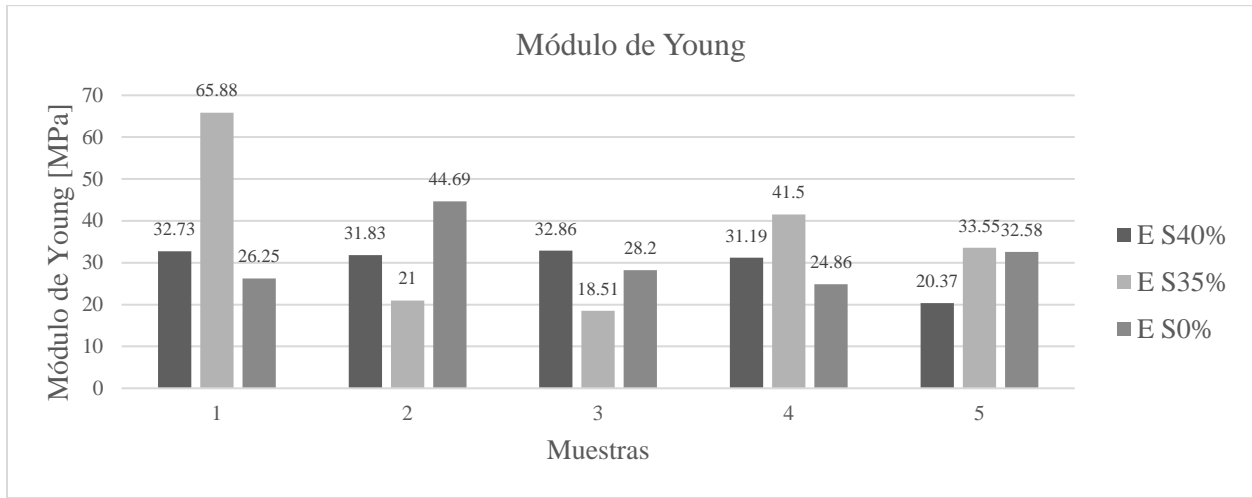
Nota. Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para determinar la resistencia a la compresión de las 5 muestras de cada diseño. Fuente: Autoras.

En la gráfica de la figura 26 se observa que la muestra con una mayor resistencia a la compresión fue la muestra 4 con adición del 40% de sílice con un valor de 26.2 MPa y la que presentó la menor resistencia fue la muestra 3 del diseño S35% con un resultado de resistencia de 13.7 MPa.

La gráfica de la figura 27 del módulo de Young muestra que el mejor resultado fue el de la muestra 1 del diseño S35% y en la gráfica para la relación de Poisson de la figura 28 se observa que la muestra 1 de S0% presentó el resultado más bajo.

Figura 27.

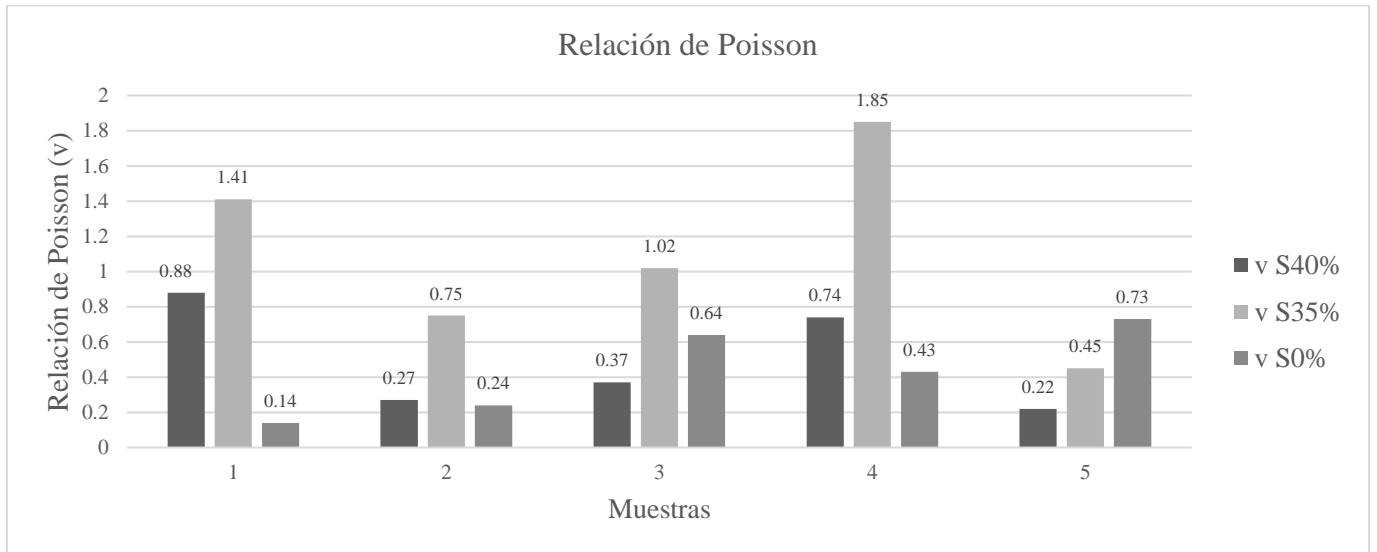
Gráfica del Módulo de Young $T=200^{\circ}\text{C}$.



Nota. Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para determinar el módulo de Young de las 5 muestras de cada diseño. Fuente: Autoras.

Figura 28.

Gráfica de la relación de Poisson $T=200^{\circ}\text{C}$.



Nota. Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para determinar la relación de Poisson de las 5 muestras de cada diseño. Fuente: Autoras.

Adicionalmente, se realizaron pruebas a muestras que estaban a temperatura ambiente (23°C), a continuación, se presentan los resultados obtenidos para los diseños S40% (tabla 10), S35% (tabla 11) y S0% (tabla 12). Se grafican los resultados para la resistencia a la compresión (figura 29), módulo de Young (figura 30) y relación de Poisson (figura 31).

Tabla 10.

Resultados de resistencia a la compresión diseño S40% a temperatura ambiente.

Muestra	Peso [g]	ΔL [mm]	L = W [mm]	ΔW [mm]	Resistencia a	Fuerza [N]	E [Psi, MPa]	ν
					la compresión [Psi, MPa]			
S40% - 1B	212	17	50	21	3060.3; 21.1	52800	9008.29; 62.11	0.64
S40% - 2B	192	20	50	41	3074.8; 21.2	50400	7309.90; 50.4	0.31
S40% - 3B	209	14	50	34	3219.8; 22.2	55600	11520.35; 79.43	0.37
S40% - 4B	208	8	50	19	3248.8; 22.4	56100	20341.54; 140.25	0.21
S40% - 5B	207	7	50	40	3437.4; 23.7	59200	24531.68; 169.14	0.23
Promedio					3208.23; 22.12	54820	14542.93; 100.27	0.35

Nota. Resultados obtenidos en laboratorio y los cálculos realizados a partir de estos para las muestras del diseño S40% que no fueron expuestas en el horno. Fuente: Autoras.

A continuación, se detalla el procedimiento de cómo se hallaron los resultados de la fuerza, el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν) para la muestra S40%-1B.

- Fuerza S40%-1B

$$F_{S40\% - 1B} = 21.1 [MPa] * 2500 [mm^2]$$

$$F_{S40\% - 1B} = 52800 [N]$$

- Módulo de Young S40%-1B

$$E_{S40\% - 1B} = \frac{52800[N]/2500[mm^2]}{17[mm]/50[mm]}$$

$$E_{S40\% - 1B} = 62.11 \text{ [MPa]}$$

- Relación de Poisson S40%-1B

$$\nu_{S40\% - 1B} = \frac{21[mm]/50[mm]}{17[mm]/50[mm]}$$

$$\nu_{S40\% - 1B} = 0.64$$

Tabla 11.

Resultados de resistencia a la compresión diseño S35% a temperatura ambiente.

Muestra	Peso [g]	ΔL [mm]	L =W [mm]	ΔW [mm]	Resistencia a	Fuerza [N]	E [Psi, MPa]	ν
					la compresión [Psi, MPa]			
S35% - 1B	197	31	50	26	2059.5; 14.2	35500	3321.36; 22.90	0.98
S35% - 2B	196	10	50	26	2291.6; 15.8	39500	11458; 79	0.64
S35% - 3B	200	13	50	10	2813.7; 19.4	48600	10844.47; 74.77	0.61
S35% - 4B	262	30	50	14	2480.1; 17.1	42700	4129.22; 28.47	1.22
S35% - 5B	198	19	50	34	2842.7; 19.6	49000	7481.05; 51.58	0.57
Promedio					2497.55; 17.22	43060	7446.24; 51.34	0.80

Nota. Resultados obtenidos para las muestras del diseño S35% que no fueron expuestas en el horno. Fuente: Autoras.

- Fuerza S35%-1B

$$F_{S35\% - 1B} = 14.2 \text{ [MPa]} * 2500 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$F_{S35\% - 1B} = 35500 [N]$$

- Módulo de Young S35%-1B

$$E_{S35\% - 1B} = \frac{35500[N]/2500[mm^2]}{31[mm]/50[mm]}$$

$$E_{S35\% - 1B} = 22.9 [MPa]$$

- Relación de Poisson S35%-1B

$$\nu_{S35\% - 1B} = \frac{26[mm]/50[mm]}{31[mm]/50[mm]}$$

$$\nu_{S35\% - 1B} = 0.98$$

Tabla 12.

Resultados de resistencia a la compresión diseño S0% a temperatura ambiente.

Muestra	Peso [g]	ΔL [mm]	L =W [mm]	ΔW [mm]	Resistencia a la compresión [Psi, MPa]	Fuerza [N]	E [Psi, MPa]	ν
S0% - 1B	191	15	50	44	2857.2; 19.7	49300	9533.33; 65.73	0.32
S0% - 2B	105	33	50	40	2045.0; 14.1	35200	3093.65; 21.33	0.20
S0% - 3B	208	8	50	25	2773.1; 19.12	47800	17332.01; 119.5	0.25
S0% - 4B	202	12	50	32	3277.8; 22.6	56400	13633.5; 94	0.19
S0% - 5B	193	15	50	26	3063.2; 21.12	52800	10210.66; 70.4	0.36
Promedio					2805.03; 19.34	48300	10760.35; 74.19	0.26

Nota. Resultados obtenidos en laboratorio y los cálculos realizados a partir de estos para las muestras del diseño S0% que no fueron expuestas en el horno. Fuente: Autoras.

