

Análisis del Efecto de Aditivos para el Mejoramiento de las Propiedades Fisicomecánicas del
Cemento en Estado Endurecido mediante Simulación Numérica

German Andrés Barragán Jaimes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director(a)

Maika Karen Gambús Ordaz

PhD. Ingeniería de Petróleos

Codirector(a)

Karina Andrea Mayorga Ribero

MSc. Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos

Programa Académico

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico con mi más sincero y profundo amor este trabajo de investigación:

A Dios, porque su espíritu me hizo, y el soplo del Omnipotente me dio la vida y un propósito muy grande por cumplir.

A mis Padres Germán Barragán y Marina Jaimes, por ser mi motor, motivación y guía durante todo este tiempo vivido, gracias por ayudarme a realizar este sueño de ser el primer ingeniero de la familia.

A mis hermanas Juliana y Natalia Barragán, por su amor, comprensión, motivación y ayuda incondicional en todo momento, para que yo pudiera realizar este sueño de convertirme en ingeniero de petróleos, así también, a mi sobrino Juan Andrés, por todas las bendiciones que nos trajo desde el cielo.

A mi abuela Inés, mis tíos Alfonso y Luz Mila, por sus oraciones, su apoyo incondicional, amor y comprensión.

A Tatiana por su amor, compañía y lealtad durante toda nuestra carrera universitaria, también a mis amigos, por su constante apoyo.

A mi abuelo José Encarnación y a mi tío Milton, que desde el cielo me orientan hacia el camino del bien.

German Andrés Barragán Jaimes

Agradecimientos

Esta mención en especial para Dios, por darme la vida y con ella la salud, sabiduría, entendimiento y fortaleza para realizar este proyecto, para él, siempre mi más grande agradecimiento.

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Doctora Maika Karen Gambús Ordaz, por su valiosa guía, disposición, acompañamiento y constructivas sugerencias durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

Extiendo mi gratitud a la Magíster Karina Andrea Mayorga Ribero, por su continuo acompañamiento, paciente orientación, disposición, fortalecimiento y amabilidad a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Deseo agradecer al cuerpo docente, directivos y demás trabajadores de la Universidad Industrial de Santander y en especial a los pertenecientes a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, del mismo modo, le agradezco al Grupo de investigación en Estabilidad de Pozos (GIEP), por permitirme formarme y hacer parte de su equipo durante más de dos años, donde aprendí el valor de la investigación como herramienta para el mejoramiento de las actividades realizadas en todos los segmentos de la industria Oil & Gas. A los integrantes del Instituto Colombiano del Petróleo, mi agradecimiento por su acompañamiento y recomendaciones para mejorar esta tesis.

A la empresa ECOPETROL S.A, le agradezco por darme la oportunidad de aprender y fortalecer los conocimientos adquiridos en el aula de clase acerca de la industria petrolera durante mis meses de práctica.

German Andrés Barragán Jaimes

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Antecedentes de la investigación	17
3. Marco teórico	20
3.1. Composición del cemento.....	20
3.2. Principal componente del Cemento Portland.....	21
3.2.1. Silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).....	23
3.2.2. Silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)	23
3.2.3. Ferritoaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)	23
3.2.4. Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)	24
3.3. Clasificación del cemento Portland	24
3.4. Propiedades fisicomecánicas del cemento	25
3.4.1. Densidad (ρ).....	25
3.4.2. Resistencia a la compresión	25
3.4.3. Módulo de Young (E)	26
3.4.4. Relación de Poisson (ν)	26
3.5. Propiedades del cemento a corto y largo plazo.....	26
3.6. Escenarios de falla del cemento.....	28
3.7. Modelos analíticos para el análisis de esfuerzo-deformación.....	29

3.7.1. Modelo de Kirsch.....	29
3.7.2. Modelo de Bradley.....	31
3.7.3. Modelo de Teodoriu.....	31
3.8. Métodos de elementos finitos	33
3.9. Software Abaqus.....	34
3.9.1. Módulo de Partes	35
3.9.2. Módulo de Propiedades.....	36
3.9.3. Módulo de Ensamblaje	36
3.9.4. Módulo de Pasos.....	36
3.9.5. Módulo de Interacción	37
3.9.6. Módulo de Carga.....	37
3.9.7. Módulo de Malla.....	37
3.9.8. Módulo de Optimización	38
3.9.9. Módulo de Trabajo.....	38
3.9.10. Módulo de Visualización	38
3.9.11. Módulo de Dibujo.....	38
4. Identificación de las variables críticas que afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento	39
5. Clasificación de los aditivos químicos y minerales (adiciones) comúnmente usados en el cemento.....	43
5.1. Aditivos que afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento en estado endurecido... 47	
5.1.1. Elastómeros.....	47
5.1.2. Látex	49

5.1.2.1. Mecanismo de acción del Látex.....	50
6. Metodología para el desarrollo del Modelo de Elementos Finitos en el software Abaqus.....	52
6.1. Suposiciones para el desarrollo del Método de Elementos Finitos.....	52
6.2. Geometría del modelo.....	53
6.3. Datos de entrada para el análisis.....	54
6.4. Pasos de carga y procedimiento de análisis.....	55
6.4.1. Paso Geostático.....	55
6.4.2. Paso de Perforación.....	56
6.4.3. Paso de Completamiento.....	56
6.4.4. Paso de Producción.....	57
6.5. Condiciones de carga y de frontera.....	59
6.6. Mallado y tipo de elemento.....	60
6.7. Verificación del modelo desarrollado.....	62
6.7.1. Validación del step Geostático.....	62
6.7.2. Validación del step de perforación.....	63
6.7.3. Validación del step de completamiento.....	64
7. Evaluación del comportamiento mecánico de dos sistemas de cemento fraguado.....	66
7.1. Input data para la evaluación.....	66
7.2. Comportamiento mecánico del cemento bajo diferentes escenarios.....	68
7.2.1. Evaluación de los sistemas de cemento en el escenario A.....	69
7.2.2. Evaluación de los sistemas de cemento en el escenario B.....	72
7.2.3. Evaluación de los sistemas de cemento en el escenario C.....	75
8. Conclusiones.....	78

9. Recomendaciones	79
Referencias Bibliográficas	80

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Composición química del cemento (% en masa)</i>	21
Tabla 2. <i>Composición química del Clinker (% en masa)</i>	22
Tabla 3. <i>Clasificación API y propiedades de tipos de Cementos.</i>	24
Tabla 4. <i>Propiedades del cemento a corto y largo plazo.</i>	27
Tabla 5. <i>Línea de tiempo.</i>	39
Tabla 6. <i>Clasificación de aditivos químicos o adiciones (minerales) utilizados comúnmente en el cemento</i>	43
Tabla 7. <i>Valores geométricos del modelo.</i>	53
Tabla 8. <i>Propiedades fisicomecánicas de los materiales.</i>	54
Tabla 9. <i>Pasos de carga y procedimientos de análisis en Abaqus</i>	58
Tabla 10. <i>Condiciones de frontera</i>	59
Tabla 11. <i>Condiciones de carga</i>	59
Tabla 12. <i>Descripción composicional de los sistemas de cemento</i>	67
Tabla 13. <i>Propiedades mecánicas de los sistemas de cemento y las formaciones</i>	68
Tabla 14. <i>Características de los escenarios</i>	68

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Fotografía microscópica del Clínker.</i>	22
Figura 2. <i>Escenarios de falla en la cubierta de cemento</i>	28
Figura 3. <i>Estado de esfuerzos radiales y tangenciales alrededor del orificio</i>	30
Figura 4. <i>Sección hemisférica discretizada en elementos de capa.</i>	34
Figura 5. <i>Micrografía SEM de un elastómero</i>	48
Figura 6. <i>Esfuerzo de tensión vs deformación unitaria</i>	49
Figura 7. <i>Microfisuras en cemento Portland fraguado</i>	50
Figura 8. <i>Cemento Portland modificado con Látex, ampliada 1200 veces.</i>	51
Figura 9. <i>Contracción volumétrica entre un cemento convencional y modificado con Látex.</i>	51
Figura 10. <i>Geometría del modelo construido en Abaqus</i>	53
Figura 11. <i>Encastre en la cara del pozo y condiciones de frontera en el paso Geostático</i>	55
Figura 12. <i>Presión del lodo en el paso de Perforación.</i>	56
Figura 13. <i>Presión hidrostática del fluido de completamiento.</i>	57
Figura 14. <i>Condiciones de carga y de frontera</i>	60
Figura 15. <i>Dibujo del modelo en Abaqus</i>	61
Figura 16. <i>Modelo enmallado con elementos CPS4R</i>	61
Figura 17. <i>Esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos en el paso Geostático</i>	62
Figura 18. <i>Equilibrio mecánico en la formación en el paso Geostático</i>	63
Figura 19. <i>Esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos en el paso de perforación</i>	64
Figura 20. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en el paso de completamiento</i>	65

Figura 21. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario A.....</i>	69
Figura 22. <i>Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario A.....</i>	70
Figura 23. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario A.</i>	71
Figura 24. <i>Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario A.</i>	71
Figura 25. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario B.....</i>	72
Figura 26. <i>Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario B.....</i>	73
Figura 27. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario B.</i>	74
Figura 28. <i>Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda, en el escenario B.</i>	74
Figura 29. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario C</i>	75
Figura 30. <i>Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario C</i>	76
Figura 31. <i>Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario C.....</i>	77

Figura 32. *Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario C..... 77*

Resumen

Título: Análisis del Efecto de Aditivos para el Mejoramiento de las Propiedades Fisicomecánicas del Cemento en Estado Endurecido mediante Simulación Numérica*

Autor: German Andrés Barragán Jaimes**

Palabras Clave: Simulación numérica, esfuerzo, aislamiento, presión, cemento, aditivo.

Descripción:

Diseñar una lechada de cemento adecuada y eficiente para una condición operativa específica dada, es un elemento importante para lograr el objetivo de brindar un aislamiento zonal efectivo. Los cambios de presión a los que se somete el sistema revestimiento-cemento-formación durante toda la vida productiva del pozo, generan grandes esfuerzos en la envoltura de cemento, que pueden originar que este falle por desunión o agrietamiento radial. Estudios encontrados en la literatura, han demostrado que la aplicación de aditivos como elastómeros, mejoran la elasticidad del cemento disminuyendo su módulo de Young, y con esto, su rigidez, obteniendo como resultado que se generen menos esfuerzos en su matriz. Por este motivo, en este trabajo de investigación se desarrolló un modelo bidimensional de un pozo, con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de dos sistemas de cementos con diferente contenido y composición de aditivos frente a dos formaciones de diferente rigidez en tres escenarios de aplicación de cargas estáticas de tipo presión en la pared interna del revestimiento. Para validar el modelo simulación durante las fases operativas de: perforación y completamiento, se utilizaron los modelos analíticos de Bradley y Teodoriu, obteniendo porcentajes de diferencia cercanas a cero a medida que aumentaba la distancia radial desde la cara del pozo. Los resultados de esfuerzos radiales y tangenciales observados desde un sistema de coordenadas cilíndricas permitieron evaluar el riesgo de falla por desunión y agrietamiento radial, validando que los sistemas de cemento dúctiles funcionan mejor que los rígidos en condiciones de cargas estáticas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleo. Director(a): Ph.D en Ingeniería de Petróleos Maika Karen Gambús Ordaz. Codirector(a): MSc. en Ingeniería de Hidrocarburos Karina Andrea Mayorga Ribero

Abstract

Title: Analysis of the Effect of Additives for the Improvement of the Physicomechanical Properties of Cement in Hardened State by Numerical Simulation *

Author(s): German Andrés Barragán Jaimes**

Key Words: Numerical simulation, stress, isolation, pressure, cement, additive.

Description:

Designing an appropriate and efficient cement slurry for a specific operating condition is an important element in achieving the objective of providing effective zonal isolation. The pressure changes to which the casing-cement-forming system is subjected during the entire productive life of the well generate large stresses in the cement sheath, which can cause it to fail by debonding or radial cracking. Studies found in the literature have shown that the application of additives such as elastomers, improve the elasticity of the cement, decreasing its Young's modulus, and with this, its stiffness, resulting in less stress in its matrix. For this reason, in this research work a two-dimensional model of a well was developed, with the objective of evaluating the mechanical behavior of two cement systems with different content and composition of additives against two formations of different stiffness in three scenarios of application of static loads of pressure type in the internal wall of the casing. To validate the simulation model during the drilling and completion operational phases, the Bradley and Teodoriu analytical models were used, obtaining percent differences close to zero as the radial distance from the wellbore face increased. The results of radial and tangential stresses observed from a cylindrical coordinate system allowed evaluating the risk of failure by debonding and radial cracking, validating that ductile cement systems perform better than stiff ones under static loads.

* Degree Project

** Faculty of Physicochemical Engineering. Petroleum Engineering Institute. Director(a): Ph.D. in Petroleum Engineering Maika Karen Gambús Ordaz. Co-director(a): MSc. in Hydrocarbon Engineering Karina Andrea Mayorga Ribero

Introducción

Un adecuado diseño de la lechada de cemento es considerado un factor clave para mantener la integridad del pozo, existen locaciones que poseen en subsuelo condiciones anormales de presión, temperatura y esfuerzos *in situ*, por lo tanto, para cementar estos tipos de pozos, se hace necesario mejorar las condiciones del cemento base con el uso de aditivos, que le permitan obtener un mejoramiento en sus propiedades fisicomecánicas, y así, proporcionar un aislamiento zonal efectivo durante todo el desarrollo productivo del pozo y su etapa de abandono (Le Roy et al., 2000).

Las condiciones extremas en pozos con altas presiones y temperaturas (High-Pressure / High-Temperature), en adelante (HPHT, por sus siglas en inglés), originan el reto de diseñar una lechada capaz de soportar los esfuerzos que se generan en el recubrimiento del cemento endurecido por los cambios en las condiciones operativas, evitando así, dar lugar a la generación de fallas mecánicas en el cemento como desunión en sus interfaces, deformación plástica y agrietamiento radial (Ugwu, 2008), que puedan causar daños ambientales, económicos y a la salud humana (Mayorga, 2021). Este trabajo de investigación analizará el fenómeno descrito a través del modelamiento numérico, con el cual, se podrá estudiar el efecto que ocasiona la aplicación de aditivos en las propiedades mecánicas del cemento ante cambios de presión.

Inicialmente, este trabajo describe los objetivos de la investigación, posteriormente, el capítulo 2 presenta los antecedentes de la investigación, en esta sección, se consultaron trabajos que abordaron, desde diferentes enfoques de investigación, el mismo objeto de estudio, entre estos se encuentran modelos de simulación numérica realizados, estudios a nivel de laboratorio del efecto de diferentes tipos de aditivos en el cemento y análisis mediante modelos analíticos del

comportamiento mecánico del mismo a condiciones anormales de presión y temperatura. El capítulo 3 presenta antecedentes también, de la composición química, propiedades fisicomecánicas y clasificación del cemento, siguiente a esto, expone los modelos analíticos de Bradley y Teodoriu utilizados para validar el modelo de simulación en los pasos de perforación y completamiento, y describe los módulos del software utilizado para desarrollar el modelo de simulación. En el capítulo 4 se muestra una línea de tiempo realizada con más de diez artículos técnicos, en los cuales, sus respectivos autores demostraron a partir de estudios, que las variables críticas que posiblemente más afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento son la presión, la temperatura, el volumen de hidratación y la excentricidad del revestimiento. El capítulo 5 proporciona una amplia clasificación con 18 artículos basados en estudios experimentales y de simulación, donde se muestra los tipos de aditivos en general utilizados en el cemento, su mecanismo de acción y beneficio, además, se realiza una descripción de los elastómeros y látex, ya que estos aditivos específicos afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento. En el capítulo 6 se describe el diseño de la metodología utilizada para el desarrollo del Modelo de Elementos Finitos en el software Abaqus con licencia estudiantil para estudiar el comportamiento de la envoltura de cemento, en esta sección, se presentan las suposiciones realizadas, los datos de entrada, la geometría del modelo, los pasos de carga y el procedimiento de análisis, posteriormente, el capítulo 7, presenta una evaluación de los resultados obtenidos en dos sistemas de cemento con diferente propiedades mecánicas (Módulo de Young y relación de Poisson) frente a dos tipos de formaciones con distinta rigidez, en tres escenarios de cambios de presión de pozo, Finalmente, los capítulos 8 y 9, muestran las conclusiones y recomendaciones, respectivamente.