- Fuerza S0%-1B

$$F_{S0\% - 1B} = 19.7 [MPa] * 2500 [mm^2]$$

$$F_{S0\% - 1} = 49300 [N]$$

- Módulo de Young S0%-1B

$$E_{S0\% - 1B} = \frac{49300[N]/2500[mm^2]}{15[mm]/50[mm]}$$

$$E_{S0\% - 1B} = 65.73 [MPa]$$

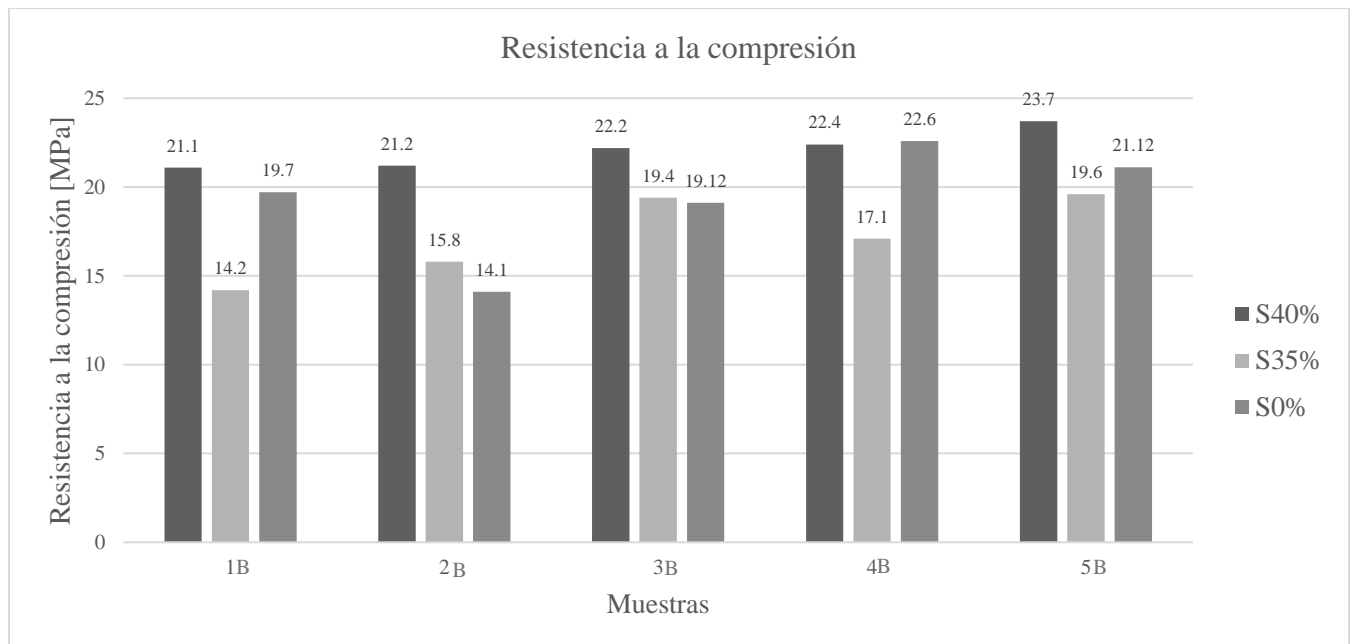
- Relación de Poisson S0%-1B

$$\nu_{S0\% - 1B} = \frac{44[mm]/50[mm]}{15[mm]/50[mm]}$$

$$\nu_{S0\% - 1B} = 0.32$$

Figura 29.

Gráfica de Resistencia a la compresión Temperatura ambiente.



Nota. Resistencia a la compresión de las 5 muestras de cada diseño que no fueron expuestas en el

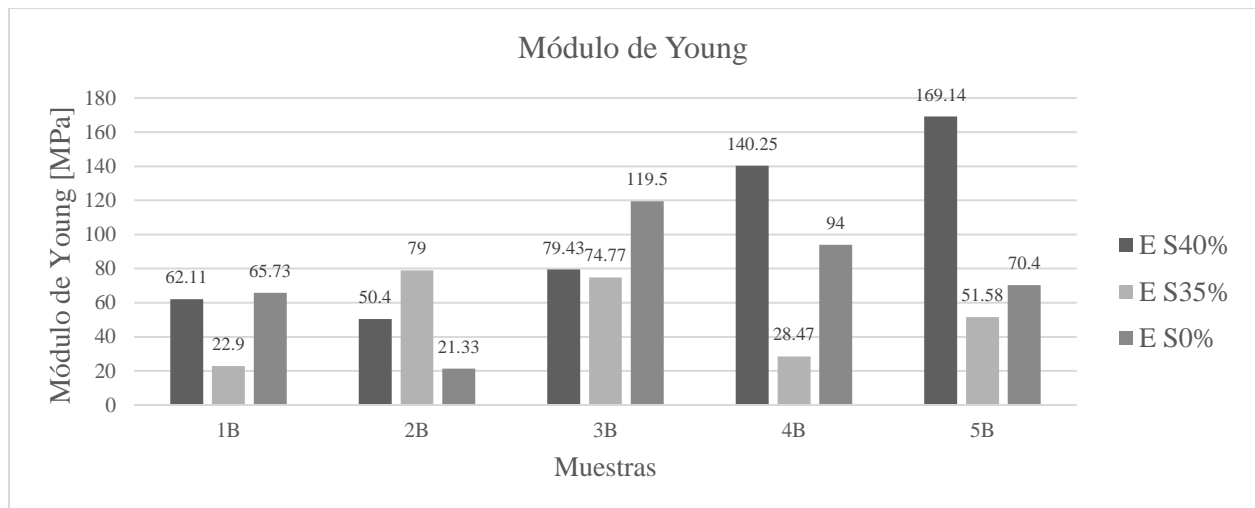
horno. Fuente: Autoras.

En la gráfica de la figura 29 se observa que la muestra con una mayor resistencia a la compresión fue la muestra 5B con adición del 40% de sílice con un valor de 23.7 MPa, también se puede observar que de forma general las muestras del diseño S40% presentan valores más altos en comparación a los otros 2 diseños.

La gráfica de la figura 30 del módulo de Young muestra que el resultado mayor fue el de la muestra 5 del diseño S40% con 169.14 MPa y en la gráfica para la relación de Poisson de la figura 31 se observa el resultado más bajo que fue de 0.19 en la muestra 4 de S0%.

Figura 30.

Gráfica del Módulo de Young Temperatura ambiente.

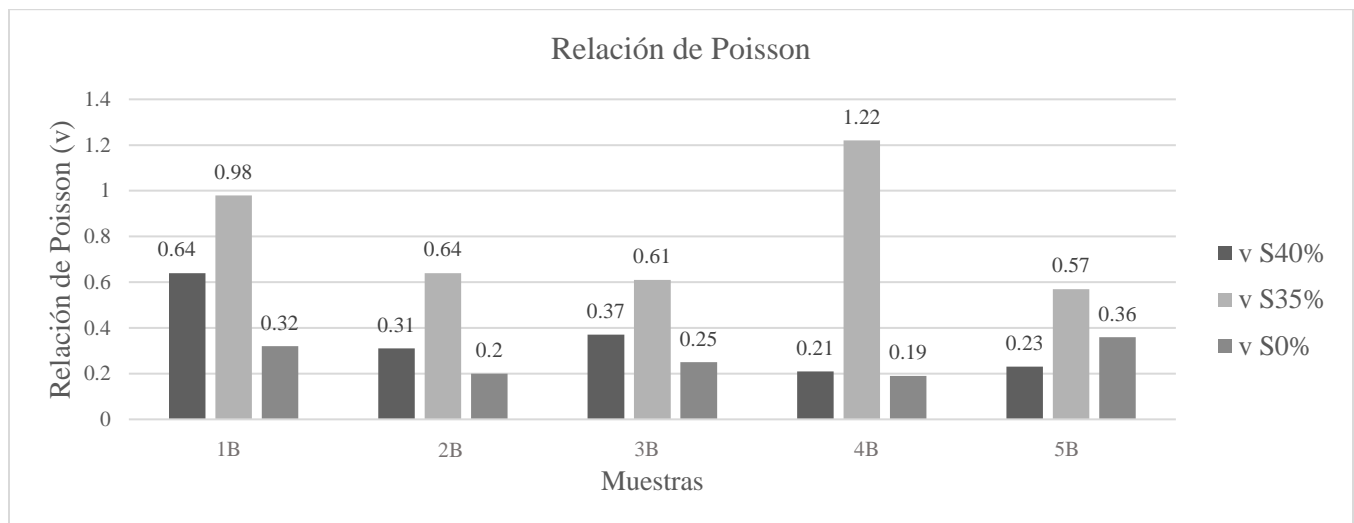


Nota. Módulo de Young de las 5 muestras de cada diseño que no fueron expuestas en el horno.

Fuente: Autoras.

Figura 31.

Gráfica de la relación de Poisson Temperatura ambiente

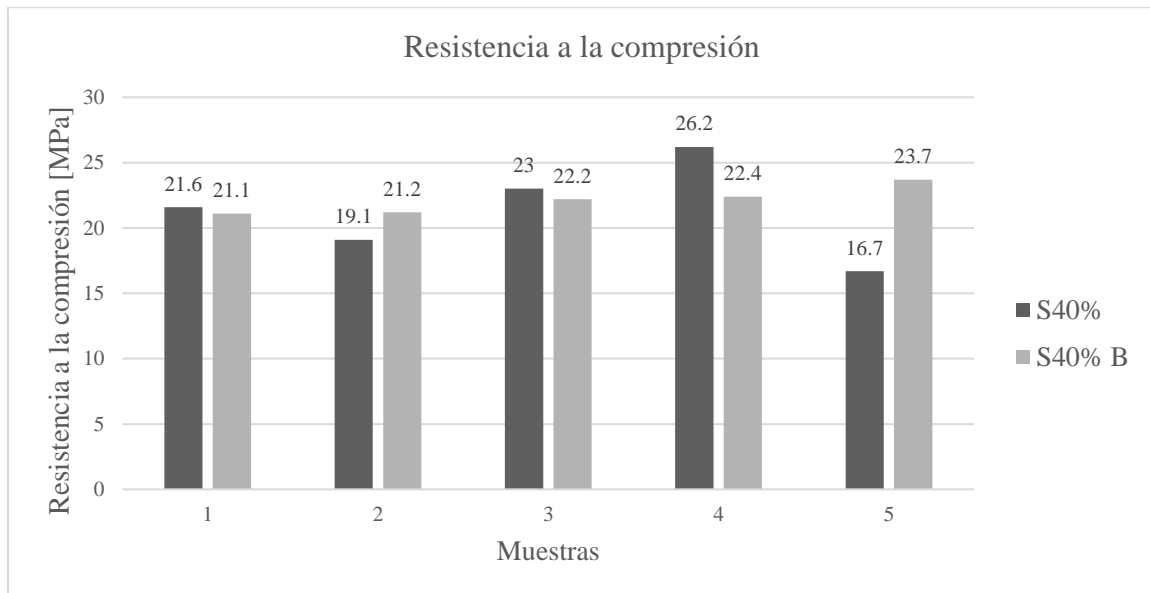


Nota. Relación de Poisson de las 5 muestras de cada diseño. Fuente: Autoras.

Se grafican los resultados obtenidos para las muestras que fueron expuestas a un cambio de temperatura y para las muestras que no lo fueron. Se obtienen las gráficas de resistencia a la compresión para el diseño S40% y S40% B (figura 32), S35% y S35% B (figura 33), S0% y S0% B (figura 34). Para el módulo de Young se obtienen las gráficas del diseño S40% y S40% B (figura 35), S35% y S35% B (figura 36), S0% y S0% B (figura 37) y para la relación de Poisson se obtienen las gráficas para S40% y S40% B (figura 38), S35% y S35% B (figura 39), S0% y S0% B (figura 40).

Figura 32.

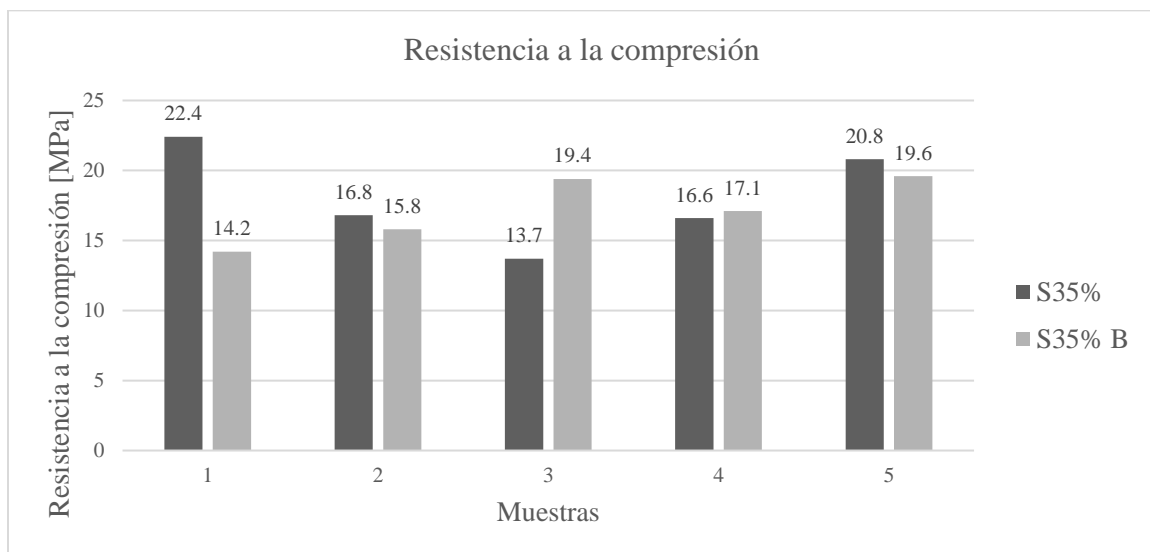
Resistencia a la compresión con temperatura variable. S40% y S40%B.



Nota. Resistencia a la compresión para el diseño con 40% de adición de sílice con temperatura variable. Fuente: Autoras.

Figura 33.

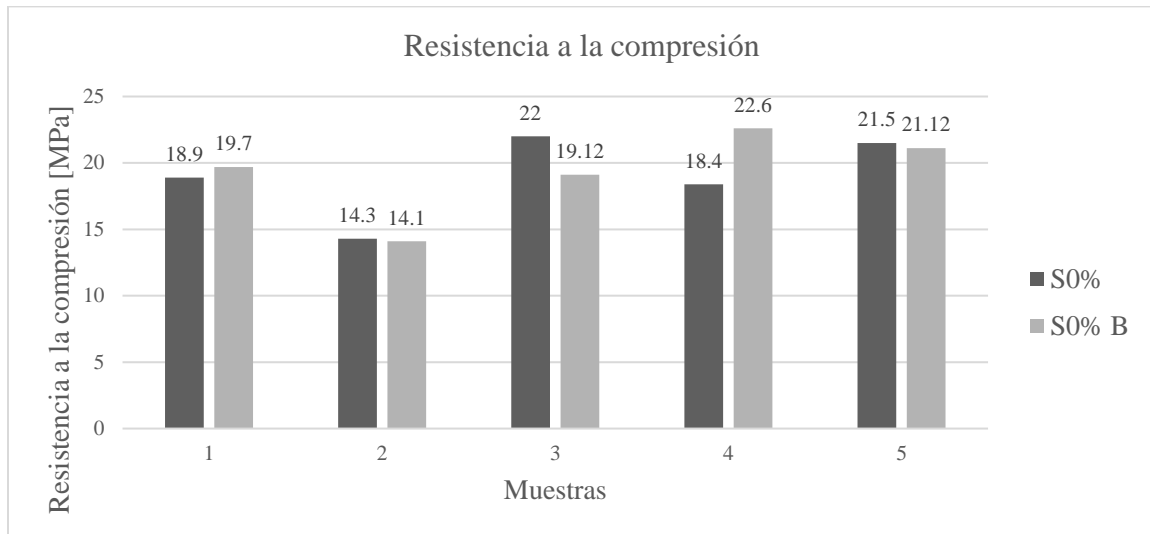
Resistencia a la compresión con temperatura variable. S35% y S35%B.



Nota. Resistencia a la compresión para el diseño con 35% de adición de sílice con temperatura variable. Fuente: Autoras.

Figura 34.

Resistencia a la compresión con temperatura variable. S0% y S0%B.

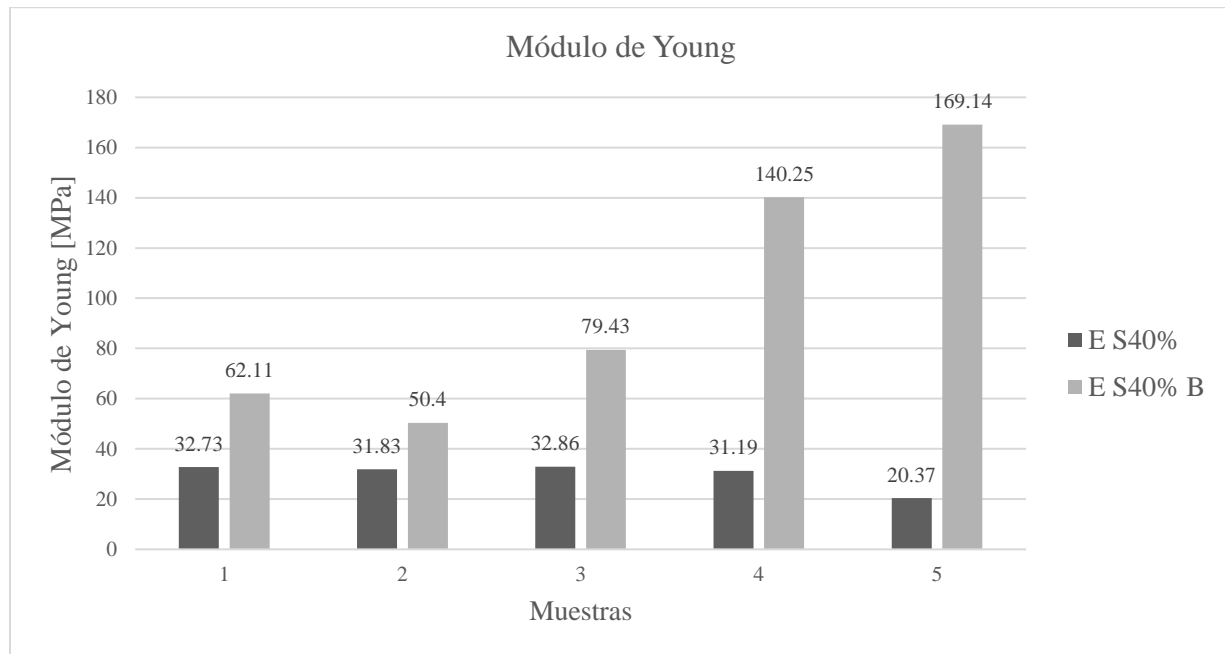


Nota. Resistencia a la compresión para el diseño sin adición de sílice con temperatura variable. Fuente: Autoras.

Se observa que ante un aumento de la temperatura los valores de la resistencia a la compresión son menores. En el caso del diseño con adición de 40% de sílice el resultado más alto con 26.2 MPa fue el de la muestra 4 que fue expuesta a 200°C, para el diseño S35% el resultado más alto con 22.4 MPa fue el de la muestra 1 expuesta 200°C y para el diseño S0% el mejor resultado con 22.6 MPa fue el de la muestra 4 que se encontraba a temperatura ambiente.