1. Objetivos

A continuación, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación.

1.1. Objetivo General

Analizar el efecto de aditivos para el mejoramiento de las propiedades fisicomecánicas del cemento en estado endurecido mediante simulación numérica.

1.2. Objetivos Específicos

Identificar las variables críticas que afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento.

Clasificar los aditivos químicos y minerales (adiciones) comúnmente usados en el cemento mediante revisión bibliográfica.

Estudiar el efecto de la interacción del uso de aditivos en el cemento a través del modelamiento numérico del fenómeno mediante la aplicación de una herramienta software.

2. Antecedentes de la investigación

Desde hace varios años, diferentes autores han centrado sus estudios en el diseño de lechadas de cemento adecuadas para soportar cambios en las condiciones de presión y esfuerzos *in situ*, para lograr esto, se han apoyado en el uso de aditivos o adiciones que generan un mejoramiento en las propiedades físicas, químicas y mecánicas del cemento en estado fluido o fraguado y en la evaluación de su comportamiento mecánico a partir de modelos analíticos y de simulación numérica. Para el desarrollo de la presente tesis, se tuvieron en cuenta, libros, trabajos de grado y artículos relacionados con diversos temas afines a la investigación, los cuales brindaron un entendimiento del fenómeno estudiado.

Entre los primeros antecedentes se encuentra, Le Roy et al. (2000) con el Paper “New Cement Systems for Durable Zonal Isolation”, a través del cual, presentaron nuevos sistemas de cemento contruidos para evitar la pérdida de aislamiento zonal del pozo. Diseñaron diferentes lechadas de cemento que contenían aditivos expansores, dispersantes, antiespumantes y retardadores para evaluar su rendimiento en tres casos de la vida real, que integraban operaciones de fracturamiento hidráulico, inyección de vapor e incrementos del peso del lodo para perforar zonas salinas, concluyendo, que los cementos que contienen tanto aditivos flexibles como expansivos son los mejores sistemas para lograr una efectiva durabilidad mecánica a largo plazo en la envoltura de cemento, mediante el aumento de su elasticidad y la disminución de su permeabilidad en estado fraguado.

Thiercelin et al. (2001) desarrollaron el trabajo de investigación titulado “Cement Design Based on Cement Mechanical Response” con el objetivo de determinar los parámetros que controlan la respuesta mecánica del cemento fraguado, y así, cuantificar los daños de este, ante

variaciones de las condiciones de fondo de pozo, para esto, realizaron modelos de simulación numérica mediante el uso de elementos finitos, evaluando el comportamiento del cemento en los siguientes escenarios: Aumento de presión, temperatura y tensión exterior del pozo, como también, ante una disminución de la presión debido a la producción. Los resultados del análisis determinaron que las propiedades mecánicas del cemento fraguado deben seleccionarse a partir del conocimiento de diversos parámetros de la formación y de los tipos de carga previstos a los que se someterá la envoltura de cemento, además, también concluyeron que la integridad de la envoltura de cemento está en función de las propiedades mecánicas del cemento fraguado, la geometría del pozo revestido y las propiedades mecánicas de la roca.

Nelson & Guillot (2006), presentaron su libro titulado “Well Cementing” el cual, presenta una completa revisión científica de los fundamentos del proceso de cementación de pozos, incluyendo consideraciones de tipo ingenieril y cálculos operacionales. Si bien, todo el libro contiene información importante para el desarrollo de este trabajo de grado, los capítulos 2, 3 y 8 presentan un mayor acercamiento al tema investigado; En el capítulo 2, los autores hablan acerca del Cemento Portland, su clasificación, composición química, proceso de manufactura y fases de hidratación del clínker, etc. En el capítulo 3, se explica acerca de los aditivos usados en el cemento para el mejoramiento de sus propiedades y su mecanismo de acción, además de exponer sus efectos a largo y corto plazo, finalmente el capítulo 8, expone las propiedades mecánicas del cemento y describe los conceptos del comportamiento mecánico del mismo, tales como: esfuerzo, deformación, elasticidad lineal, termoelasticidad, poroelasticidad y comportamiento plástico.

Posteriormente, la disertación doctoral de Arias (2013), titulada “Use of Finite-Element Analysis to improve well cementing in HTHP conditions” mostró la construcción de un modelo de simulación tridimensional, mediante la implementación del método de elementos finitos, que

permitía incorporar materiales con propiedades mecánicas no lineales para predecir si la integridad de la envoltura cemento en condiciones HTHP podía fallar por desunión, agrietamiento radial o deformación plástica durante toda la vida del pozo. Concluyendo que los cementos que poseen un alto módulo de Young y una baja relación de Poisson y resistencia cohesiva pueden tener la mayor deformación plástica en condiciones HPHT, además, el análisis realizado demostró que las lechadas de cemento deben diseñarse con un módulo de Young inferior al de la formación y con una resistencia a la tensión lo suficientemente alta como para reducir las posibilidades de agrietamiento por tensión cuando aumenten la presión y la temperatura en el interior del revestimiento.

Tres años después, Bomá et al. (2016), realizaron el Paper “HPHT Well Integrity and Cement Failure”, en el cual, los autores presentaron un modelo analítico de la interacción del sistema revestimiento-cemento-formación en pozos verticales a través de un cilindro concéntrico que contiene relaciones matemáticas para modelar el fenómeno descrito, asimismo, también realizaron una revisión bibliográfica del efecto de altas presiones y temperaturas, de las propiedades mecánicas que debe tener la envoltura de cemento para ofrecer estabilidad al pozo, del efecto de la migración de gas y de la excentricidad del revestimiento, concluyendo que el modelo desarrollado puede utilizarse para tener una buena estimación de los esfuerzos en la envoltura de cemento y de las presiones de contacto en las interfaces de pozos verticales concéntricos.

Para el mismo año, Broni-Bediako et al. (2016) realizaron un artículo titulado “Oil Well Cement Additives: A review of the Common Types”, con el cual, presentaron una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de aditivos comúnmente utilizados en el cemento Portland para operaciones de cementación de pozos de petróleo y gas, describiendo su función y rango de

aplicabilidad, como también, exponiendo ejemplos de materiales empleados en cada categoría/tipo. El estudio permite comprender el rol de los diversos tipos de aditivos en el cemento y su importancia de implementarlos desde el diseño en locaciones donde las variaciones de presión y temperatura no permiten el adecuado uso de cementos convencionales que aseguren un aislamiento zonal efectivo por si solos durante la vida productiva y abandono del pozo.

Finalmente, Mayorga (2021), abordo en su trabajo de posgrado el tema titulado “Evaluación del comportamiento mecánico del cemento en el sistema revestimiento-cemento-formación” en él, la autora realizó un modelo numérico tridimensional del sistema revestimiento-cemento-formación basado en elementos finitos con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del cemento a condiciones de presión y temperatura en fondo de pozo, que incluye un análisis poroelastotermoplástico en la roca y elastotermoplástico en el revestimiento y cemento, logrando determinar el riesgo de falla por deformación plástica, agrietamiento radial y desunión en sus contactos, en dos sistemas de cemento de diferente rigidez.

3. Marco teórico

3.1. Composición del cemento

La norma europea define a los cementos como “Conglomerantes hidráulicos, esto es, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como al agua” (UNE-EN, 2011), cuya composición química se puede observar en la Tabla 1:

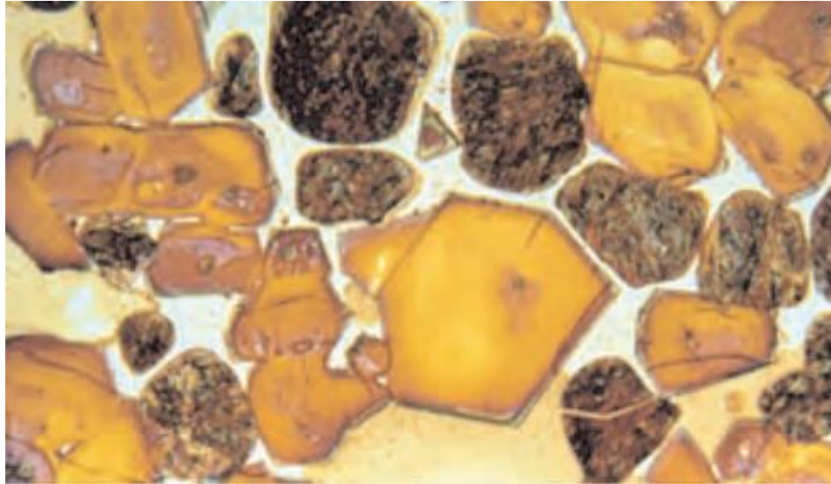
Tabla 1.*Composición química del cemento (% en masa)*

Parámetro	Rango Aproximado
Residuo insoluble	0,1 – 1,4
Óxido de Calcio (CaO)	58,2 – 65,6
Sílice (SiO ₂)	19,8 – 26,45
Alúmina (AL ₂ O ₃)	4,1 – 9,5
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2,1 – 4,5
Magnesia (MgO)	Trazas – 2,9
Álcalis (K ₂ O, Na ₂ O)	0,1 – 2,8
Sulfatos (SO ₃)	0,1 – 2,2
Pérdida por calcinación	0,2 – 2,8

Nota. Adaptado de (Sanjuán & Chinchón, 2004).

3.2. Principal componente del Cemento Portland

El cemento Portland se compone principalmente de Clínker, el cual, se obtiene por “sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros componentes en proporciones definidas” (Sanjuán & Chinchón, 2004). Su composición mineralógica determina las propiedades del cemento, conteniendo principalmente elementos en forma de óxidos como: CaO (60 -70%), SiO₂ (18–22%), Al₂O₃ (4–6%) y Fe₂O₃ (2–4%) (Nelson & Guillot, 2006), que, al reaccionar, generan las principales fases descritas en la Tabla 2.

Figura 1.*Fotografía microscópica del Clínker.**Nota.* Tomado de (Portland Cement Association, 2002).**Tabla 2.***Composición química del Clínker (% en masa)*

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	3CaO SiO_2	C_3S	46 - 79	61
Silicato bicálcico	2CaO SiO_2	C_2S	5 - 30	15
Ferritoaluminato tetracálcico	$4\text{CaO (Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_4(\text{A}, \text{F})$	4 - 16	8
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 - 18	12

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Cal libre	CaO	C	0,1 - 4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0,7 – 1,5	1,5

Nota. Adaptado de (Sanjuán & Chinchón, 2004).

3.2.1. *Silicato tricálcico* ($3CaO.SiO_2$)

Conocido de manera abreviada como C_3S , se forma de la reacción entre el sílice y el óxido de calcio, por lo que está presente en la mayoría de los cementos. Se compone mayoritariamente de Óxido de calcio y es el responsable de la resistencia temprana en el cemento, la cual, puede tomar de 1 a 28 días. Generalmente, se utiliza en cementos de alta consistencia por su endurecimiento rápido (ICP, 2014).

3.2.2. *Silicato dicálcico* ($2CaO.SiO_2$)

También llamado C_2S , es la fase de hidratación lenta del cemento que al igual que el C_3S cuando reacciona con agua produce calor y un compuesto químico llamado silicato de calcio hidratado CSH (ICP, 2014). Se origina cuando el Clínker no está completamente saturado de CaO y se forma a temperatura inferiores a 1000 [°C], si la temperatura aumenta hasta 1250 [°C] incorpora Ca^{2+} originando la fase C_3S (Sanjuán & Chinchón, 2004).

3.2.3. *Ferritoaluminato tetracálcico* ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)

Su nombre abreviado es C_4AF , es la fase que tiene mayor influencia en las propiedades reológicas de la lechada de cemento, en su formación de geles y su durabilidad (ICP, 2014). Dentro

de su composición contiene el mayor porcentaje de hierro y aluminio presente en el Clínker (Sanjuán & Chinchón, 2004).

3.2.4. Aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$)

Es la fase que tiene mayor predominio en el tiempo de bombeabilidad, se conoce de forma abreviada como C_3A y es el compuesto del Clínker con mayor contenido de Óxido de Calcio entre las fases de aluminato, su reacción al contacto con el agua es rápida, y sus propiedades hidráulicas permiten mejorar la resistencia a edades tempranas del cemento (Sanjuán & Chinchón, 2004). También se le atribuye como el responsable de que el cemento sea susceptible al ataque químico de los sulfatos (ICP, 2014).

3.3. Clasificación del cemento Portland

American Petroleum Institute (API, por sus siglas en inglés), ha clasificado de acuerdo con la composición y propiedades físicas, a nueve tipos de cemento, de los cuales, cinco modelos son comúnmente utilizados en la industria petrolera y se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3.

Clasificación API y propiedades de tipos de Cementos.

Tipo	Rango de utilización [ft]	Temperatura estática [°F]	Relación de Agua [Gal/Saco]	Peso de la lechada [lb/gas]	Volumen [ft ³ /saco]	Observaciones
Clase A	6000	60 – 170	5.2	15.6	1.18	Puede utilizarse cuando no se desean propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permiten. No hay resistencia a sulfatos.
Clase B	6000	60 – 170	5.2	15.6	1.18	Resistencia moderada a los sulfatos.

Tipo	Rango de utilización [ft]	Temperatura estática [°F]	Relación de Agua de Agua [Gal/Saco]	Peso de la lechada [lb/gal]	Volumen [ft ³ /saco]	Observaciones
Clase C	6000	60 – 170	6.3	14.8	1.32	Disponible en tipo regular y de alta resistencia a sulfatos. Cemento básico, compatible con aceleradores o retardantes para utilizarse en una gama completa de las clases A hasta la E.
Clase G	8000	200	5	15.8	1.15	Cemento básico de mayor densidad, así como mayor e inferior volumen de agua.
Clase H	8000	200	4.3	16.4	1.06	

Nota. Adaptado de (Halliburton, 2001).

3.4. Propiedades fisicomecánicas del cemento

3.4.1. Densidad (ρ)

Hace referencia a la relación existente entre una cantidad de masa (m) por unidad de volumen (v). Se expresa matemáticamente así:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Según Arias (2013), la densidad de una lechada de cemento convencional es de aproximadamente 15.8 libras por galón.

3.4.2. Resistencia a la compresión

Es la capacidad requerida en el cemento para soportar la cantidad de fuerza ejercida por las sargas de revestimiento, por lo general, se debe obtener como mínimo un cemento con 500 (psi) de resistencia a la compresión en la sección completada del pozo, antes de continuar perforando la siguiente (Halliburton, 2001).

3.4.3. Módulo de Young (E)

Es un parámetro que surge de la relación entre el esfuerzo unitario (σ) que se origina al aplicar una presión sobre un área y la deformación unitaria (ε), que es el cambio de longitud por unidad de longitud que sufre un material al someterse a un esfuerzo (Rayas et al., 2003).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Un alto módulo de Young (E) indica que el material es más difícil de deformarse al ser muy rígido. Comúnmente, el módulo de Young del cemento base de un pozo petrolero se encuentra entre $0.14 \text{ E}+6$ y $1.4 \text{ E}+6$ psi (Arias, 2013).

3.4.4. Relación de Poisson (ν)

Es un coeficiente que relaciona la deformación normal transversal y la deformación axial en una prueba de tensión o compresión simple, $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \sigma_z = 0$ según (Arias, 2013). La siguiente ecuación, expresa matemáticamente esta relación:

$$\varepsilon_y = -\nu \varepsilon_x \quad (3)$$

La relación de Poisson puede variar en los materiales en un rango desde 0 para materiales compresibles, hasta 0.5 para materiales prácticamente incompresibles, por ejemplo, la relación de Poisson para rocas débiles y altamente porosas se aproxima a cero. Por lo general, “La relación de Poisson de los cementos de pozo petrolero y de las rocas, se encuentra entre 0.05 y 0.25, y 0.15 y 0.25, respectivamente” (Arias, 2013).