Figura 35.

Módulo de Young con temperatura variable. S40% y S40%B.

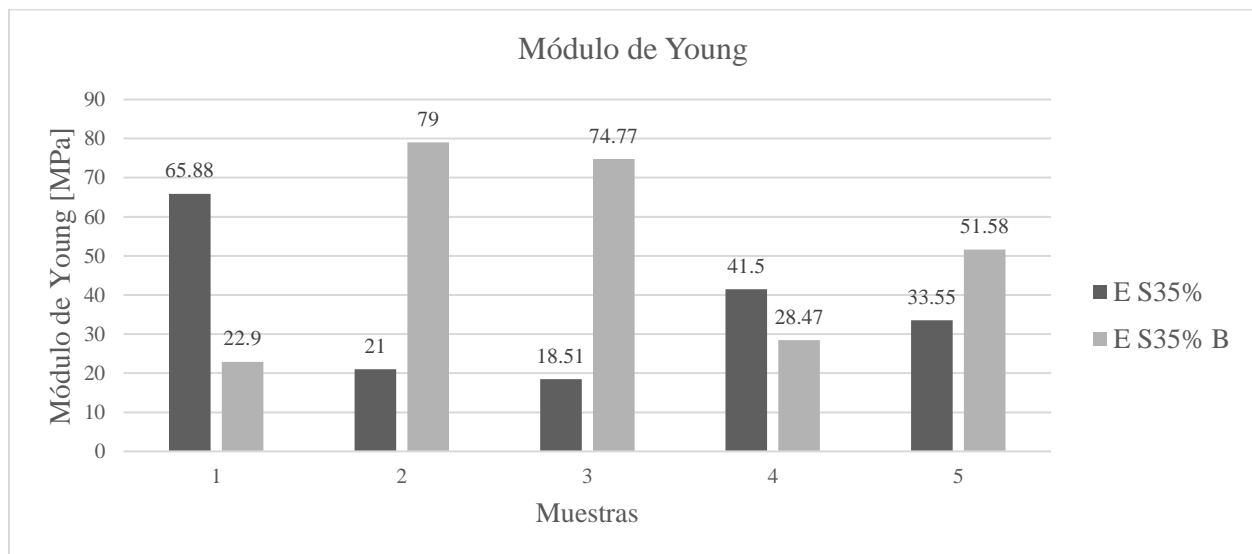


Nota. Módulo de Young para el diseño con 40% de adición de sílice con temperatura variable.

Fuente: Autoras.

Figura 36.

Módulo de Young con temperatura variable. S35% y S35%B.

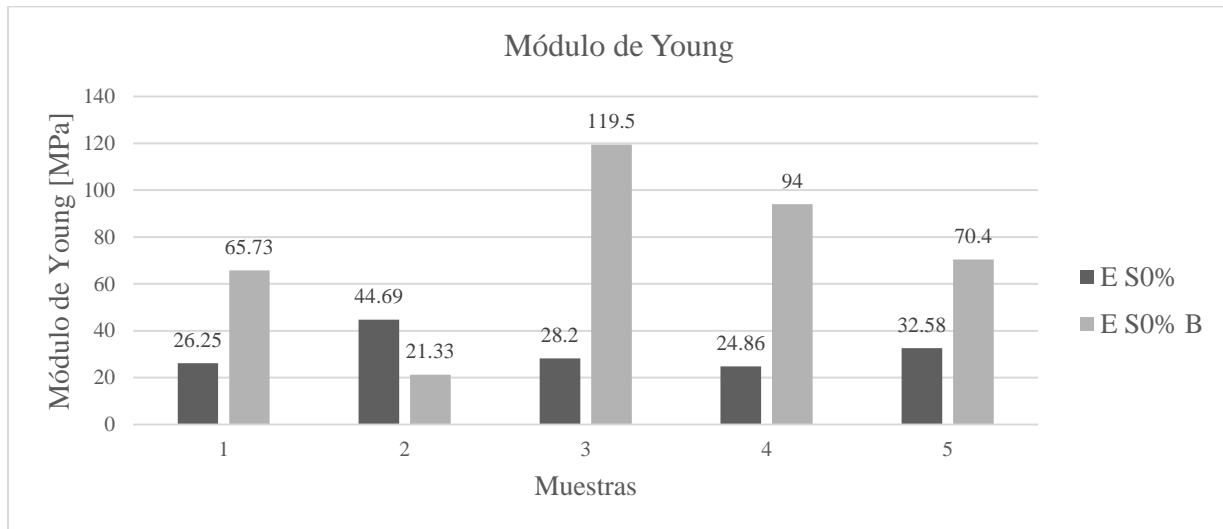


Nota. Módulo de Young para el diseño con 35% de adición de sílice con temperatura variable.

Fuente: Autoras.

Figura 37.

Módulo de Young con temperatura variable. S0% y S0%B.

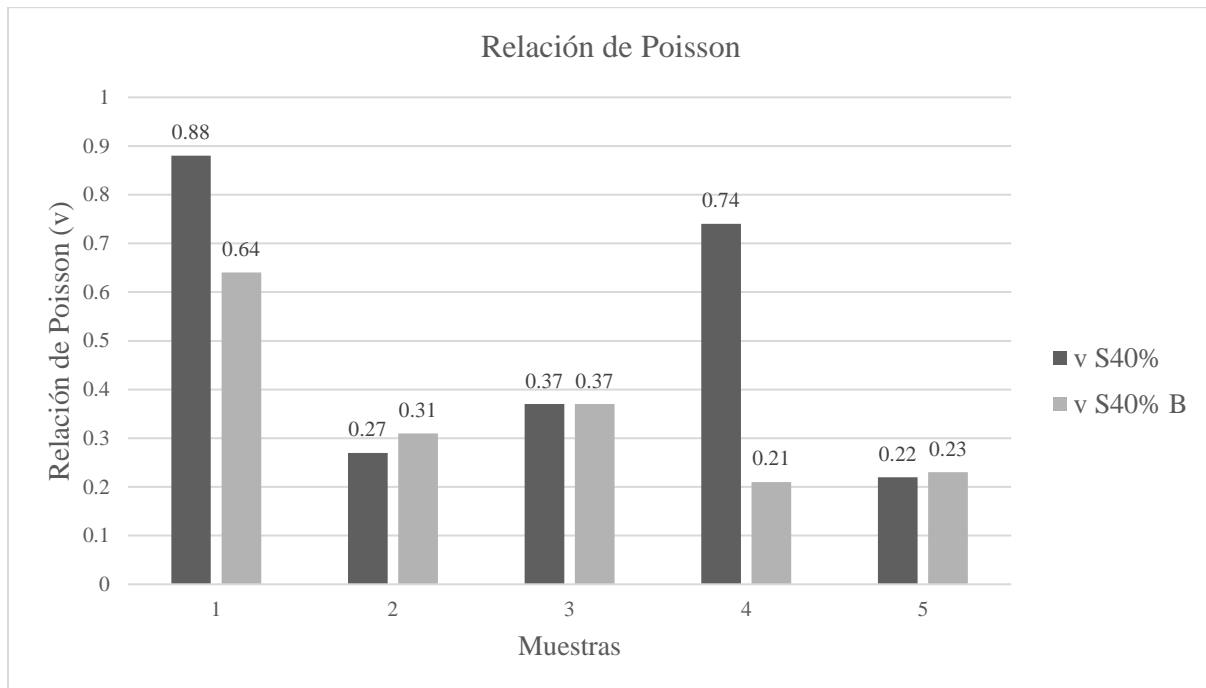


Nota. Módulo de Young para el diseño sin adición de sílice con temperatura variable. Fuente: Autoras.

Se evidencia que ante un aumento de la temperatura los valores del módulo de Young son menores. En el caso del diseño con adición de 40% de sílice el resultado más alto con 169.14 MPa fue el de la muestra 5 que se encontraba a temperatura ambiente, para el diseño S35% el resultado más alto con 79 MPa fue el de la muestra 2 a temperatura ambiente y para el diseño S0% el resultado más alto con 119.5 MPa fue el de la muestra 3 que estaba a temperatura ambiente.

Figura 38.

Relación de Poisson con temperatura variable. S40% y S40%B.

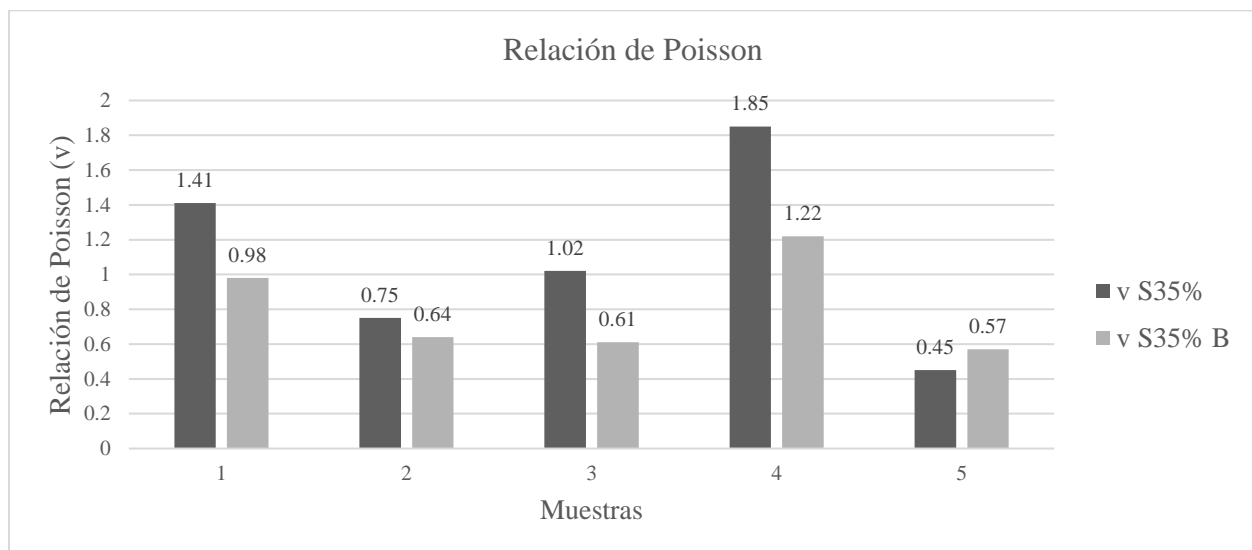


Nota. Relación de Poisson para el diseño con 40% de adición de sílice con temperatura variable.

Fuente: Autoras.

Figura 39.

Relación de Poisson con temperatura variable. S35% y S35%B.

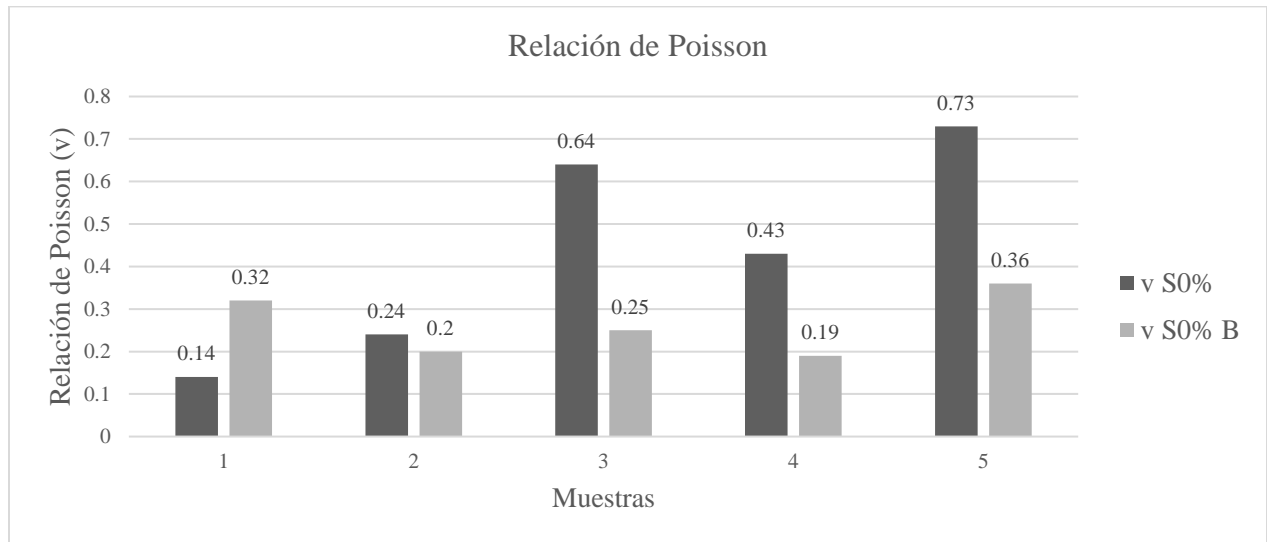


Nota. Relación de Poisson para el diseño con 35% de adición de sílice con temperatura variable.

Fuente: Autoras.

Figura 40.

Relación de Poisson con temperatura variable. S0% y S0%B.



Nota. Relación de Poisson para el diseño sin adición de sílice con temperatura variable. Fuente: Autoras.

Se observa que ante un aumento de la temperatura los valores de la relación de Poisson son mayores. En el caso del diseño con adición de 40% de sílice el resultado más bajo con 0.21 fue el de la muestra 4 que se encontraba a temperatura ambiente, para el diseño S35% el resultado más bajo con 0.45 fue el de la muestra 5 expuesta a 200°C y para el diseño S0% el resultado más bajo con 0.14 fue el de la muestra 1 expuesta a 200°C.

8.3 Prueba de empuje

Para determinar la resistencia de la unión del cemento con respecto al casing se sigue el procedimiento de la prueba de empuje que fue detallado en el capítulo 7.

8.3.1 Cálculos de las cantidades de materiales necesarios.

El cálculo de los volúmenes es el primer paso para definir las cantidades de materiales que son necesarias. Primero se calcula el volumen de la muestra con la ecuación (XIII).

$$V_{Cilindro} = \pi * r^2 * h \quad (XIII)$$

$$V_{Cilindro} = \pi * 5.08^2 [cm^2] * 20 [cm]$$

$$V_{Cilindro} = 1621.46 \text{ cm}^3 = 0.057 \text{ ft}^3$$

Con el volumen de la muestra calculado se obtienen los volúmenes específicos de cada material partiendo de la ecuación (X) y considerando el mismo valor de X que es la relación porcentual.

- S40%

$$V_{cemento} = 1621.46 * 29.77\%$$

$$V_{cemento} = 482.57 \text{ cm}^3 = 0.017 \text{ ft}^3$$

$$V_{sílice} = 1621.46 * 14.16\%$$

$$V_{sílice} = 229.6 \text{ cm}^3 = 0.008 \text{ ft}^3$$

$$V_{agua} = 1621.46 * 56.07\%$$

$$V_{agua} = 909.15 \text{ cm}^3 = 0.032 \text{ ft}^3$$

- S35%

$$V_{cemento} = 1621.46 * 30.81\%$$

$$V_{cemento} = 499.57 \text{ cm}^3 = 0.018 \text{ ft}^3$$

$$V_{sílice} = 1621.46 * 12.82\%$$

$$V_{silice} = 207.87 \text{ cm}^3 = 0.007 \text{ ft}^3$$

$$V_{agua} = 1621.46 * 56.37\%$$

$$V_{agua} = 865.37 \text{ cm}^3 = 0.031 \text{ ft}^3$$

- S0%

$$V_{cemento} = 1621.46 * 40.74\%$$

$$V_{cemento} = 660.58 \text{ cm}^3 = 0.023 \text{ ft}^3$$

$$V_{agua} = 1621.46 * 59.26\%$$

$$V_{agua} = 960.88 \text{ cm}^3 = 0.034 \text{ ft}^3$$

El siguiente paso es calcular la cantidad de masa necesaria y para esto se toma como punto de partida la ecuación (XI)

- S40%

$$M_{cemento} = 482.57 \text{ cm}^3 * 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{cemento} = 1520.09 \text{ [g]} = 3.35 \text{ [lbs]}$$

$$M_{silice} = 229.6 \text{ cm}^3 * 2.65 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{silice} = 608.44 \text{ [g]} = 1.34 \text{ [lbs]}$$

$$M_{agua} = 909.15 \text{ cm}^3 = 0.032 \text{ ft}^3$$

$$M_{agua} = 909.15 \text{ [ml]}$$

- S35%

$$M_{cemento} = 499.57 \text{ cm}^3 * 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{cemento} = 1573.64 \text{ [g]} = 3.47 \text{ [lbs]}$$

$$M_{silice} = 207.87 \text{ cm}^3 * 2.65 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{silice} = 550.85 \text{ [g]} = 1.21 \text{ [lbs]}$$

$$M_{agua} = 867.37 \text{ cm}^3 = 0.031 \text{ ft}^3$$

$$M_{agua} = 867.37[ml]$$

- S0%

$$M_{cemento} = 660.58 \text{ cm}^3 * 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{cemento} = 2080.82 [g] = 4.59 [lbs]$$

$$M_{agua} = 960.88 \text{ cm}^3 = 0.034 \text{ ft}^3$$

$$M_{agua} = 960.88 [ml]$$

Con las cantidades definidas de los materiales se procedió a la preparación de las muestras con los mismos materiales que fueron utilizados en la prueba de resistencia a la compresión y adicionalmente se usaron varillas lisas de acero y tubos de PVC (figura 19). Las especificaciones de las varillas son descritas en la tabla 13.

Tabla 13.

Especificaciones de la varilla de acero.

Varilla de acero lisa	
Diámetro	1 ¼ [in]
Longitud	0.88, 27 [ft, cm]
Peso	0.04, 1693 [lb, g]

Nota. Especificaciones de las varillas que fueron usadas para la prueba de empuje. Fuente: Autoras.

8.3.2 Preparación de las lechadas.

Se llevo a cabo el mismo procedimiento que se utilizó en la prueba de resistencia a la compresión para la preparación de las muestras. Con la mezcla elaborada se procedió a verterlas en las celdas que son mostradas en la figura 19 y posteriormente se inicia el proceso de fraguado que tiene una duración de 2 días como se presenta en la figura 41.

Figura 41.

Fraguado de las muestras S40% para la prueba de empuje.



Nota. Celdas cilíndricas usadas para el fraguado de las muestras. Fuente: Autoras.

8.3.3 Curado de las muestras.

El proceso de curado para las muestras cilíndricas tuvo una duración de 28 días, esto con el objetivo de desarrollar la mejor resistencia posible. En la figura 42 se pueden observar las muestras en el proceso de curado húmedo.

Figura 42.

Muestras cilíndricas S40% en curado.



Nota. Muestras del diseño S40% en la cámara húmeda durante el proceso de curado. Fuente: Autoras.

8.3.4 Exposición a alta temperatura de las muestras.

Después de los 28 días de curado se expusieron las muestras a 200°C en el horno como se observa en la figura 43.

Figura 43.

Muestra cilíndrica en el horno.



Nota. Muestra de S40% para prueba de empuje en el horno. Fuente: Autoras.

8.3.5 Desarrollo de la prueba de empuje.

Se toma como punto de partida la metodología expuesta en el capítulo 7, esta prueba consiste en ejercer una carga sobre la varilla generando esfuerzos de corte o de cizalla en la interfaz cemento-casing hasta que la unión se rompe y se generan fracturas. En la figura 44 se observa cómo se posiciona la celda en la prensa para realizar la prueba.

Figura 44.

Ejecución prueba de empuje a una muestra de S40%.



Nota. Muestra del diseño S40% sometida a la prueba de empuje en la prensa. Fuente: Autoras.