3.5. Propiedades del cemento a corto y largo plazo

El recubrimiento de cemento debe estar diseñado para desarrollar unas propiedades definidas a corto y largo plazo, con el fin de conservar su integridad y brindar aislamiento zonal efectivo ante situaciones como la generación de una migración de fluidos petrolíferos una vez

terminada la etapa de cementación, hasta una eventual disminución de la envoltura de cemento causada durante las fases operativas posteriores como producción, estimulación, servicios de mantenimiento, cierres temporales y abandono del pozo (Bomá et al., 2016).

Las propiedades del cemento a corto plazo están relacionadas en su forma de lechada como finura, densidad, tiempos de fraguado y fluidez, y, a largo plazo, cuando el cemento se encuentra en estado endurecido, involucrando en esta forma, los parámetros necesarios para mantener la estabilidad del pozo ante los esfuerzos en que se encuentra sometido, entre estos están: el módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la compresión y tensión (Ravi et al., 2002; Arias, 2013).

Tabla 4.

Propiedades del cemento a corto y largo plazo.

Corto plazo (Forma de lechada)	Largo plazo (Forma endurecida)
Ambientalmente aceptable y aprobado para su uso	Térmicamente estable a condiciones de presión y temperatura de fondo de pozo
Tiene la densidad requerida	Resiste productos químicos de fondo de pozo
Mezclarse y bombearse fácilmente	Poseer las propiedades mecánicas para resistir los esfuerzos de diversas operaciones de fondo de pozo
No asentarse en condiciones estáticas y dinámicas	Ser detectado fácilmente por técnicas convencionales de registros
No tener agua libre	Proporcionar aislamiento zonal durante la vida útil del pozo
Tiempo de espesamiento deseado	
Pérdida de fluidos deseada	
Desarrollo de resistencia deseada	
Resistencia a influjos de fluido	

Nota. Adaptado de (Bosma et al., 1999).

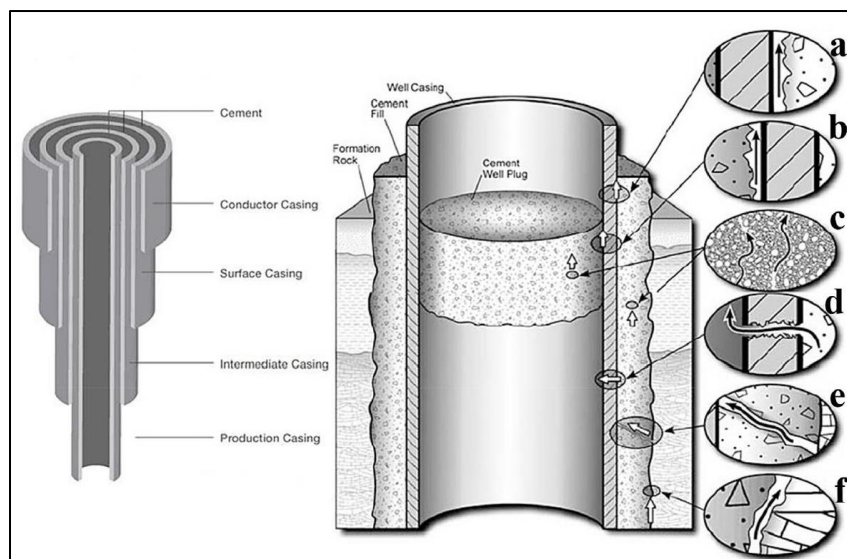
3.6. Escenarios de falla del cemento

Los fluidos provenientes del yacimiento o de formaciones aledañas al pozo, pueden migrar si el cemento falla, esto, ocasionaría daños ambientales, a la salud humana y económicos, que disminuirían la rentabilidad del proyecto.

Se definieron seis escenarios de la (a) hasta la (f) que generan un desequilibrio en la integridad del pozo; (a) Pérdida de la unión del cemento con el revestimiento, (b) Pérdida de la unión del tapón de cemento con el revestimiento, estos problemas se originan comúnmente por la contracción del cemento, (c) Migración del fluido de yacimiento por canales en el tapón de cemento, (d) Migración de fluidos de la formación hacia el pozo por corrosión y/o tectónica, (e) Agrietamiento del recubrimiento de cemento por inadecuado diseño de la lechada y/o tectónica, (f) Desunión de la interfaz roca-cemento (Mohamadian et al., 2020). Los anteriores casos descritos se ilustran a continuación:

Figura 2.

Escenarios de falla en la cubierta de cemento



Nota. Tomado de (Mohamadian et al., 2020).

3.7. Modelos analíticos para el análisis de esfuerzo-deformación

La perforación de un pozo vertical u horizontal origina esfuerzos sobre la roca que suelen provocar perturbaciones en los esfuerzos *in situ*. Por lo general, si la tensión inducida es mayor que la resistencia de la roca, la abertura se deforma y se vuelve inestable (Behnam & Majid, 2021).

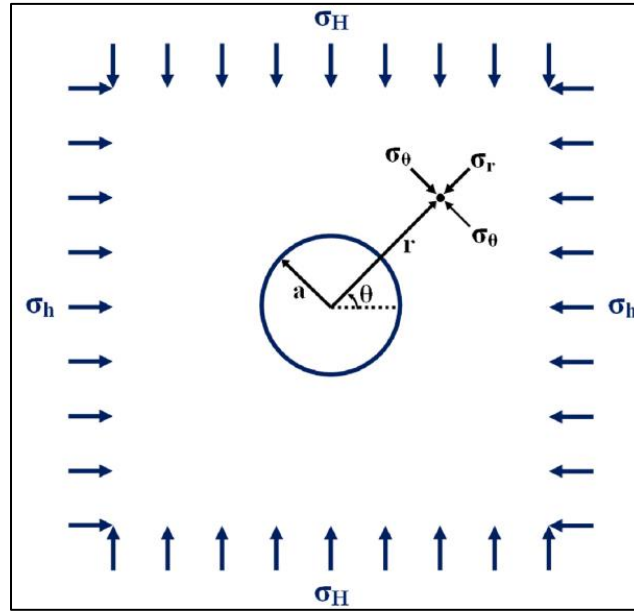
Comúnmente, se realiza un análisis estructural de esfuerzos para evaluar la estabilidad, deformabilidad y redistribución del orificio situado en el macizo rocoso durante el proceso de perforación, basado en diversos métodos teóricos y numéricos, que, son considerados la base para el desarrollo de modelos de simulación numérica (Palencia, 2018). A continuación, se explicarán los modelos comúnmente más utilizados en el análisis esfuerzo-deformación.

3.7.1. Modelo de Kirsch

Publicado por Kirsch (1898), es a la fecha, uno de los métodos más utilizados para estudiar el estado de concentración de esfuerzos y desplazamientos alrededor de un orificio circular en una placa delgada, de material isótropo, comportamiento lineal y dimensiones infinitas. (Susca et al., 2007; Palencia, 2018; Behnam & Majid, 2021; Mayorga, 2021). Como se observa en la Figura 3, en el método de Kirsch, el orificio circular de radio "a" se ve afectado por el esfuerzo horizontal máximo (σ_H) y mínimo (σ_h) *in situ*. Además, en un sistema de coordenadas polares, cada punto dentro o fuera del límite del orificio, tiene una coordenada dada por una distancia desde el centro (r) y un ángulo contrario al eje x (θ) (Behnam & Majid, 2021).

Figura 3.

Estado de esfuerzos radiales y tangenciales alrededor del orificio



Nota. Las dimensiones no están a escala. Tomado de: (Behnam & Majid, 2021).

El esfuerzo radial (σ_r) y tangencial (σ_θ), puede ser calculado en coordenadas cilíndricas a partir de las siguientes ecuaciones. (Kirsch, 1898 ; Jaeger et al., 2007 ; Zoback, 2007)

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left[1 - 4 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right] \cos(2\theta) \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left[1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left[1 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right] \cos(2\theta) \quad (5)$$

Donde:

σ_r y σ_θ son los esfuerzos radiales y tangenciales, respectivamente, *psi*

σ_H y σ_h son los esfuerzos horizontales máximo y mínimo, respectivamente, *psi*

a es el radio del orificio, *in*

θ es el ángulo azimutal con respecto al eje x, *rad*

r es la distancia radial desde el eje del pozo, *in*

Las dimensiones del paralelogramo que representa la formación en este trabajo de investigación se ha diseñado de tal manera que satisfaga una longitud mayor a 10 veces el radio del pozo y con esto, sea lo suficientemente grande para representar las condiciones de frontera infinita.

3.7.2. Modelo de Bradley

Para representar los esfuerzos que se originan alrededor de un pozo vertical posterior a la operación de perforación, Bradley (1979), a partir de las ecuaciones del modelo de Kirsch, desarrolló las siguientes ecuaciones en coordenadas polares:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right] + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left[1 - 4\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right] \cos(2\theta) + \tau_{xy} \left(1 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4 - 4\left(\frac{a}{r}\right)^2\right) \operatorname{sen}(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left[1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2\right] - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left[1 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right] \cos(2\theta) - \tau_{xy} \left(1 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \operatorname{sen}(2\theta) - P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (7)$$

Donde:

τ_{xy} = Esfuerzo cortante.

P_w = Presión en el interior del hoyo.

Para el análisis de este trabajo de investigación, se desprecia el efecto del esfuerzo cortante en el modelo de Bradley, por lo tanto $\tau_{xy} = 0$. Este modelo analítico fue utilizado para validar el *step* de perforación.

3.7.3. Modelo de Teodoriu

Considerando el revestimiento como un cilindro de paredes delgadas y la envoltura de cemento y de la formación como uno de paredes más gruesas, Teodoriu et al. (2010) publican un

artículo con el cual, presentan el desarrollo matemático que válida su modelo analítico para el cálculo de los esfuerzos radiales y tangenciales en función de parámetros como la distancia radial del revestimiento, cemento y la formación, los diferenciales de presión entre las superficies de contacto, los módulos de Young y las relaciones de Poisson de los materiales, entre otros.

Las presiones de contacto entre las interfaces cemento-revestimiento y cemento-formación se calculan como P_{c1} y P_{c2} , respectivamente, así:

$$P_{c1} = \left\{ \frac{[(1+v_s)r_a\alpha_s\Delta T_1] - [(1+v_c)r_c\alpha_c\Delta T_2] + \frac{P_i r_a}{E_s} \left[\frac{r_m}{t_s} (1-v_s^2) - (v_s+v_s^2) \right]}{\frac{r_c}{E_c} \left[(1-v_c^2) \frac{b^2+c^2}{c^2-b^2} - (v_c+v_c^2) \right] + \frac{r_a}{E_s} \left[\frac{r_m}{t_s} (-1+v_s^2) + (v_s+v_s^2) \right]} \right\} \quad (8)$$

$$P_{c2} = \left\{ \frac{[(1+v_f)r_f\alpha_s\Delta T_3] - [(1+v_c)r_c\alpha_c\Delta T_2] + \frac{P_f}{E_f} \left[\frac{2d^2}{d^2-c^2} (1-v_f^2) - (v_f+v_f^2) \right]}{\frac{1}{E_c} \left[(1-v_c^2) \frac{b^2+c^2}{c^2-b^2} - (v_c+v_c^2) \right] + \frac{1}{E_f} \left[\frac{2d^2}{d^2-c^2} (1-v_f^2) - (v_f+v_f^2) \right]} \right\} \quad (9)$$

Utilizando las ecuaciones de Lamé, se calcula el esfuerzo radial y tangencial en el cemento, de la siguiente manera:

$$\sigma_{r-cemento} = P_{c1} \frac{b^2}{c^2-b^2} \left[1 - \frac{c^2}{r^2} \right] - P_{c2} \frac{c^2}{c^2-b^2} \left[1 - \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (10)$$

$$\sigma_{\theta-cemento} = P_{c1} \frac{b^2}{c^2-b^2} \left[1 + \frac{c^2}{r^2} \right] - P_{c2} \frac{c^2}{c^2-b^2} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (11)$$

Donde:

a = radio interno del revestimiento

b = radio externo del revestimiento

c = radio externo del cemento

P_i = Presión interna

P_f = Presión de formación

E_s, E_c, E_f = Módulos de Young del revestimiento, cemento y formación

ν_s, ν_c, ν_f = Relación de Poisson del revestimiento, cemento y formación

$\alpha_s, \alpha_c, \alpha_f$ = Coeficientes de expansión térmica del revestimiento, cemento y formación

$\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ = Diferenciales de temperatura a través de las superficies del revestimiento, cemento y formación.

Este modelo analítico fue utilizado para validar el modelo de simulación numérica construido en el software Abaqus durante el paso (step) de completamiento, cuando ya se encuentran interactuando entre sí, todos los elementos del sistema revestimiento-cemento-formación que componen un pozo.

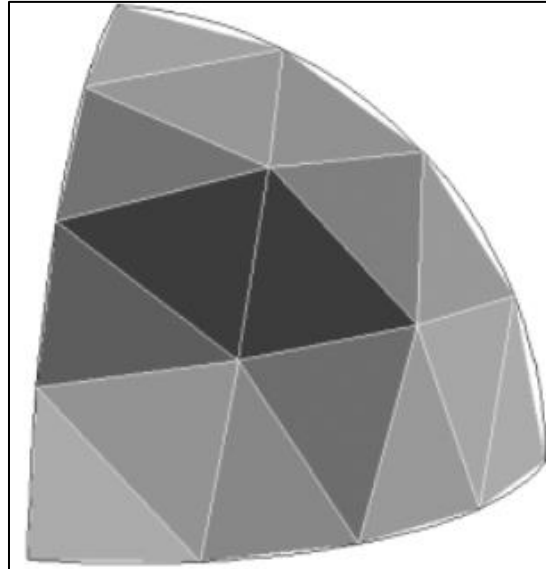
3.8. Métodos de elementos finitos

Conocido de forma abreviada como FEM, por sus siglas en inglés, es un método numérico que busca una solución aproximada a un sistema de ecuaciones diferenciales en un dominio establecido del problema, en el cual, se obtienen los resultados en puntos específicos conocidos como nodos, esto, debido a la dificultad de resolver de forma exacta dichos sistemas de ecuaciones a partir de métodos analíticos (Mayorga, 2021).

La solución se obtiene dividiendo el dominio del problema en varios elementos de geometría simple como por ejemplo triángulos o cuadrados, de tal forma que se pueda aplicar las leyes físicas conocidas a cada uno de los pequeños elementos, y así, lograr que una función continua de una variable de campo desconocida se aproxime usando funciones lineales por partes en cada subdominio, llamado también elemento formado por nodos (Liu & Liu, 2003), como se observa en la Figura 4.

Figura 4.

Sección hemisférica discretizada en elementos de capa.



Nota. Adaptado de (Liu & Liu, 2003)

3.9. Software Abaqus

Compuesto principalmente de cuatro programas de simulación numérica basados en el método de elementos finitos, proporciona soluciones para problemas de ingeniería y ciencias, a través del modelamiento de materiales en procedimientos con dinámica explícita, tensión estructural, difusión de fluidos por medios porosos, transferencia de calor, etc. (Dassault Systemes, 2022).

El primer programa de simulación es Abaqus/CAE, el cual, contiene un entorno interactivo de interfaz sencilla que está dividida en once módulos, los cuales, se deben realizar en orden lógico, para crear y enviar modelos de elementos finitos, asimismo, supervisar y diagnosticar trabajos con el fin de evaluar los resultados de las simulaciones (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

El segundo programa de simulación es Abaqus/Standard, el cual, utiliza una tecnología de solución para eventos de tipo estático y dinámico de moderada velocidad donde es importante obtener soluciones de tensión con alta exactitud (Dassault Systemes, 2022). Recibe un archivo de entrada para realizar un análisis y enviar la información a Abaqus/CAE, posteriormente, monitorea todo el proceso de la corrida de simulación hasta generar una base de datos de salida (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

El tercer programa de simulación llamado Abaqus/Explicit, es adecuado para simular eventos dinámicos transitorios breves y cuasi-estáticos. Una característica importante del segundo y tercer programa es que los resultados obtenidos en cualquier punto dentro de una ejecución de Abaqus/Explicit pueden ser utilizados como las condiciones de inicio para la continuación en Abaqus/Standard y viceversa (Dassault Systemes, 2022).