8.3.6 Resultados de la prueba de empuje.

Con los resultados obtenidos en la prueba de empuje de los diseños S40%-C (tabla 14), S35%-C (tabla 15) y S0%-C (tabla 16) se calcula el área transversal de los cilindros con la ecuación (XIV) y la resistencia al corte partiendo de la ecuación (IV).

$$A_{transversal\ Cilindro} = \pi * r^2 \quad (XIV)$$

$$A_{transversal\ Cilindro} = \pi * 50.8^2 [mm^2]$$

$$A_{transversal\ Cilindro} = 8107.32 [mm^2]$$

$$F_c\ S40\% - C1 = \frac{F}{A}$$

$$F_c\ S40\% - C1 = \frac{350300 [N]}{8107.32 [mm^2]}$$

$$F_c \text{ S40\% - C1} = 43.21 \text{ [MPa]}$$

Tabla 14.

Resultados prueba de empuje para S40%-C.

Muestra	Peso [g]	Tiempo [min]	Fuerza [N]	Resistencia al corte [Psi, MPa]
S40% - C1	5054	3.34	350300	6267.08; 43.21
S40% - C2	5050	3.24	370800	6634.03; 45.74
S40% - C3	5060	3.46	409000	7317.15; 50.45
Promedio			376700	6739.90; 46.47

Nota. Resultados de la prueba de empuje para el diseño S40%-C. Fuente: Autoras.

Tabla 15.

Resultados prueba de empuje para S35%-C.

Muestra	Peso [g]	Tiempo [min]	Fuerza [N]	Resistencia al corte [Psi, MPa]
S35% - C1	5053	2.57	350400	6268.53; 43.22
S35% - C2	5056	3.00	280300	5015.40; 34.58
S35% - C3	5054	2.40	290800	5202.50; 35.87
Promedio			307166.67	5495.48; 37.89

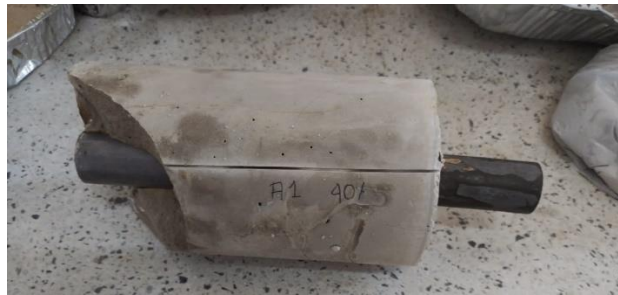
Nota. Resultados de la prueba de empuje para el diseño S35%-C. Fuente: Autoras.

Tabla 16.*Resultados prueba de empuje para S0%-C.*

Muestra	Peso [g]	Tiempo [min]	Fuerza [N]	Resistencia al corte [Psi, MPa]
S0% - C1	5050	2.00	250400	4480.22; 30.89
S0% - C2	5052	2.30	260900	4667.31; 32.18
S0% - C3	5049	2.24	254300	4549.83; 31.37
Promedio			255200	4565.79; 31.48

Nota. Resultados de la prueba de empuje para el diseño S0%-C. Fuente: Autoras.

En la muestra S40%-C1 la varilla quedó bien ajustada la lechada de cemento, quedando más de un 70 % del cemento adherido a la varilla, esto se observa en la figura 45.

Figura 45.*S40%-C1 estado final.*

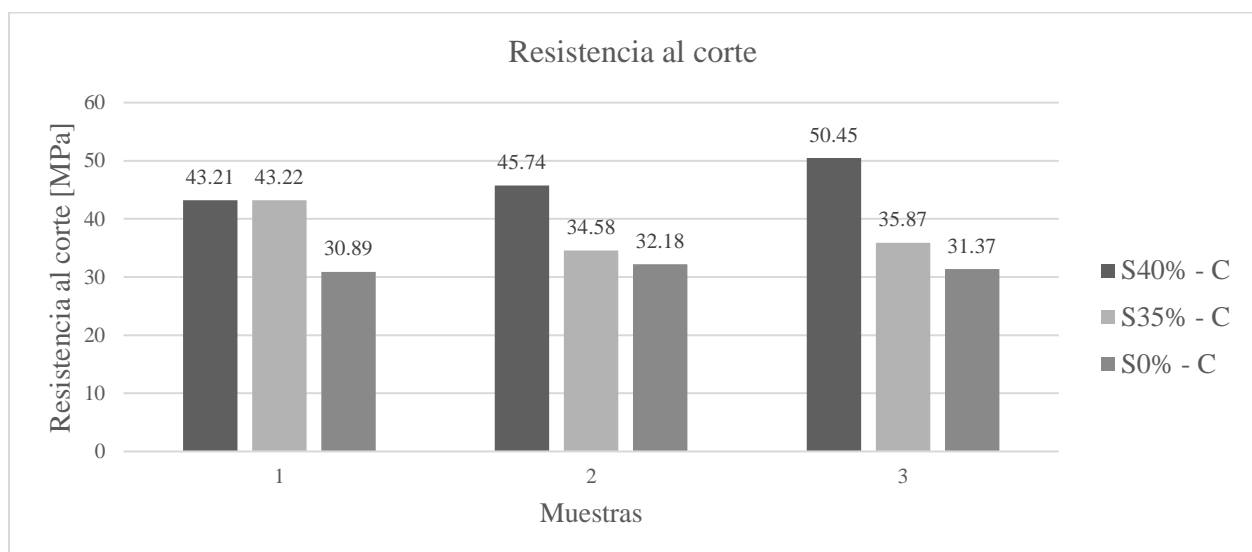
Nota. Estado final de la muestra S40%-C1. Fuente: Autoras.

Una vez la muestra S40%-C3 fue retirada del tubo PVC quedó destruida completamente, cabe resaltar que la varilla también sufrió daños, ya que no salió completamente recta como se evidencia en la figura 46.

Figura 46.*S40%-C3 estado final.*

Nota. Estado final de la muestra S40%-C3. Fuente: Autoras.

A continuación, en la gráfica de la figura 47 se recopilan los resultados obtenidos de la resistencia al corte en la prueba de empuje para todos los diseños de lechadas que fueron expuestos a 200°C.

Figura 47.*Gráfica de resistencia al corte - T=200°C.*

Nota. Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para determinar la resistencia al corte de las 3 muestras de cada diseño. Fuente: Autoras.

Se observa que la muestra S40%-C3 es la que presentó una mayor resistencia al corte con un valor de 50.45 MPa y la muestra con el resultado más bajo fue S0%-C1 con una resistencia al corte de 30.89 MPa. En términos generales se observan valores de resistencia más altos en los diseños con adición del 40% de sílice.

Se realizaron adicionalmente pruebas de empuje para muestras que no fueron expuestas a cambios de temperatura, se obtienen los resultados de la resistencia al corte usando la ecuación (IV) para las muestras del diseño S40%-CB (tabla 17), S35%-CB (tabla 18) y S0%-CB (tabla 19).

$$F_c \text{ S40\% - C1B} = \frac{390200 [N]}{8107.32 [mm^2]}$$

$$F_c \text{ S40\% - C1B} = 48.13 [\text{MPa}]$$

Tabla 17.

Resultados prueba de empuje para S40%-CB temperatura ambiente.

Muestra	Peso [g]	Tiempo [min]	Fuerza [N]	Resistencia al corte [Psi, MPa]
S40% - C1B	5050	3.54	390200	6980.67; 48.13
S40% - C2B	5052	3.72	386400	6912.50; 47.66
S40% - C3B	5049	3.63	387500	6932.80; 47.80
Promedio			388033.33	6941.51; 47.86

Nota. Resultados de la prueba de empuje para las muestras de S40%-CB. Fuente: Autoras.

Tabla 18.*Resultados prueba de empuje para S35%-CB temperatura ambiente.*

Muestra	Peso [g]	Tiempo [min]	Fuerza [N]	Resistencia al corte [Psi, MPa]
S35% - C1B	5049	3.31	348500	6235.17; 42.99
S35% - C2B	5051	3.28	350000	6261.28; 43.17
S35% - C3B	5050	3.35	351200	6283.03; 43.32
Promedio			349900	6259.83; 43.16

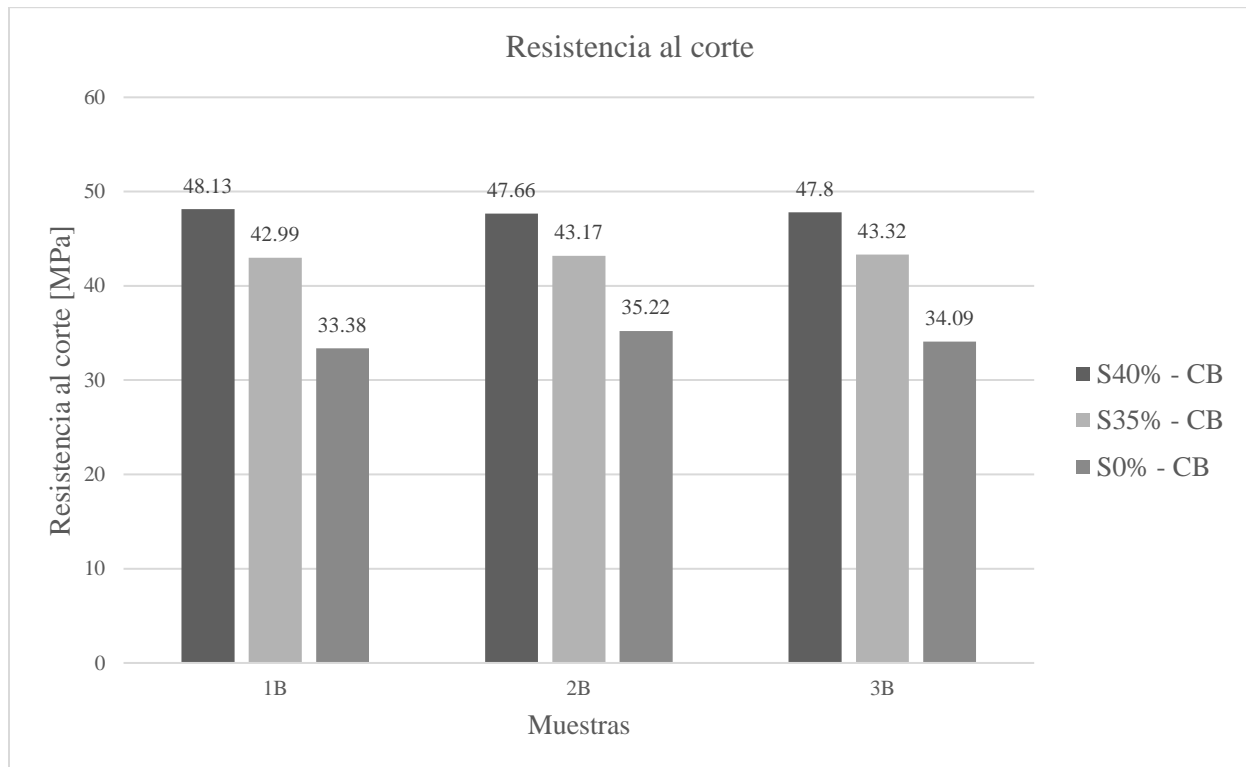
Nota. Resultados de la prueba de empuje para las muestras de S35%-CB. Fuente: Autoras.