Finalmente, el cuarto programa de simulación es Abaqus/Viewer, con el cual, a través de la lectura de la base de datos de salida, se pueden ver gráficamente los resultados del análisis (Dassault Systemes, 2022), ya que cuenta con la capacidad de post-procesamiento del modelo simulado mediante el módulo de visualización (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.1. Módulo de Partes

Permite crear, editar y gestionar las piezas del modelo actual, almacenando cada parte en forma de lista ordenada. (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014). Los parámetros para construir una parte en un modelo son:

- *Espacio de modelado*: Representa el tipo de plano del modelo, si este es 2D, 3D o axisimétrico.
- *Tipo*: Hace referencia a las características del modelo, si es deformable, rígido discreto, euleriano o rígido analítico.

- *Característica base:* Simboliza la geometría de la parte, si está presente una forma de placa, cable o punto. En caso de ser un modelo 3D se debe especificar si el parámetro de creación es por extrusión, revolución o barrido.

3.9.2. Módulo de Propiedades

En este módulo se crean y definen el tipo de propiedades generales de los materiales, por ejemplo: mecánicas, térmicas, eléctricas o magnéticas, posteriormente, se generan secciones para establecer estas propiedades, procediendo a asignarlas y orientarlas en cada parte o pieza generada (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.3. Módulo de Ensamblaje

Cuando se crea un modelo que contiene diferentes partes, cada una de estas piezas posee su propio sistema de coordenadas, se utiliza este módulo para crear instancias con cada una de esas partes, acoplándolas y posicionándolas entre sí, en un sistema de coordenadas global (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.4. Módulo de Pasos

Se utiliza para crear pasos de análisis, con el fin de proporcionar una manera conveniente de capturar los cambios en las condiciones de contorno y carga en el modelo de simulación, además, también permite especificar las variables de respuesta mediante solicitudes de salida a los pasos de análisis posteriores, accediendo también a la definición y especificación de controles en regiones de malla adaptable mediante la herramienta de mallado adaptativo (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

En este módulo, existen el paso Inicial, creado de manera única, automática, no editable e irremplazable por Abaqus/CAE, para definir las condiciones de contorno, interacciones a lo largo del análisis y campos predefinidos, que se apliquen al principio del análisis, de manera siguiente,

se pueden crear uno o varios pasos, los cuales, están asociados a un procedimiento para definir el tipo de análisis que se desarrollará durante el modelo, estos pueden ser: esfuerzos estáticos o dinámicos, deformaciones, campos geoestáticos de esfuerzos, temperatura, etc. (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014; Palencia, 2018; Mayorga, 2021).

3.9.5. Módulo de Interacción

Este módulo se utiliza para definir la interacción entre los contactos de las piezas ensambladas, precisar los fundamentos elásticos, generar condiciones a la película térmica, restringir las ecuaciones, etc. Cuando se define una interacción, se debe indicar en que pasos del análisis está activa, ya que son objetos dependientes de los pasos (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.6. Módulo de Carga

Este módulo es utilizado para definir y gestionar las condiciones de carga y de frontera inicial a las que se somete el modelo de simulación en áreas predefinidas, asimismo, para ver y manipular el historial de pasos de las condiciones prescritas, que al igual que la interacción entre los contactos, son objetos dependientes de los pasos de análisis en los que están activos. Estos casos de carga pueden ser creados en perturbación estática y en estado estacionario-dinámico (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.7. Módulo de Malla

Permite enmallar las partes/piezas creadas en Abaqus/CAE, definiendo el tipo, la geometría y densidad de los elementos a nivel local y global, además de proporcionar una coloración del modelo que indica la técnica de malla asignada a cada región, con la finalidad de refinar u optimizar el mallado (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.8. Módulo de Optimización

Este módulo permite crear una tarea de optimización que se ejecute en el módulo de trabajo para optimizar la forma del modelo, teniendo en cuenta un conjunto de funciones objetivo y restricciones. Asimismo, también se pueden crear respuestas de diseño y condiciones de parada (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.9. Módulo de Trabajo

Este módulo se utiliza una vez finalizada la definición de geometría del modelo, asignación de las propiedades de las secciones e interacciones, para crear, gestionar y supervisar los trabajos de análisis, así como ver gráficos sencillos de los resultados. Además, tiene una opción de crear sólo el archivo de entrada de análisis para el modelo (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.10. Módulo de Visualización

Este módulo proporciona visualización gráfica de los elementos finitos para los resultados del análisis de formas deformadas y no deformadas, contornos, orientación de materiales, símbolos, gráficas en dos dimensiones, animaciones de la historia del tiempo, etc. Para generar estos resultados obtiene la información de la base de datos modelo (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

3.9.11. Módulo de Dibujo

Se utiliza para crear, gestionar y modificar aquellos perfiles bidimensionales que no se encuentran asociados a una pieza creada de forma nativa en el módulo de partes, por esta razón, son también llamados dibujos independientes. Las piezas bidimensionales dibujadas pueden convertirse en tridimensionales a partir de extrusión, revolución o barrido (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

4. Identificación de las variables críticas que afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento

La selección de las variables críticas que afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento, se realizó mediante una revisión bibliográfica. A continuación, se presentan las posibles variables críticas encontradas:

- Presión.
- Temperatura.
- Volumen de hidratación del cemento.
- Excentricidad del revestimiento.

Tabla 5.

Línea de tiempo.

Año	Variable	Concepto citado	Autor(es)
2000	Temperatura	“Los materiales de aislamiento zonal pueden perder su integridad debido a los esfuerzos inducidos por los cambios de presión/temperatura durante su funcionamiento”	(Bosma et al., 2000)
2000	Presión	“Los daños mecánicos son causados por grandes aumentos de la presión del pozo o la carga de la formación, y crean una vía de alta conductividad para cualquier fluido”	(Le Roy et al., 2000)
2002	Temperatura	"Características importantes como la viscosidad de rendimiento y la viscosidad plástica suelen disminuir con el aumento de la temperatura"	(Shaughnessy & Helweg, 2002)

Año	Variable	Concepto citado	Autor(es)
2003	Presión	"Una parte de la envoltura de cemento podría agrietarse o fallar en tensión si el revestimiento se expande por un aumento de la presión dentro del mismo"	(McCulloch et al., 2003)
2003	Volumen de hidratación	"La envoltura de cemento podría agrietarse o fallar en tensión como resultado de la contracción del cemento debido a la reducción del volumen de hidratación"	(McCulloch et al., 2003)
2003	Volumen de hidratación	"Puede ocurrir una falla por cizallamiento debido a diferencias en los esfuerzos principales, como resultado de una disminución en el esfuerzo de compresión tangencial que puede producirse durante la contracción del cemento"	(McCulloch et al., 2003)
2005	Temperatura	"A temperaturas de pozo superiores a los 230 (°F), el gel C-S-H se somete a una metamorfosis, que suele provocar una disminución de la resistencia a la compresión del cemento"	(Rubiandini et al., 2005)
2011-2012	Presión - Temperatura	"Los cambios de temperatura y presión hacen que se formen grietas en el cemento que forman una vía para la migración de gas a la superficie, comprometiendo así la integridad de la capa de cemento"	(Yetunde & Ogbonna, 2011; Shadravan & Amani, 2012)
2012	Excentricidad del Revestimiento	"Cuando el revestimiento no está bien centrado en el pozo, el fluido fluirá por el camino más ancho en lugar del lado estrecho, esto da lugar a una distribución parcial de la velocidad"	(Zhaoguang et al., 2012)

2012	Presión - Temperatura	“En el proceso de completamiento y producción de pozos, la disminución de la presión y la variación de la temperatura con el tiempo pueden contribuir a una falla en el cemento y a problemas de estabilidad del pozo”	(Zhaoguang et al., 2012)
Año	Variable	Concepto citado	Autor(es)
2015	Temperatura	“Las variaciones de temperatura entre la formación y la envoltura de cemento también pueden instigar varios modos de fallo que amenazan la integridad del sellado del cemento fraguado”	(De Andrade et al., 2015).
2016	Excentricidad del Revestimiento	"Cuando la excentricidad del revestimiento es alta, el fluido en el espacio anular prefiere fluir por el lado estrecho. La colocación no uniforme del cemento crea vacíos que pueden ser invadidos posteriormente por fluidos"	(Bomá et al., 2016)
2018	Presión	“Los cambios de presión durante el ciclo de vida del pozo pueden dar lugar a varios mecanismos de falla que podrían suponer una amenaza para la integridad del sellado del cemento fraguado”	(Oluseun & Salaheldin, 2018)
2019	Temperatura	"El enfriamiento y calentamiento intermitente provoca expansiones y contracciones que rompen la unión entre el revestimiento y cemento, permitiendo que el gas migre fácilmente a través de microanillos"	(Phi et al., 2019)
2020	Presión - Temperatura	“Pueden producirse microanillos y/o canalizaciones de gas en la capa de cemento, debido a la expansión y contracción consecutivas del revestimiento y	(Mohamadian et al., 2020)

		de la cubierta de cemento como resultado de los choques térmicos y de presión cuando las condiciones del lodo dentro de la tubería de revestimiento cambian significativamente”	
2022	Presión - Temperatura	"El fallo por cizallamiento es típico cuando la temperatura y/o presión del pozo aumentan, cuando la formación es rígida (alto módulo de Young) o cuando la envoltura de cemento se encuentra entre dos tuberías de revestimiento"	(Al-Yami et al., 2022)
Año	Variable	Concepto citado	Autor(es)
2022	Volumen de hidratación	"El agrietamiento en el cemento puede producirse cuando la interfaz cemento-formación está adherida y la interfaz revestimiento-cemento no lo está, en este caso, la envoltura de cemento tiende a contraerse"	(Al-Yami et al., 2022)
2022	Temperatura	“El aumento de la temperatura también producirá el efecto de empuje del revestimiento, principalmente debido a la dilatación térmica, en una configuración confinada este empuje puede provocar un fallo por cizallamiento en el cemento”	(Al-Yami et al., 2022)

Para esta investigación, se toma en consideración la variable presión como escenario de análisis del comportamiento envoltura de cemento.

5. Clasificación de los aditivos químicos y minerales (adiciones) comúnmente usados en el cemento

Existen locaciones donde los pozos petroleros se deben cementar a condiciones extremas de presión y temperatura, por ejemplo, en pozos HPHT, geotérmicos o ubicados en zonas de permafrost, donde el diseño de la lechada debe contemplar el uso de aditivos que se ajusten a los requerimientos que exige la locación, estos, se agregan directamente en la mezcla y pueden encontrarse en forma líquida o en polvo (Halliburton, 2001).

Mediante una revisión bibliográfica, se realizó la clasificación de los aditivos químicos y minerales comúnmente usados en el cemento. La tabla que se muestra a continuación fue modificada de (Nelson & Guillot, 2006) con más ejemplos de aditivos extraídos de artículos técnicos, y, está dividida en:

- *Tipo de trabajo*: Se refiere al nombre asignado al tipo de aditivo específico.
- *Beneficio*: Describe la mejora realizada en el cemento al usar el tipo aditivo.
- *Mecanismo de acción*: Expresa la forma o manera de actuar química o físicamente el aditivo en el cemento al utilizarse.
- *Ejemplos*: Lista nombres de aditivos utilizados, según su mecanismo de acción, en cada tipo de trabajo.

Tabla 6.

Clasificación de aditivos químicos o adiciones (minerales) utilizados comúnmente en el cemento

Tipo de trabajo	Beneficio	Mecanismo de acción	Ejemplos
------------------------	------------------	----------------------------	-----------------

Aceleradores	Disminuyen el tiempo de espesamiento y fraguado, además generan mayor resistencia a la compresión	Aumentan la permeabilidad en la capa de la fase C-S-H ² .	CaCl ₂ ¹ , NaCl ¹ , Agua Salada ¹
		Formación de núcleos de fase C-S-H por reacción con iones Ca ²⁺	Silicato de Sodio ²
		-	NaOH ² , KOH ² , NH ₄ OH ² , Harina de sílice ⁴ , Ca(HCOO) ₂ ² , Ca(NO ₂) ₂ ⁵ , Ca(NO ₃) ₂ ⁶ , trietanolamina ⁶
Tipo de trabajo	Beneficio	Mecanismo de acción	Ejemplos
Retardantes	Incrementan el tiempo de espesamiento y fraguado	Adsorción en la capa de la fase C-S-H, reduciendo la permeabilidad ² .	Ácidos orgánicos ¹ , Lignosulfonatos ²
		Prevención de la nucleación y crecimiento de los productos de hidratación ² .	Organofosfonatos ²
		Precipitación de sólidos impermeables en la capa de la fase C-S-H ² .	Ciertos Compuestos inorgánicos ²
		-	Polímeros sintéticos ¹ , Agua salada saturada ¹ , compuestos sacáridos ² , Borax ² , Hidroxipropilmetilcelulosa ⁴ , Carboximetil Hidroxietilo Celulosa ⁴ , Lignosulfonato de calcio ⁴ , NaCl ⁴ , ZnO ⁷
Dispersantes		Repulsión electrostática	Lignosulfonatos ² , sulfonato de poliestireno ²

		inducida de los granos de cemento ² .	
	Reducen la fricción disminuyendo la viscosidad	Obstáculo estérico que impide la floculación de los sólidos del cemento ² .	Ácidos orgánicos ¹
		-	Sal ¹ , Sulfonato de polimelamina ² , Humo de sílice condensado ⁴ , Sulfonato de polinaftaleno ⁴ , Policarboxilatos ⁸ , Polivinilpirrolidona ¹³
Tipo de trabajo	Beneficio	Mecanismo de acción	Ejemplos
Pérdida de filtrado	Controlan la pérdida de filtrado de la lechada hacia la formación	Aumento de la viscosidad de la fase acuosa ² .	Celulosa ¹ , polímeros celulósicos ²
		Reducción de la permeabilidad de la torta de filtración de cemento ² .	poliaminas ² , Polímeros aromáticos sulfonados ²
		Puente de partículas a través de la torta de filtración de cemento ² .	Bentonita ² , Cloruro de Vinilideno ⁹ , Acetato de polivinilo ¹⁰ , Estireno-Butadieno ¹¹
		-	carbón ² , microsílíce ² , asfaltenos ² , resinas termoplásticas ² , Galactomanos ² , Hidroxietilcelulosa ⁴ , Microgeles de alcohol polivinílico ¹² , Policationes ¹⁴
Antiespumantes	Previene los problemas de espumas reduciendo el arrastre de aire durante el mezclado	Insoluble en el sistema espumante ² .	Éteres de poliglicol ²
		Menor tensión superficial que el	Siliconas ¹

		sistema de espumación ² .	
		-	Diesel ¹ , Polipropilenglicoles ⁴
Extensores	Se usa como material de relleno para reducir la densidad y costo de la lechada	Absorción de agua ² .	Bentonita ¹ , Atapulgita ²
		Formación de la fase C-S-H + absorción de agua ² .	Silicato de Sodio ² , Puzolanas ²
		Densidad inferior a la del cemento ² .	Gilsonita ¹ , Carbón en polvo ² , Microesferas ²
		Cemento espumado ² .	Nitrógeno ²
		-	Ceniza Volante ² , Perlita ² , Silice ²
Tipo de trabajo	Beneficio	Mecanismo de acción	Ejemplos
Densificantes	Aumentan la densidad de la lechada	Mayor densidad que el cemento ² .	Hematita ¹ , Barita ¹ , Arena Ottawa ¹ , Sal ¹ , Ilmenita ² , Tetraóxido de Manganeso ²
Pérdida de circulación	Reduce la pérdida de circulación de la lechada en la formación	Efecto puente a través de la formación ² .	Materiales granulados ¹ , Gilsonita ² , Carbón granulado ² , Celofán ¹ , Cáscara de nuez ² , Materiales fibrosos ¹
		Comportamiento tixotrópico inducido de los lodos ² .	Bentonita gruesa ² , Yeso ²
		-	Granos de maíz ² , virutas de formica ² , fibras de vidrio ³ , polímeros sintéticos ³
Expansores	Previene la contracción del volumen de cemento	-	Sulfoaluminato de calcio ¹⁵ , CaO ¹⁵ , MgO ¹⁶ , Ceniza volante ¹⁷ , Látex poliméricos ¹⁸
Reforzadores	Aumenta la resistencia a la tensión, a la flexión, y	Transmisión de esfuerzos localizados en toda	Vidrio ² , polímeros elásticos ² , Microredes

da más tenacidad al cemento. la matriz de cemento de manera más uniforme². metálicas², Caucho molido², Látex²

Trazadores radiactivos	Determina más fácil la ubicación del cemento detrás del revestimiento	Emisión de radiactividad ² .	Yodo-131 ² , Iridio-192 ²
-------------------------------	---	---	---

Nota. Adaptado de: (1, Halliburton, 2001) & (2, Nelson & Guillot, 2006) & (3, Messier et al., 2002) & (4, Ning et al., 2021) & (5, Angstadt & Hurley, 1963) & (6, Tokay, 1982) & (7, Ramachandran, 1986) & (8, Volpert, 2002) & (9, Eberhard & Park, 1958) & (10, Woodard & Merkle, 1964) & (11, Parcevaux et al., 1985) & (12, Audebert, 1997) & (13, Boncan & Gandy, 1986) & (14, Wahl & Dever, 1963) & (15, Anon, 2014) & (16, Rubiandini et al., 2005) & (17, Chen et al., 2017) & (18, Wang et al., 2018; Nikbin & Golshekan, 2018; Mignon et al., 2017).