Tabla 19.*Resultados prueba de empuje para S0%-CB temperatura ambiente.*

Muestra	Peso [g]	Tiempo [min]	Fuerza [N]	Resistencia al corte [Psi, MPa]
S0% - C1B	5050	2.48	270600	4841.36; 33.38
S0% - C2B	5052	2.74	285500	5108.23; 35.22
S0% - C3B	5048	2.51	276400	4944.34; 34.09
Promedio			277500	4964.64; 34.23

Nota. En la tabla se presentan los resultados para S0% de la prueba de empuje. Fuente: Autoras.

Con los resultados de las resistencias al corte para las muestras de todos los diseños que no se expusieron a cambios de temperatura se construye la gráfica de la figura 48.

Figura 48.*Gráfica de resistencia al corte - Temperatura ambiente.*

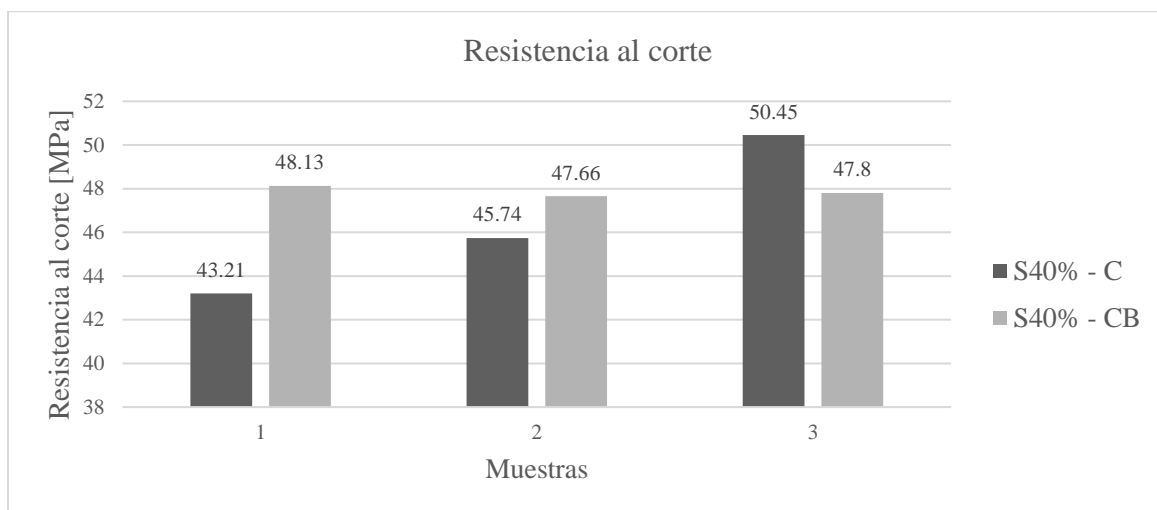
Nota. Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para determinar la resistencia al corte de las muestras que no fueron expuestas en el horno. Fuente: Autoras.

Para el caso de las muestras que no fueron sometidas a cambios de temperatura se observa que al igual que en el caso de las muestras que fueron expuestas a 200°C el diseño con adición del 40% de sílice es el que presenta valores más altos de resistencia al corte. El valor más alto es el de la muestra S40%-CB1 con una resistencia al corte de 48.13 MPa y el valor más bajo es el de la muestra S0%-CB1 con un resultado de 33.38 MPa.

Se realiza la comparación de los resultados de resistencia al corte entre las muestras de los mismos diseños considerando la variación de la temperatura y se construyen las gráficas para los diseños S40%-C (figura 49), S35%-C (figura 50) y S0%-C (figura 51).

Figura 49.

Resistencia al corte con temperatura variable. S40%-C y S40%-CB.

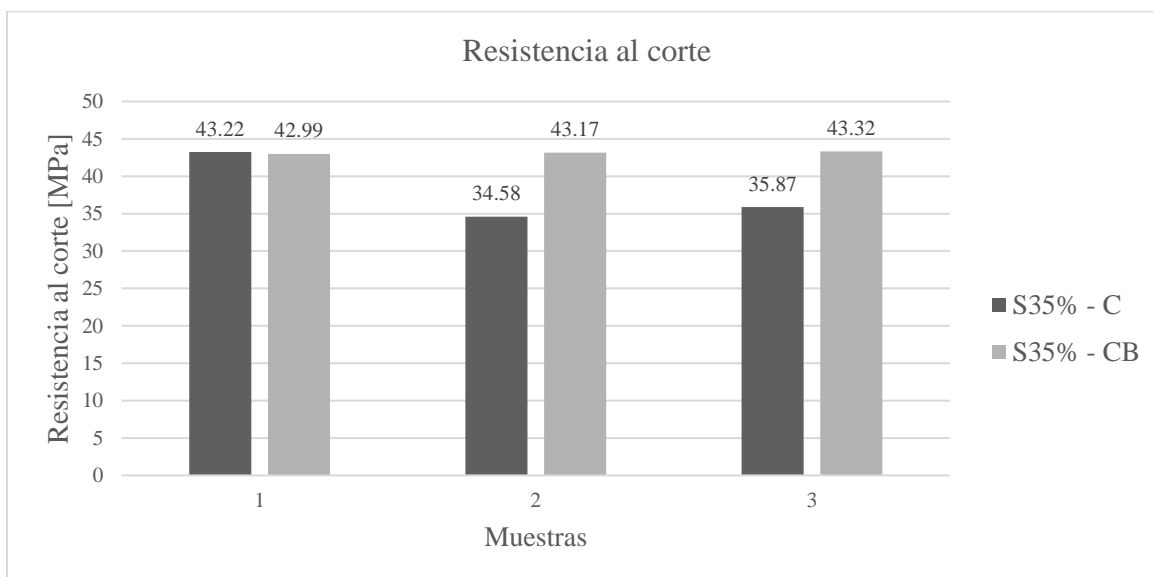


Nota. Resistencia al corte para el diseño con 40% de adición de sílice con temperatura variable.

Fuente: Autoras.

Figura 50.

Resistencia al corte con temperatura variable. S35%-C y S35%-CB.

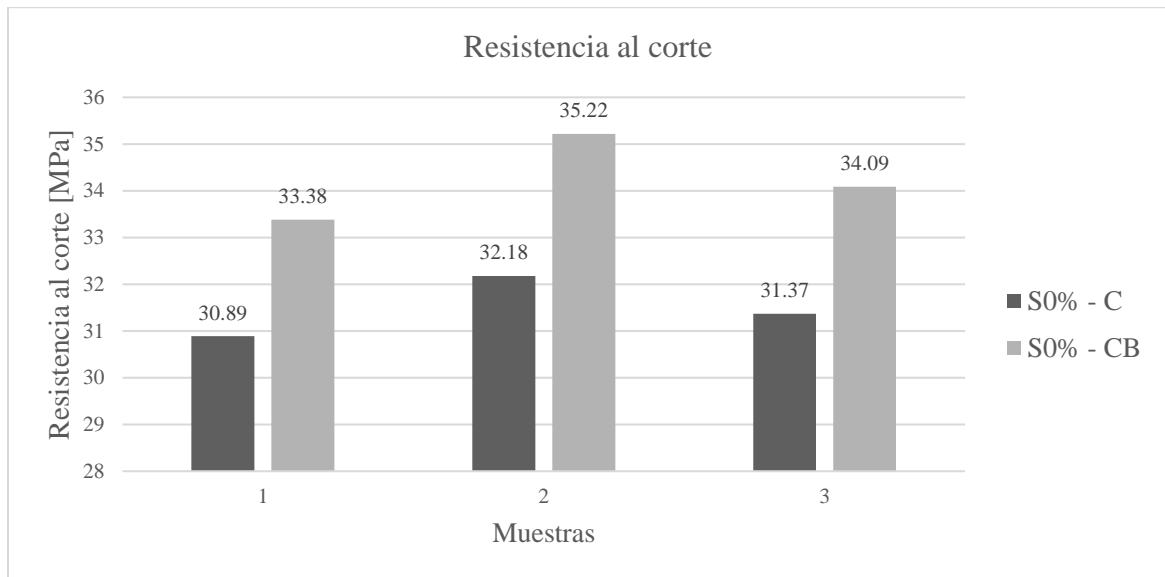


Nota. Resistencia al corte para el diseño con 35% de adición de sílice con temperatura variable.

Fuente: Autoras.

Figura 51.

Resistencia al corte con temperatura variable. S0%-C y S0%-CB.



Nota. Resistencia al corte para el diseño sin adición de sílice con temperatura variable. Fuente: Autoras.

Se observa que para todos los diseños los valores de resistencia al corte son más altos y tienen menos variación cuando las muestras se encuentran a temperatura ambiente. El resultado más alto de resistencia para el diseño con 40% de adición de sílice es el de la muestra S40%-C3 es de 50.45 MPa, para el diseño S35% el resultado más alto es de 43.32 MPa para la muestra S35%-C3B y para el diseño base el valor más alto es de 35.22 MPa de la muestra S0%-C2B.

9. Conclusiones

Con base en la revisión bibliográfica se concluyó que existen diferentes diseños de lechadas de cemento que pueden emplearse en aplicaciones de pozos de alta temperatura, adicionalmente hay una gran variedad de aditivos que pueden utilizarse para el mejoramiento de estos diseños entre ellos el más sobresaliente es el sílice.