5.1. Aditivos que afectan las propiedades fisicomecánicas del cemento en estado endurecido

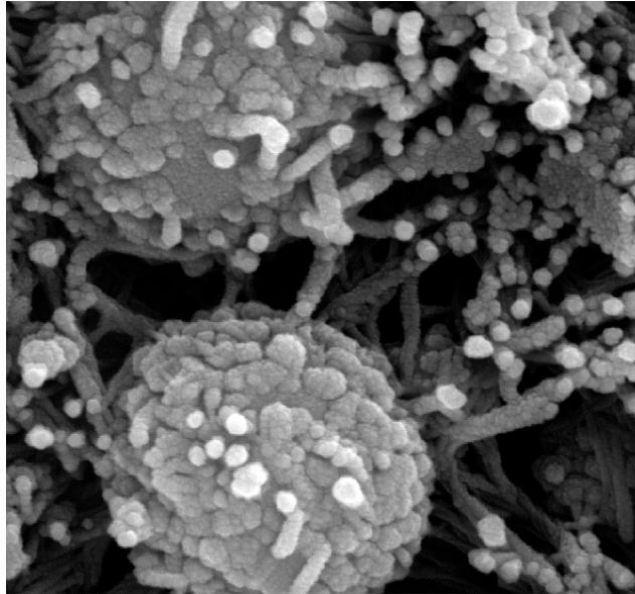
Los Elastómeros y el Látex son aditivos que se añaden al cemento con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas en estado endurecido, proporcionando un adecuado aislamiento zonal durante varios años mediante el aumento de la resistencia a la tensión, flexión e impacto, debido a que estas propiedades son afectadas por los esfuerzos que se pueden originar durante la producción, cañoneo o fracturamiento, así como también por el movimiento natural de las formaciones (Shi et al., 1995; Le Roy-Delage et al., 2000; Bosma et al., 2000).

5.1.1. Elastómeros

Son polímeros elásticos que contienen entre 0.1% y 1% de monómeros carboxilatos, que aumentan la flexibilidad y la resistencia del cemento ante cambios de presión en el pozo, mejorando notoriamente con esto la adherencia entre las interfaces cemento-revestimiento y cemento-formación. La Figura 5 presenta una micrografía de un elastómero.

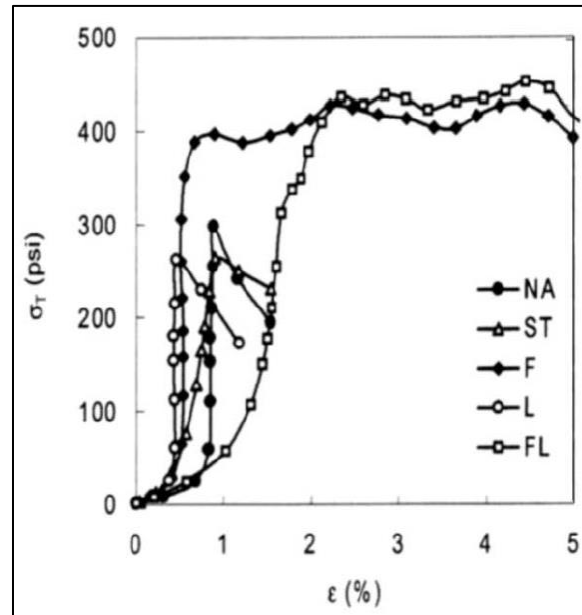
Figura 5.

Micrografía SEM de un elastómero



Nota. Tomado de (Soltanian et al., 2016)

Una característica destacada de este material es que posee una alta relación de Poisson (cercana a 0.5), por lo que se agrega al cemento con el fin de lograr aumentar esta misma propiedad en su matriz, haciéndolo prácticamente incomprensible. En la Figura 6, se presentan cinco formulaciones de cemento: Cemento sin aditivo (NA), Cemento estándar (ST), Cemento con fibra (F), Cemento con látex (L) y Cemento con fibra y látex (FL), en la cual, este último sistema de cemento (FL), muestra una mayor resistencia a la tensión respecto a las otras formulaciones, debido a su elasticidad.

Figura 6.*Esfuerzo de tensión vs deformación unitaria*

Nota. Tomado de (Soltanian et al., 2016)

En definitiva, las formulaciones en las que se utilicen elastómeros tendrán mayor relación de Poisson y menor módulo de Young, con lo cual, podrán distribuir más uniformemente los esfuerzos de tensión a los que esté sometido (Soltanian et al., 2016). Esta investigación contempla el análisis elástico del comportamiento de dos sistemas de cemento con distinta concentración de elastómeros.

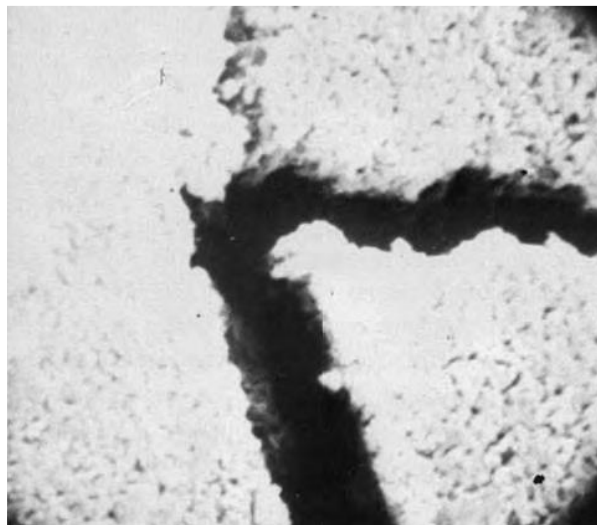
5.1.2. Látex

Utilizados desde 1920 para disminuir la permeabilidad y contracción en cementos Portland, además de aumentar su resistencia a la tensión y elasticidad, mejoran notoriamente con esto la unión entre las interfaces cemento-revestimiento y cemento-formación. (Ohama, 1987). Se suministran como una suspensión lechosa de partículas poliméricas esféricas de un tamaño de 200 a 500 [nm], junto a tensoactivos, que permiten evitar su coagulación (Nelson & Guillot, 2006).

5.1.2.1. Mecanismo de acción del Látex. Durante el proceso de hidratación del cemento Portland, se originan reacciones químicas que producen la contracción del volumen absoluto, generando esfuerzos dentro de la envoltura de cemento, que dan lugar a la formación y propagación de microfisuras (Figura 7), que aumentan la permeabilidad y disminuyen la capacidad de resistir esfuerzos de tensión (Nelson & Guillot, 2006).

Figura 7.

Microfisuras en cemento Portland fraguado



Nota. Adaptado de (Kuhlmann, 1985).

Por su fuerza de adhesión y elasticidad, el mecanismo de acción de las partículas de látex es formar una película plástica análoga a un puente que recubre la fase C-S-H sobre las microfisuras, proporcionando mayor durabilidad/resistencia y corrigiendo así, los problemas ocasionados durante el proceso de hidratación del cemento fraguado, descritos anteriormente (Kuhlmann, 1985).

Figura 8.

Cemento Portland modificado con Látex, ampliada 1200 veces.

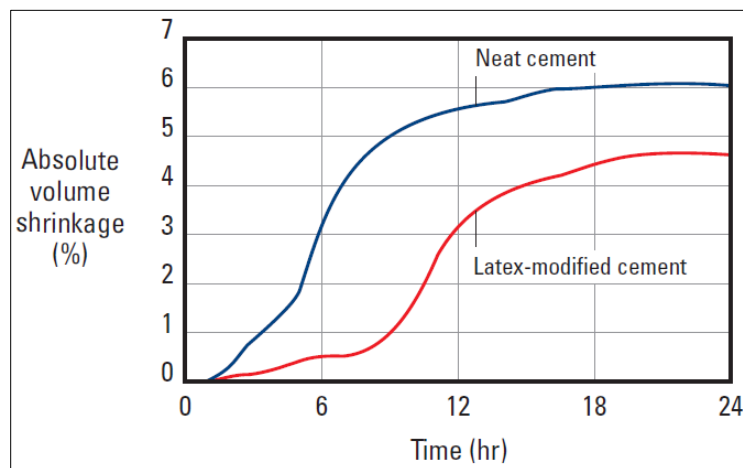


Nota. Adaptado de (Kuhlmann, 1985).

La disminución de la contracción volumétrica absoluta mediante la aplicación de Látex en el cemento Portland se puede observar en la Figura 9.

Figura 9.

Contracción volumétrica entre un cemento convencional y modificado con Látex.



Nota. Adaptado de (Parcevaux & Sault, 1984).

6. Metodología para el desarrollo del Modelo de Elementos Finitos en el software Abaqus

Esta sección de la tesis presenta la metodología utilizada para desarrollar el modelo de Elementos Finitos en el software Abaqus.

6.1. Suposiciones para el desarrollo del Método de Elementos Finitos

Con la finalidad de que el Método de Elementos Finitos (MEF) solucione correctamente las ecuaciones que describen el modelo de estudio, se plantearon las siguientes suposiciones.

- Se utiliza un sistema de coordenadas global, donde las direcciones de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo *in situ* coinciden con los ejes coordenados globales.
- Las secciones revestimiento, formación y cemento, son materiales continuos, isotrópicos, no porosos, homogéneos, e impermeables.
- El modelo no considera los efectos de la temperatura.
- Las interfaces cemento-revestimiento y cemento-formación, están completamente adheridas entre sí.
- La geometría del modelo es de tipo eje simétrica, lo que permite el uso de coordenadas cilíndricas.
- El revestimiento y el cemento son cilindros concéntricos, y la formación tiene forma geométrica de paralelogramo, con un radio 15 veces mayor al del pozo (Figura 15), con el fin de simular condiciones de frontera infinita.
- No existen efectos de expansión, contracción o cambios del volumen absoluto en el revestimiento y el cemento.
- El modelo corresponde a una cuarta parte del pozo, esto, con los objetivos de reducir el tiempo cómputo y la capacidad de almacenamiento de la CPU para procesar los resultados,

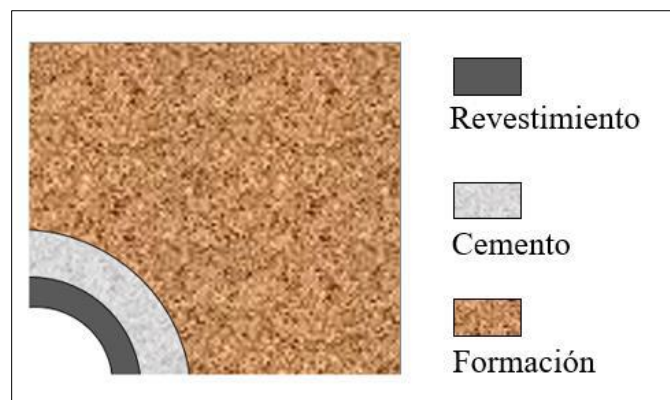
además, también para utilizar la mayor cantidad de elementos posibles con la finalidad de aumentar la precisión de los resultados.

6.2. Geometría del modelo

El paralelogramo construido representa un cuarto del pozo como se muestra en la Figura 10. Se utilizó la función espejo de Abaqus para generar las tres cuartas partes restantes del sistema acoplado revestimiento-cemento-formación, con el fin de optimizar tiempos de cómputo. Las dimensiones del modelo se muestran en la Tabla 7.

Figura 10.

Geometría del modelo construido en Abaqus



Nota. Adaptado de (Mayorga, 2021). Los esquemas revestimiento, cemento y formación de la figura no se encuentran a escala.

Tabla 7.

Valores geométricos del modelo.

Dato	Valor	Unidad
Longitud	71.25	in
Profundidad	15000	ft

OD revestimiento	7.63	in
ID revestimiento	6.63	in
Borehole	9.5	in

Nota. Tomado de Gray et al. (2009). Las dimensiones del revestimiento corresponden a una configuración de producción P-110.

6.3. Datos de entrada para el análisis

La *Input data* para alimentar el módulo de propiedades de Abaqus, fue determinada por Arias, (2013) a nivel de laboratorio y a través del software *WellLife* de Halliburton. Debido a que el software Abaqus no tiene unidades integradas establecidas por defecto, se empleó el sistema de unidades inglés en todos los datos de entrada que alimentan el modelo. La Tabla 8 presenta las propiedades fisicomecánicas de la formación el cemento y el revestimiento.

Tabla 8.

Propiedades fisicomecánicas de los materiales.

Material	Propiedad	Valor	Unidad
Formación	Densidad	15.0	ppg
	Módulo de Young	3×10^6	psi
	Relación de Poisson	0.25	adimensional
Cemento	Densidad	15.8	ppg
	Módulo de Young	1.28×10^6	psi
	Relación de Poisson	0.16	adimensional
Revestimiento	Densidad	65.7	Ppg
	Módulo de Young	30×10^6	Psi

Relación de Poisson	0.3	adimensional
---------------------	-----	--------------

Nota. Tomado de Arias, (2013). ppg significa pounds per gallon, por sus siglas en inglés.

6.4. Pasos de carga y procedimiento de análisis

El análisis de elementos finitos que se utilizó en el modelo se basa en una serie de pasos ordenados que conservan el historial de condiciones de carga y de frontera (Gray et al., 2009; Mayorga, 2021), los siguientes pasos de carga se realizaron en el modelo.

6.4.1. Paso Geostático

Representa las condiciones de equilibrio mecánico en las que se encuentra inicialmente la formación antes de ser perforada. Para simular esta condición en Abaqus, se implementa en los ejes del modelo bidimensional una carga que represente a los esfuerzos *in situ*, además, se encastra la cara de pozo, con el fin de representar la roca antes de ser perforada y se fijan las condiciones de frontera en los ejes (x, y) aprovechando la simetría del modelo.

Figura 11.