Con la prueba de resistencia a la compresión se concluyó que el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas como lo son la resistencia a la compresión, módulo de Young y relación de Poisson es la pérdida de integridad del cemento ya que los valores de estos parámetros tienden a disminuir cuando las muestras son expuestas a alta temperatura como se observa en el análisis de las gráficas de las figuras (32-40).

Con base en el análisis de resultados de la prueba de empuje para determinar la resistencia al corte se concluyó que el incremento de temperatura genera que esta resistencia del cemento disminuya como se visualiza en las gráficas de las figuras (49-51).

A partir del análisis gráfico realizado se concluyó que el diseño con una adición del 40% de harina de sílice presenta mejores resultados promedio de resistencia a la compresión para altas y bajas temperaturas (21.32 MPa / 22.12 MPa) y al corte (46.47 MPa / 47.86 MPa) en comparación con los diseños de lechadas de cemento con 35% (18.06 MPa / 17.22 MPa, 37.89 MPa / 43.16 MPa) y 0% de aditivo (19.02 MPa / 19.34 MPa, 31.48 MPa / 34.23MPa).

10. Recomendaciones

Se recomienda realizar pruebas con temperaturas más altas y con variación de aditivos, para así poder realizar una comparación a mayor escala y así mismo generar resultados del comportamiento de las propiedades mecánicas y la adherencia en diferentes sistemas de cemento.

Es recomendable profundizar en la temática de la adherencia y fuerza de unión del cemento respecto al casing y también respecto a la formación, esto debido a la poca experimentación en este tema en específico.

Referencias Bibliográficas

- Stober, I., & Bucher, K. (2021). *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development* (Second Edition). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71685-1>
- Salhein, K., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2022). *Forecasting Installation Capacity for the Top 10 Countries Utilizing Geothermal Energy by 2030*. *Thermo*, 2(4), 334-351. <https://doi.org/10.3390/thermo2040023>
- Bett, E. (2017). *Geothermal well cementing, materials and placement techniques*. LAP LAMBERT Academic Publishing. <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2010-10.pdf>
- Pyatina, T. (2018). *Cements for High-Temperature Geothermal Wells*. *Cement Based Materials*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.74108>
- Nalobile, P., Wachira, J. M., Thiong’O, J. K., & Marangu, J. M. (2020). *A Review on Pyroprocessing Techniques for Selected Wastes Used for Blended Cement Production Applications*. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5640218>
- Aïtcin, P. C. (2016). *Portland cement*. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 27–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>
- Cebreros, M., Pérez, F., & Pelayo, A. (2017). *Degradación de cemento en el campo geotérmico de Cerro Prieto*. *REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA*, 30, 7. <https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol30-1.pdf>
- Pang, X., Sun, L., Chen, M., Xian, M., Cheng, G., Liu, Y., & Qin, J. (2022). *Influence of curing temperature on the hydration and strength development of Class G Portland cement*.

Cement and Concrete Research, 156, 106776.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106776>

Bergen, S. L., Zemberekci, L., & Nair, S. D. (2022). *A review of conventional and alternative cementitious materials for geothermal wells*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112347. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112347>

Pyatina, T., & Sugama, T. (2014). *Set Controlling Additive for Thermal-Shock-Resistant Cement*. *GRC Transactions*, 38. <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1033545.pdf>

Zhu, J. (2019). *Prevent Cement Strength Retrogression Under Ultra High Temperature*. Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2019, ADIP 2019. <https://doi.org/10.2118/197739-MS>

Di Martino, G., & Ruch, A. (2018). *Non-Portland Cement Slurry Development and Application for Ultrahigh-Temperature Geothermal Well with Supercritical Conditions*. *Proceedings of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, APDT, 2018-August, 27–29*. <https://doi.org/10.2118/190974-MS>

Sukhachev, V., Salehpour, A., Akhmetzianov, I., Sozonov, A., Bakhareva, E., Shabanova, S., Zinovyeva, A., Olennikova, O., & Droger, N. (2022). *Cement Expansion in Cased Hole Environments: A Novel Laboratory Testing and Evaluation Method with Successful Field Implementation*. *SPE - International Association of Drilling Contractors Drilling Conference Proceedings, 2022-March*. <https://doi.org/10.2118/208679-MS>

Shadravan, A., Schubert, J., Amani, M., & Teodoriu, C. (2015). *Using Fatigue-Failure Envelope for Cement-Sheath-Integrity Evaluation*. *SPE Drilling & Completion*, 30(01), 68–75. <https://doi.org/10.2118/168321-PA>

- Al-Yami, A., Shakhouri, A., Al-Bahrani, H., Al-Khalaf, S., & Wagle, V. (2022). *Improved Cement Properties Prevent Well Control Incidents Potentials at Top of Liners*. Paper presented at the International Petroleum Technology Conference, Riyadh, Saudi Arabia, February 2022. <https://doi.org/10.2523/IPTC-21957-MS>
- Abdulsalaam, I., Amos, C., Ahabike, G., & Ejukorlem-Okusi, R. (2021). *Mechanically Enhanced Cementing: Mitigation Against Sustained Casing Pressure in Highly Stressed Downhole Environment, Offshore Niger Delta*. Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition 2021, NAIC 2021. <https://doi.org/10.2118/207180-MS>
- Xu, H., Ma, T., Peng, N., & Yang, B. (2018). *Influences of Fracturing Fluid Injection on Mechanical Integrity of Cement Sheath under Four Failure Modes*. *Energies* 2018, Vol. 11, Page 3534, 11(12), 3534. <https://doi.org/10.3390/en11123534>
- Rageh, S. M., Nezami, Z., Dhanalakshmi, K., Liyakath, S., & Basha, A. (2017). *Compressive Strength and Thickening Time of Cement in Oil Well*. *International Journal of Engineering Science Invention*. (Vol. 6), 01-04. [http://www.ijesi.org/papers/Vol\(6\)12/Version-1/A0612010104.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol(6)12/Version-1/A0612010104.pdf)
- Rohr, N., & Fischer, J. (2017). *Effect of aging and curing mode on the compressive and indirect tensile strength of resin composite cements*. *Head and Face Medicine*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S13005-017-0155-Z/FIGURES/4>
- Fernández Rojas, L., Quintero Peña, Y. A., & Calderón Carrillo, Z. H. (2015). *ANÁLISIS DE LA FRAGILIDAD PARA IDENTIFICAR SWEET SPOTS EN FORMACIONES DE SHALE GAS*. *Revista Fuentes El Reventón Energético*, 13(2), 103–111. <https://doi.org/10.18273/REVFUE.V13N2-2015009>

- Pavlík, Z., Pavlíková, M., & Záleská, M. (2019). *Properties of concrete with plastic polypropylene aggregates*. *Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete*, 189–213. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00009-8>
- Giurgiutiu, V. (2016). *Fundamentals of Aerospace Composite Materials*. *Structural Health Monitoring of Aerospace Composites*, 25–65. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409605-9.00002-7>
- Liu, X., Nair, S. D., Cowan, M., & van Oort, E. (2015). *A Novel Method to Evaluate Cement-Shale Bond Strength*, Paper presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. <https://doi.org/10.2118/173802-MS>
- Mahmoud, A. A., & Elkatatny, S. (2019). *The Effect of Silica Content on the Changes in the Mechanical Properties of Class G Cement at High Temperature from Slurry to Set*. 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, New York City, New York, June 2019. <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA19/All-ARMA19/ARMA-2019-1816/125024>
- Hazem, M. M., Hashem, F. S., El-Gamal, S. M. A., & Amin, M. S. (2020). *Mechanical and microstructure characteristics development of hardened oil well cement pastes incorporating fly ash and silica fume at elevated temperatures*. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 155–167. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1711998>
- Pyatina, T., Sugama, T., Trabits, G., & Jordan, A. (2018). *Calcium- Silicate-Cement Based Blends with Natural Zeolites - Self-Healing Performance under Conditions of High-Temperature Geothermal Wells*. *GRC Transactions*. <https://www.osti.gov/biblio/1501581>
- De Sena Costa, B. L. de S., Souza, G. G. de, Freitas, J. C. de O., Araujo, R. G. da S., & Santos, P. H. S. (2017). *Silica content influence on cement compressive strength in wells subjected to*

- steam injection*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 158, 626–633.
<https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2017.09.00>
- TerHeege, J. H., Wollenweber, J., Naumann, M., Pipilikaki, P., & Vercauteren, F. (2019). *Well Integrity of High Temperature Wells: Effect of Mineralogical Changes on Mechanical Properties of Well Cement*. Paper presented at the 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, New York City, New York, June 2019.
<https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings/ARMA19/125044>
- Pyatina, T., & Sugama, T. (2020). *Cements with supplementary cementitious materials for high-temperature geothermal wells*. Geothermics, 86, 101840.
<https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2020.101840>
- Wang, S., Wu, L., Jiang, G., Jian, L., Zhang, T., Chen, S., & Chen, L. (2020). *A high temperature composite cement for geothermal application*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 195, 107909. <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2020.107909>
- Li, H., Pang, X., Chen, X., & Zhang, J. (2022). *Physical and Mechanical Performance of Oil Well Cement Systems Under Simulated Shale Oil In-Situ Conversion Condition*. Paper presented at the 56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Santa Fe, New Mexico, USA, June 2022. <https://doi.org/10.56952/ARMA-2022-0412>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2021). Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (NTC 673). <https://ecollection.icontec.org/normavw.aspx?ID=81097>
- Lavrov, A., Bhuiyan, M., & Stroisz, A. (2019). *Push-out test: Why bother*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 172, 297–302. <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2018.09.067>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2020). Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, rectas o en rollos, para refuerzo de concreto (NTC 2289)

<https://ecollection-icontec-org/normavw.aspx?ID=79082>

Rincon, F., Abid, K., Arbad, N., & Teodoriu, C. (2022). *A comprehensive analysis of class H cement Unconfined Compressive Strength using cubical and cylindrical samples*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, 110692.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110692>