Encastre en la cara del pozo y condiciones de frontera en el paso Geostático

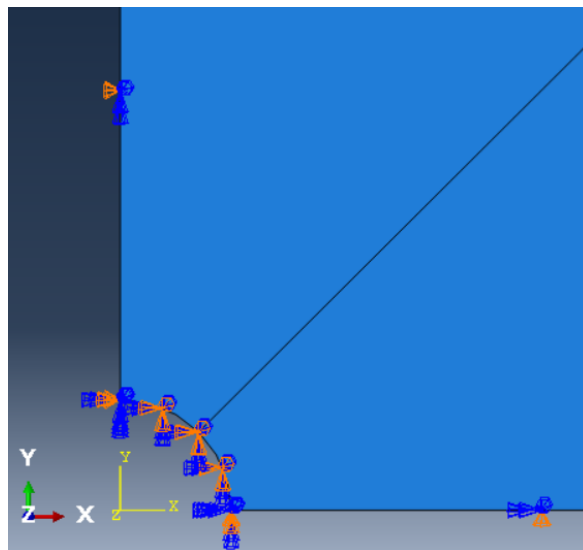
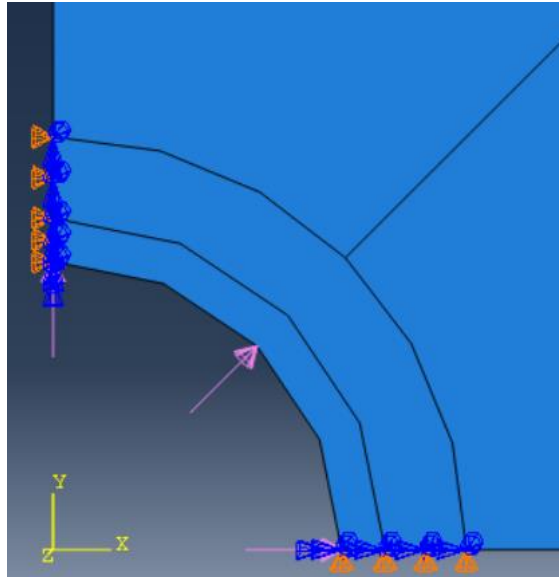


Figura 13.

Presión hidrostática del fluido de completamiento.



6.4.4. Paso de Producción

La operación de producción del pozo es similar al paso de completamiento, exceptuando, que la presión hidrostática depende del *drawdown* y la presión de poro (Mayorga, 2021). Autores como Gray et al. (2009) & Arias, (2013) resaltan que, durante este paso se puede generar la desunión del sistema, debido a la caída de presión que conduce a una contracción del revestimiento.

La Tabla 9 tomada de Mayorga, (2021), especifica los procedimientos y el tipo de análisis que realiza el software Abaqus para cada uno de los pasos anteriormente descritos:

Tabla 9.*Pasos de carga y procedimientos de análisis en Abaqus*

Paso	Procedimiento de análisis
Inicial	Initial. Abaqus crea este paso de manera predeterminada, no permite ser editado ni suprimido. En este <i>step</i> se prescriben las condiciones de frontera, campos predefinidos e interacciones aplicables al principio del análisis.
Geostático	Geostatic. En este <i>step</i> Abaqus/Standard verifica que el campo de esfuerzos <i>in situ</i> inicial esté en equilibrio con las cargas y condiciones de frontera prescritas y para iterar, si es necesario, hasta obtener el equilibrio del modelo. Se usa como primer paso de un análisis geotécnico, seguido de un análisis de esfuerzo-flujo de fluido en medio poroso totalmente acoplado, con o sin transferencia de calor (“Abaqus Analysis User's Manual”, 2011).
Perforación	Soils (Steady-Static). El procedimiento de análisis de esfuerzo-flujo de fluido totalmente acoplado con transferencia de calor en estado estable, se usa para modelar medios porosos completamente saturados de fluido unifásico y la transferencia de calor debido a la conducción en el medio empleando elementos que permitan el acoplamiento entre desplazamiento, presión de poro y temperatura. De acuerdo con lo anterior, se modela el acoplamiento entre deformación mecánica, flujo de fluido en medio poroso y transferencia de calor. Abaqus resuelve las ecuaciones de transferencia de calor, de continuidad totalmente acoplada y de equilibrio mecánico de manera simultánea (“Abaqus Analysis User's Manual”, 2011).
Completamiento	Soils (Steady-Static)

Nota. Tomado de Mayorga, (2021)

6.5. Condiciones de carga y de frontera

Las condiciones de frontera necesarias para mantener el equilibrio mecánico del modelo se presentan en la (Tabla 10; Figura 11), dada la geometría en forma de paralelogramo de la formación, se hace posible utilizar condiciones de simetría en los ejes, la cara del pozo es encastrada durante los pasos inicial y geostático, esto, para simular condiciones *in situ*.

Tabla 10.

Condiciones de frontera

Sector	Condición de frontera
Simetría eje X	XSYMM (U1= UR2 = UR3 = 0)
Simetría eje Y	YSYMM (U1= UR2 = UR3 = 0)
Cara del pozo	Encastre (U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0)

Los esfuerzos y cargas aplicadas en el modelo durante las operaciones de perforación, cementación, completamiento y producción se presentan en la Tabla 11

Tabla 11.

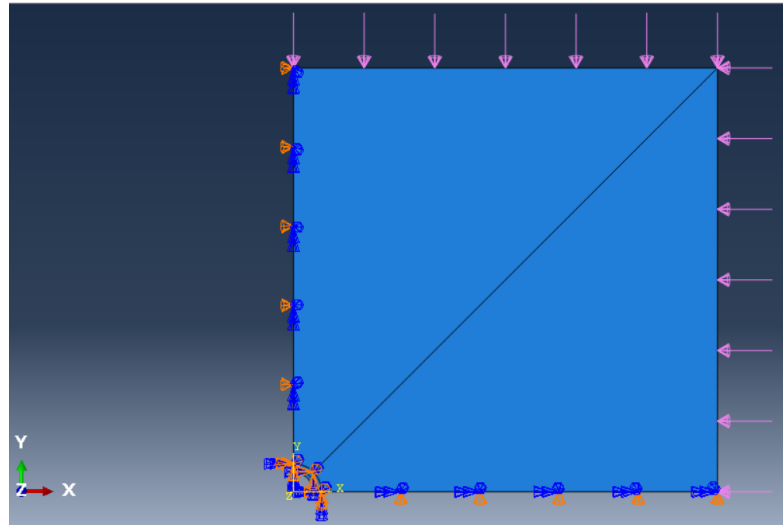
Condiciones de carga

Dato	Valor	Unidad
Esfuerzo horizontal máximo (S11 = σ_{Hmax})	18000	psi
Esfuerzo horizontal mínimo (S22 = σ_{hmin})	10500	psi
Presión de lodo (P_l)	7800	psi
Presión de lechada de cemento (P_{lc})	8252	psi
Presión de fluido completamiento (P_{fc})	4500	psi
Presión de producción en fondo de pozo (P_{pfp})	700	psi

Nota. Tomado de Arias, (2013)

Figura 14.

Condiciones de carga y de frontera



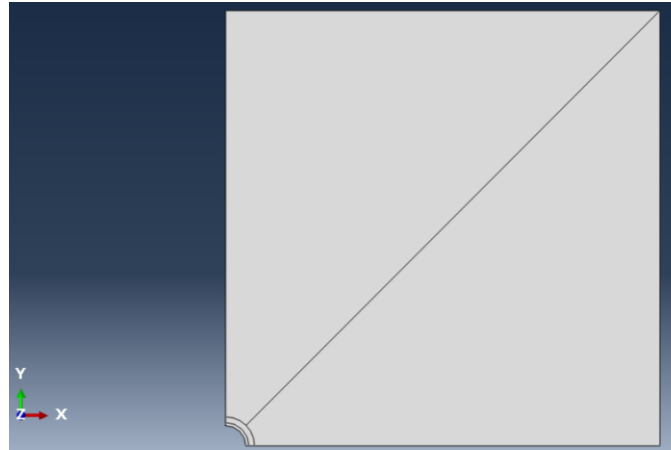
6.6. Mallado y tipo de elemento

El modelo contiene 924 elementos de tipo CPS4R y 984 nodos de librería estándar y orden geométrico lineal en su mallado para todos los componentes del sistema (revestimiento, cemento y formación), este tipo, es un cuadrilátero de tensión plana bilineal de 4 nodos, integración reducida y control de reloj de arena (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

Para lograr un mallado adecuado, se realizó una partición en la mitad de la formación como se observa en la Figura 15, esto, con el propósito de obtener dos regiones simétricas, cada una con un mallado más suave y homogéneo.

Figura 15.

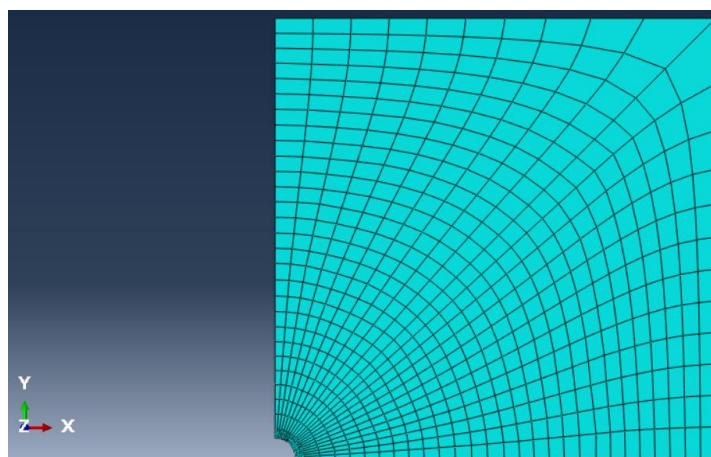
Dibujo del modelo en Abaqus



La técnica de mallado realizado fue libre (free), este tipo, no utiliza patrones de malla preestablecidos, generando el mallado más flexible, por lo que la topología de la región será quien determine la forma del mallado, haciendo imposible predecir un patrón de malla antes de crearlo. Se utilizaron elementos de forma cuadrilátera y un algoritmo de eje medial, este último, realiza un proceso de descomposición de la región a enmallar en grupos de regiones más simples y las enmalla cada una de manera estructurada. (Abaqus/CAE User's Guide 6.14, 2014).

Figura 16.

Modelo enmallado con elementos CPS4R



6.7. Verificación del modelo desarrollado

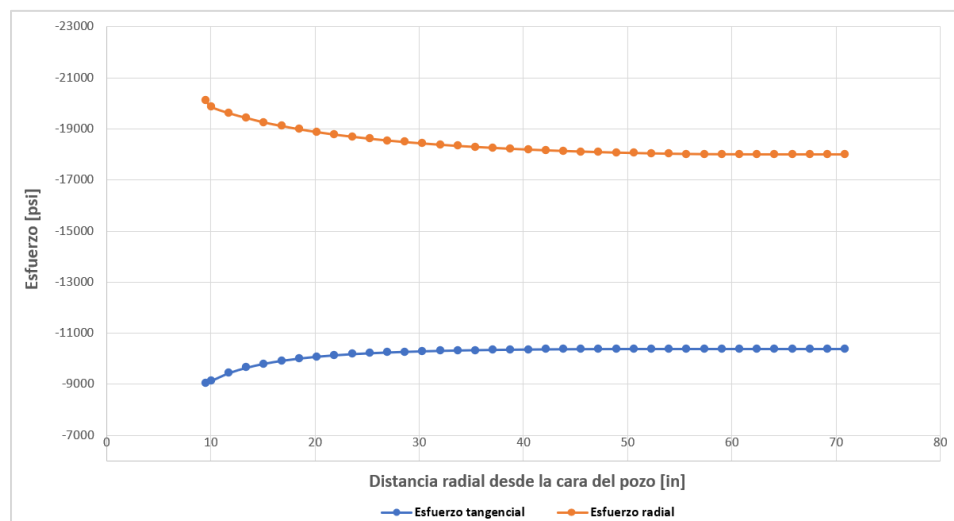
El modelo base debe ser calibrado con modelos analíticos desarrollados y publicados en la literatura, de manera que, se compruebe que los resultados arrojados sean correctos y coherentes. A continuación, se muestra el desarrollo para validar el modelo construido.

6.7.1. Validación del step Geostático

Para validar el paso Geostático, se graficaron los esfuerzos radiales y tangenciales, medidos desde el eje x ($\theta=0$) que representa la distancia radial de la formación en el modelo bidimensional, la mayor divergencia ocurre cerca del encastre de la cara del pozo, donde el porcentaje de error en los esfuerzos radiales y tangenciales es del 13% y 11%, respectivamente, hasta disminuir a 0% a medida que aumenta el radio del modelo, llegando a los valores de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo *in situ* inscritos al inicio del análisis.

Figura 17.

Esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos en el paso Geostático

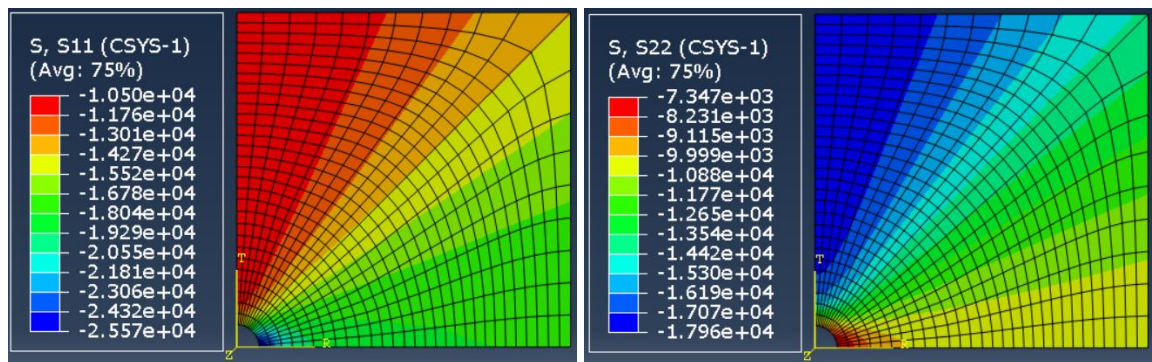


Este porcentaje de error puede estar asociado con la cantidad de elementos utilizados durante el mallado del modelo bidimensional, ya que la versión estudiantil del software Abaqus,

con la cual se construyó el modelo, solo permite utilizar 1000 nodos, disminuyendo la precisión en los resultados principalmente obtenidos cerca de la región encastrada correspondiente a la cara del pozo.

Figura 18.

Equilibrio mecánico en la formación en el paso Geostático



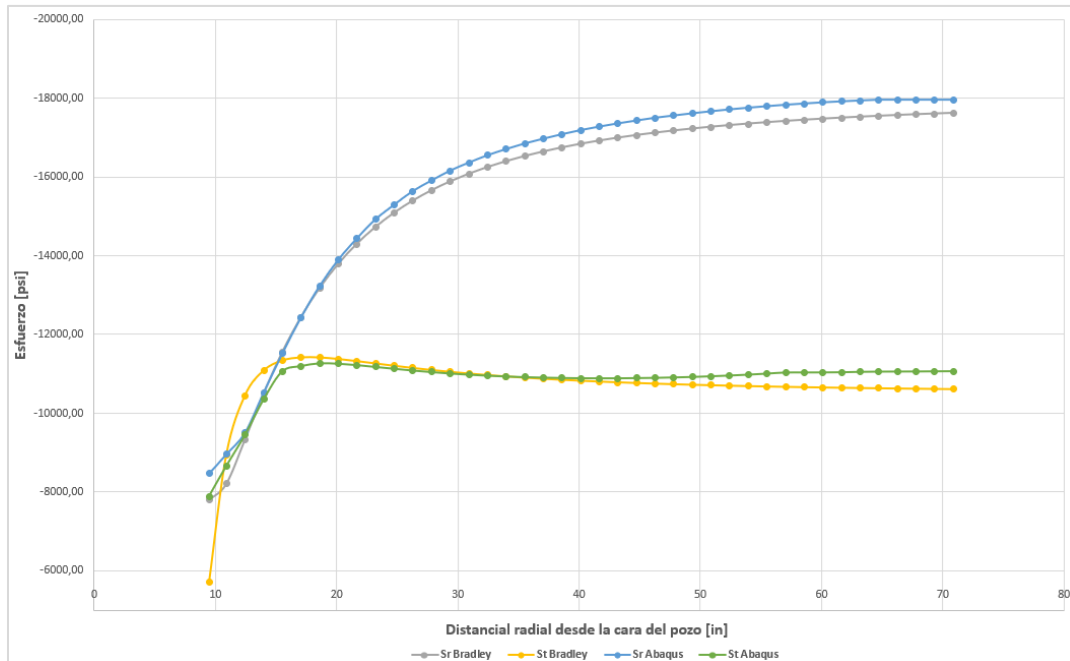
6.7.2. Validación del step de perforación

La operación de perforación es validada mediante la comparación de los esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos por el análisis de elementos finitos en Abaqus y el modelo analítico desarrollado por Bradley, a través del eje x ($\theta=0$), esto se puede observar en la Figura 19.

El mayor porcentaje de error encontrado entre el MEF de abaqus y el modelo de Bradley ocurre en la cara del pozo, ya que es la región donde se cambia el estado de esfuerzos original de la formación producto de la perforación y de la presión hidrostática ejercida por la pared del hueco, estos porcentajes para los esfuerzos radiales y tangenciales son de 8.65% y 38% respectivamente en el primer punto, posteriormente este valor disminuye notoriamente a medida que aumenta la distancia, hasta valores de 0.98% y 0.8% a aproximadamente 20 (in) desde la cara del pozo y aumenta 1.93% y 4.29% al final de la roca.

Figura 19.

Esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos en el paso de perforación



Nota. (Sr) y (St) hacen referencia al Esfuerzo radial y tangencial, respectivamente.

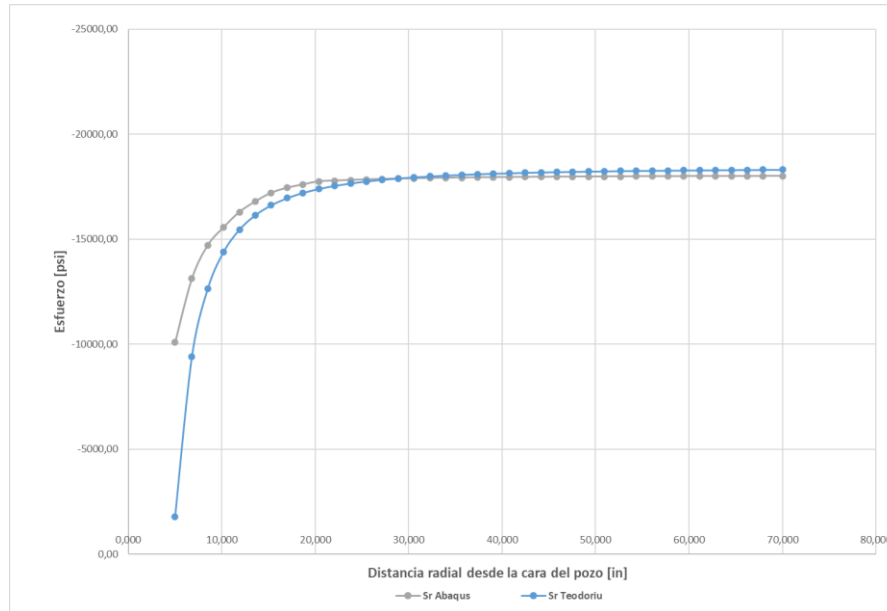
En general, la tendencia de los resultados obtenidos entre el MEF del modelo bidimensional de abaqus y el modelo analítico de Bradley es la esperada, Kirsch, (1898), resalta que lejos de la cara del pozo, los esfuerzos radiales y tangenciales deben aproximarse a la magnitud de los esfuerzos principales horizontales máximo y mínimo *in situ*, respectivamente.

6.7.3. Validación del step de completamiento

Durante la operación de completamiento, el modelo de simulación se validó a partir del modelo analítico de Teodoriu, esto, mediante la comparación de los resultados de los esfuerzos radiales que se generan en el sistema acoplado revestimiento-cemento-formación en toda la distancia radial ($\theta=0$) desde la pared interna del revestimiento, hasta el límite de la roca. La Figura 20, muestra el comportamiento obtenido.

Figura 20.

Esfuerzos radiales obtenidos en el paso de completamiento



El modelo de simulación presenta un porcentaje de error entre el 2.8% y 1.7% en la región límite de la formación respecto al modelo analítico y una gran divergencia cerca a la cara del pozo donde actúa la presión del fluido de completamiento, lo anterior, es ocasionado posiblemente por alguno(s) de los siguientes motivos.

- 1) La cantidad permitida de elementos finitos y nodos en el modelo es baja (máximo 1000 nodos), lo cual genera una malla con menor refinamiento y limita la densidad de elementos finitos empleados en cada parte del modelo. Lo anterior origina una posible reducción de la precisión en las cercanías de la cara del pozo.
- 2) El modelo analítico de Teodoriu utiliza diferenciales de temperatura y coeficientes de expansión térmica de los materiales para realizar el cálculo de los esfuerzos radiales y tangenciales, valores que no son empleados en el modelo de simulación desarrollado en Abaqus.

- 3) Con el fin de optimizar la cantidad de elementos a utilizar, el modelo de simulación representa una cuarta parte del pozo donde la formación tiene forma geométrica de paralelogramo y en el caso particular del modelo analítico de Teodoriu, la formación es representada como un cilíndrico concéntrico de pared gruesa. (Mayorga, 2021).

7. Evaluación del comportamiento mecánico de dos sistemas de cemento fraguado

A partir de los datos obtenidos de esfuerzos radiales y tangenciales en el modelo de simulación, se realiza el análisis de la falla de dos sistemas de cemento por desunión en sus interfaces roca-cemento y cemento-formación y/o por agrietamiento radial. Mayorga, (2021) describe que el agrietamiento radial en la envoltura de cemento sucede si los esfuerzos tangenciales a los que está sometido son mayores a su resistencia a la tensión y que la falla por desunión se origina si los esfuerzos radiales exceden en magnitud a su resistencia a la desunión.

7.1. Input data para la evaluación

La evaluación del efecto de los cambios de presión provenientes de las cargas estáticas internas del pozo y de la formación hacia la envoltura de cemento se realiza mediante uso de dos diferentes sistemas de cemento y dos tipos de formación. Entre los aditivos agregados a los sistemas de cemento, se destacan por su efecto en las propiedades fisicomecánicas los elastómeros, un tipo de polímero elástico utilizado en el cemento con el fin de disminuir su módulo de Young y con esto hacerlo menos rígido, las fibras de vidrio también tienen un efecto en el cemento endurecido aumentando su resistencia a la tensión y finalmente el uso de expansores con el objetivo de mitigar los efectos de la reducción del volumen de hidratación durante el curado (Arias,

2013). La Tabla 12 muestra una descripción completa del contenido y tipo de aditivos aplicados en cada uno de los sistemas de cemento.

Tabla 12.

Descripción composicional de los sistemas de cemento

Sistema de Cemento	Contenido y tipo de aditivos
Cemento 1	3% BWOC densificante Micromax, 8% BWOC elastómeros LifeCem 100, 0.45% BWOC retardador Scr-100, 0.3% BWOC pérdida de circulación HALAD-344, 3% BWOC expansor microbond HT, 0.5% BWOC fibra de vidrio, 1 gps de látex 3000.
Cemento 2	10% BWOC extendedor Esferulita, 7% BWOC extendedor de Silicona, 0.4% BWOC retardador Scr-100, 0.7% BWOC pérdida de circulación HALAD-344, 3% BWOC expansor Microbond HT, 3% BWOC fibras de carbono, 20% BWOC elastómeros.

Nota. Datos tomados de (Arias, 2013)

Debido a que el sistema de cemento 1 posee menor % BWOC de elastómeros, emplea el módulo de Young más alto y la relación de Poisson más baja respecto al otro sistema de cemento, por ende, su comportamiento es más frágil -al ser más rígido- y más compresible. La formación de tipo arenisca, de forma similar al cemento 1, presenta una condición de mayor dureza debido a su alto módulo de Young, respecto a la formación de tipo lutita como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13.*Propiedades mecánicas de los sistemas de cemento y las formaciones*

Material	Densidad [ppg]	Módulo de Young [psi]	Relación de Poisson	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la desunión
Cemento 1	15.8	6.43E+06	0.089	473.3	392.8
Cemento 2	14.5	5.47E+05	0.113	369.7	306.8
Formación Blanda (Tipo Lutita)	15	3.00E+06	0.25	-	-
Formación dura (Tipo arenisca)	15	8.30E+06	0.25	-	-

Nota. Datos tomados de (Arias, 2013).

Los valores de resistencia a la desunión se calcularon para cada uno de los sistemas de cemento como el 83% de su resistencia a la tensión, lo anterior, validado en pruebas a nivel de laboratorio desarrolladas por Arias, (2013).

7.2. Comportamiento mecánico del cemento bajo diferentes escenarios

El análisis del comportamiento mecánico de los sistemas de cemento frente a una formación dura y blanda se evaluó en tres escenarios (ver Tabla 14), cada uno de estos, con las siguientes características:

Tabla 14.*Características de los escenarios*

Escenario	Presión interna [psi]	SH [psi]	Sh [psi]
A	700	18000	10500

B	20000	18000	10500
C	15000	8224	2900

Nota. Datos tomados de (Arias, 2013; Palencia, 2018).

7.2.1. Evaluación de los sistemas de cemento en el escenario A.

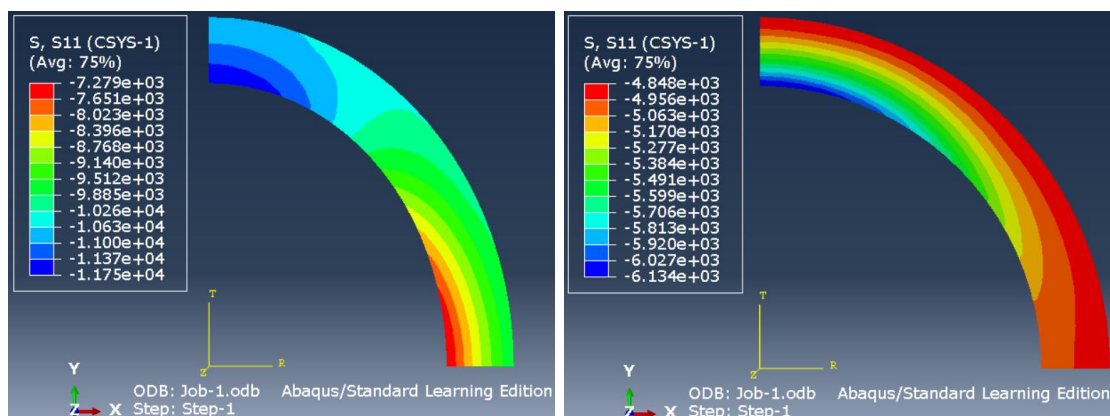
En este escenario, la presión en la pared interna del revestimiento es menor en comparación a la aplicada durante la operación de completamiento y en los escenarios B y C, por lo tanto, existe la posibilidad de que un cemento mal diseñado falle por desunión, debido a que el pozo tiende a contraerse.

Formación dura

La Figura 21 muestra los esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cemento, frente a una formación dura, en este caso no hay riesgo por desunión en sus interfaces ya que en ambos casos los esfuerzos son de tipo compresivos.

Figura 21.

Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementsos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario A

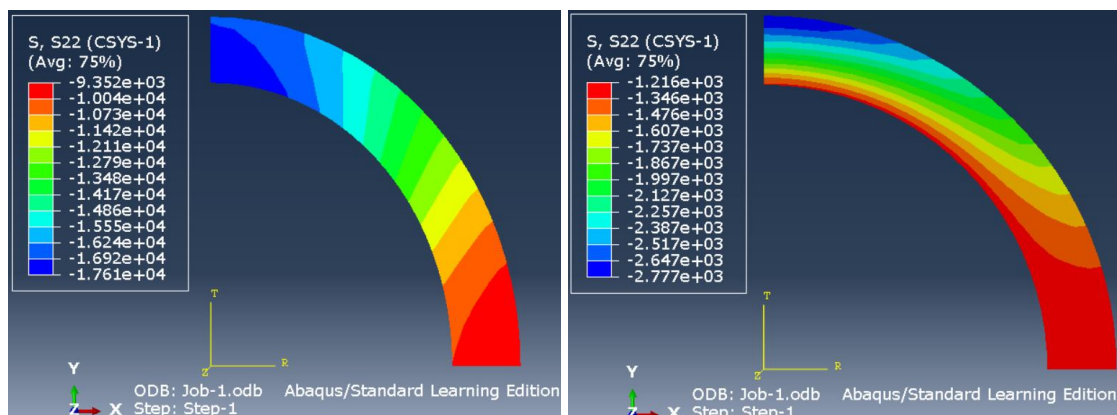


Se puede observar (Figura 21) que el sistema de cemento 2 se desempeña mejor bajo esta condición al generar valores de esfuerzos radiales significativamente menores respecto al sistema de cemento 1, este comportamiento se debe a que tiene un mayor porcentaje de elastómeros en su composición, obteniendo un módulo de Young más bajo, que le otorga un comportamiento flexible al ser más dúctil. En este caso, el sistema de cemento 2 genera el menor esfuerzo radial de tipo compresivo (-4848 psi) frente a la formación dura, respecto a los demás escenarios

La esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cemento frente a la formación dura se observan en la Figura 22, en este caso no existe riesgo por agrietamiento radial en ningún cemento, debido a su naturaleza de tipo compresiva, además, los mayores esfuerzos tangenciales compresivos se dan en la interfaz cemento-formación para el cemento 2.

Figura 22.

Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementsos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario A.

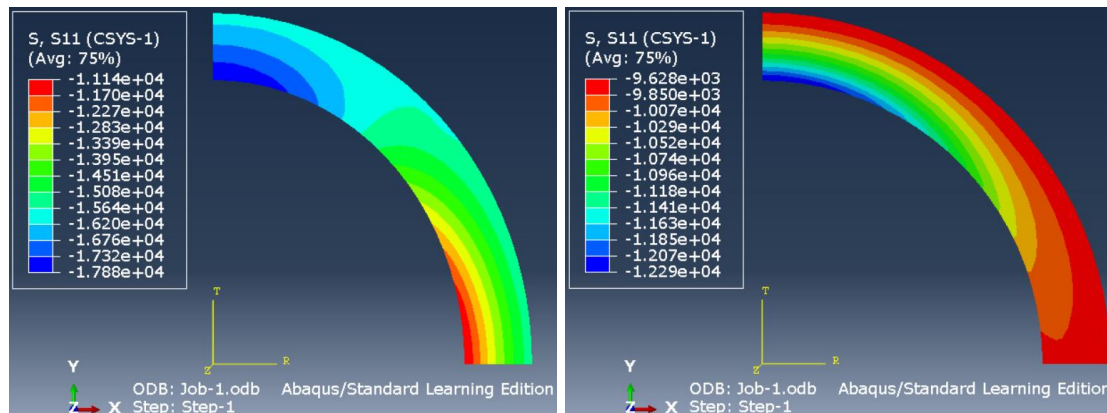


Formación blanda

La Figura 23 presenta los esfuerzos radiales de los sistemas de cemento frente a la formación blanda, de forma similar al caso anterior, en el ningún sistema de cemento se presenta falla por desunión en las interfaces debido a la naturaleza compresiva de los mismos.

Figura 23.

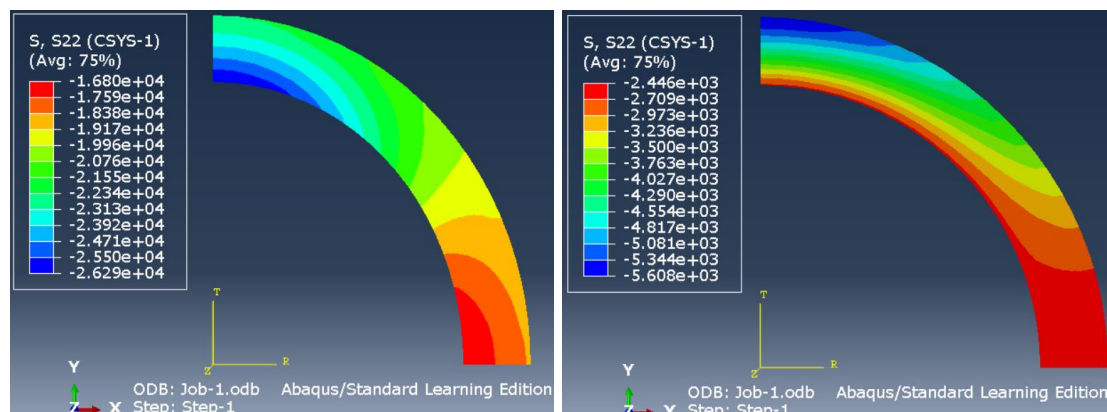
Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario A.



En la Figura 24 se puede apreciar los esfuerzos tangenciales generados en los sistemas de cementos frente a una formación blanda, en la cual, debido a su naturaleza compresiva no se genera agrietamiento radial en ningún caso. El sistema de cemento 2, genera esfuerzos de mayor magnitud respecto a los obtenidos frente a una formación dura, y se ubican cerca a la interfaz con la formación (zona de color azul).

Figura 24.

Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario A.



7.2.2. Evaluación de los sistemas de cemento en el escenario B.

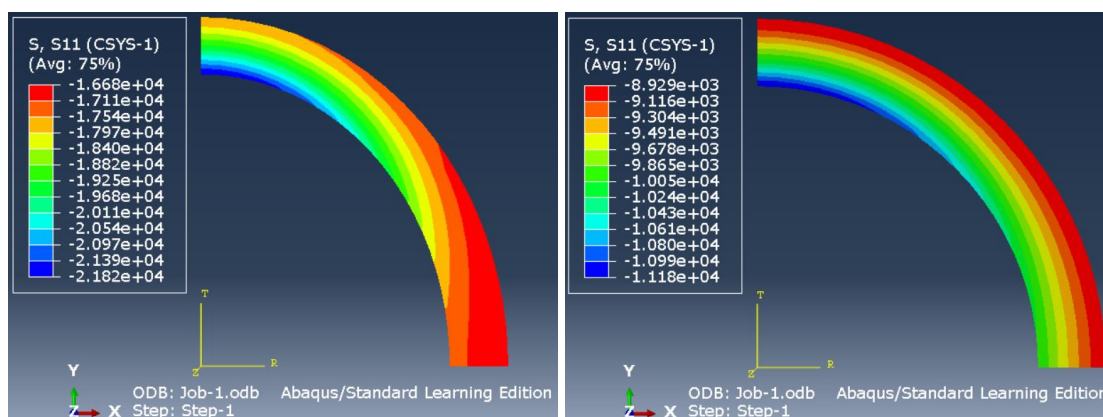
Con el objetivo de estudiar el efecto de la alta presión interna en los sistemas de cemento, el escenario B contempla un aumento significativo de la presión hasta 20000 [psi], siendo este, el caso de evaluación con mayor magnitud carga en comparación con los demás.

Formación dura

La Figura 25 expone los esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cemento frente a una formación dura en condiciones del escenario B. De forma análoga al escenario A frente a una formación dura, el sistema de cemento 2 genera menores esfuerzos radiales en su matriz debido a bajo módulo de Young, además, no existe falla por desunión en ninguno de los sistemas, dado que los esfuerzos radiales son compresivos.

Figura 25.

Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementsos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario B.

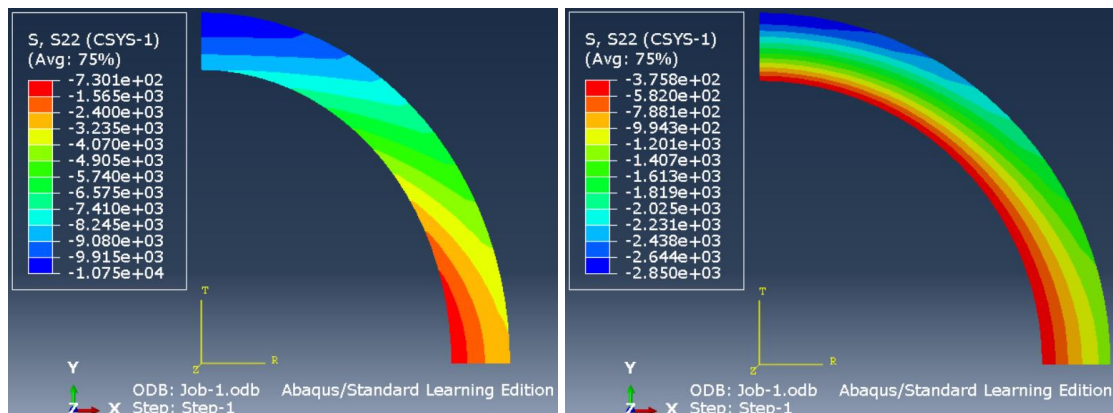


Los esfuerzos tangenciales en el escenario B frente a una roca dura se muestran en la Figura 26, siendo estos de naturaleza compresiva por lo que no existe riesgo de agrietamiento radial. Una característica importante es que el sistema de cemento 2, genera esfuerzos de menor magnitud en

el límite de la interfase con la formación, respecto a los obtenidos frente a una formación dura del escenario A.

Figura 26.

Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario B.

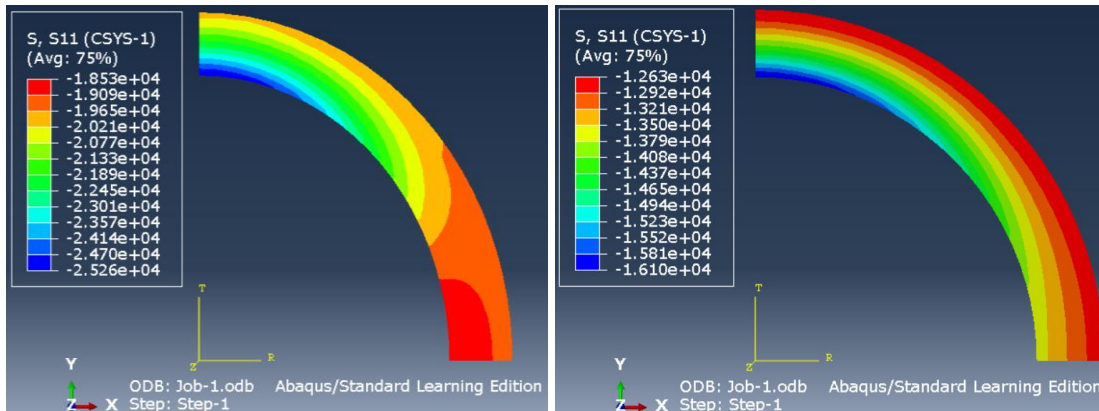


Formación blanda

El comportamiento de los esfuerzos radiales en los sistemas de cemento frente a una formación blanda se aprecia en la Figura 27, su magnitud es significativamente mayor en relación con los obtenidos frente a una roca dura, pero tampoco existe riesgo alto de desunión, por su naturaleza compresiva, además, son mayores en la interfaz cemento-revestimiento.

Figura 27.

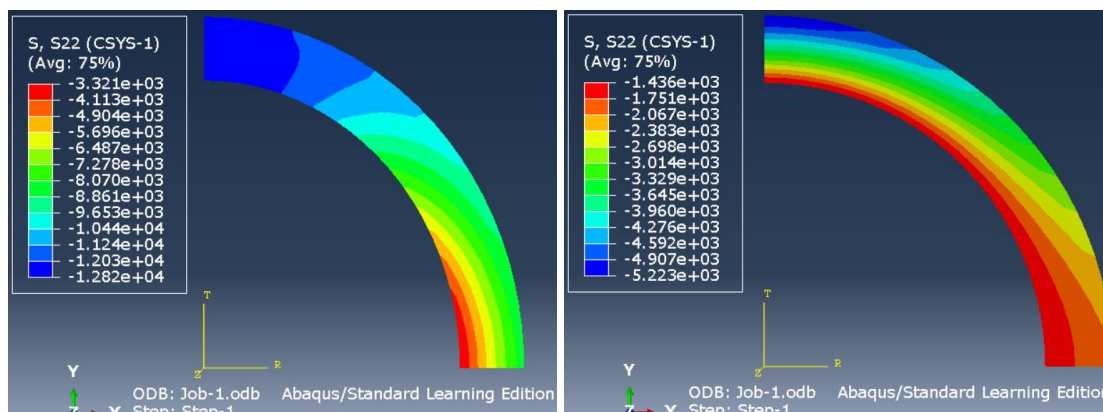
Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario B.



La Figura 28 muestra los esfuerzos tangenciales obtenidos sobre una formación blanda. Notablemente su magnitud es mucho menor en comparación a los obtenidos en la misma formación del escenario A, pero de igual manera, su naturaleza compresiva evita la generación de fallas por desunión. En este caso, en la interface cemento-formación se presentan los esfuerzos tangenciales más grandes.

Figura 28.

Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda, en el escenario B.



7.2.3. Evaluación de los sistemas de cemento en el escenario C.

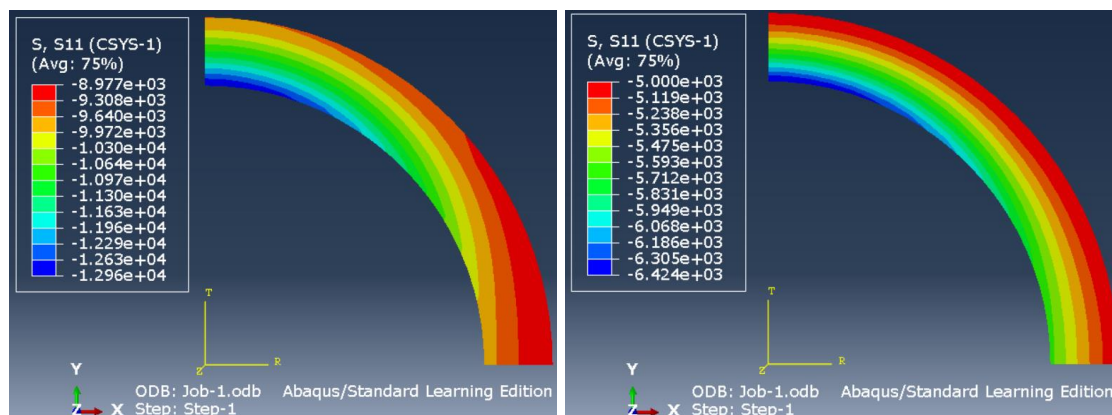
Este escenario mantiene una presión alta, típica de pozos *High pressure*, pero disminuye la magnitud de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo *in situ* respecto a los escenarios A y B con el fin de analizar el comportamiento de los sistemas de cemento ante esta situación particular.

Formación dura

La Figura 29 presenta los esfuerzos radiales obtenidos frente a la formación dura. De forma análoga a los casos anteriores, el sistema de cemento 2 está sometido a menores esfuerzos en su matriz, en cuanto al riesgo de falla por desunión, este no existe debido a que son de tipo compresivo. Los mayores esfuerzos se generan en la interfaz cemento-revestimiento y cemento-formación para los sistemas 1 y 2 respectivamente.

Figura 29.

Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario C

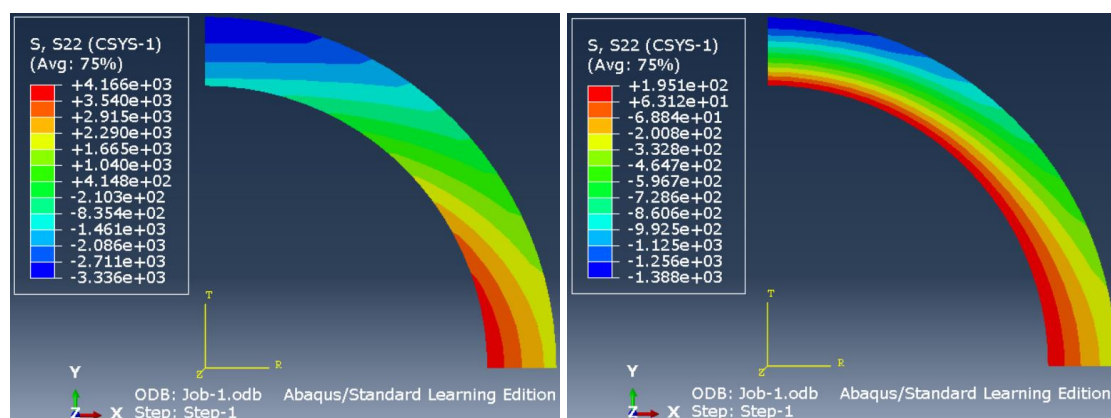


En la Figura 30 se observa que el sistema de cemento 1 falla por agrietamiento radial debido a que el esfuerzo tangencial de tensión máximo (4394 psi) es considerablemente mayor a la resistencia a la tensión del cemento (473,3 psi), por otro lado, el esfuerzo máximo tangencial del

sistema de cemento 2 (195 psi) es menor que la resistencia a la tensión de este (306,8 psi), de manera que su flexibilidad evitó que fallará por agrietamiento radial, brindado este último un aislamiento zonal efectivo.

Figura 30.

Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cements fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación dura en el escenario C

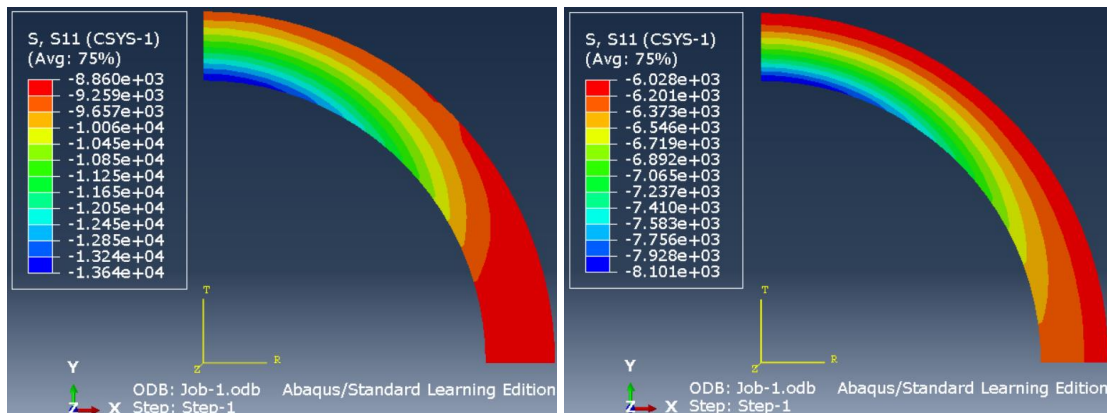


Formación blanda

Los esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cements frente a la formación blanda se muestran en la Figura 31, estos indican que no existe riesgo de falla por desunión debido a su naturaleza de tipo compresiva, donde su mayor magnitud se encuentra cerca a la interfaz cemento-revestimiento y es mayor en ambos tipos de cemento a la generada frente a la formación dura de este mismo escenario.

Figura 31.

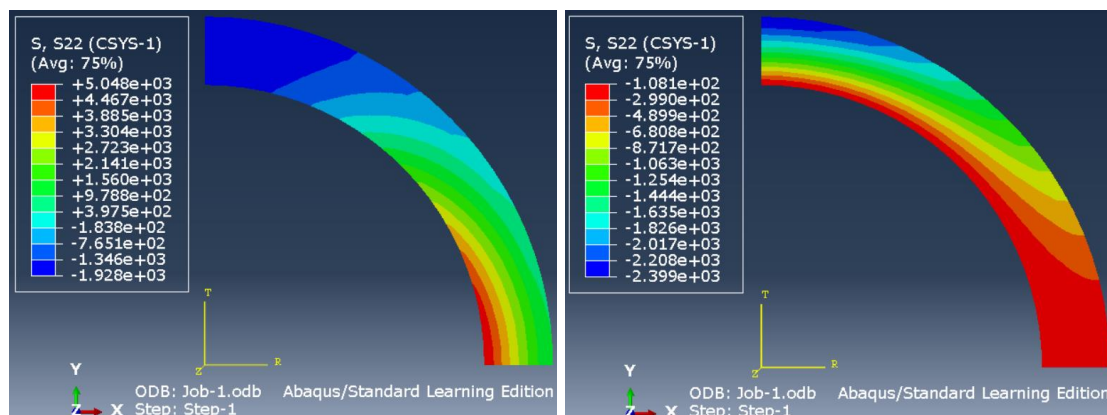
Esfuerzos radiales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario C



La Figura 32 indica que el sistema de cemento 1 falla por agrietamiento radial como en la formación dura, debido a que el esfuerzo tangencial de tensión máximo (5244 psi) es significativamente mayor que su resistencia a la tensión (473,3 psi) fallando una parte de su matriz, sin embargo, en el cemento 2 no ocurre lo mismo, ya que los esfuerzos de tensión son compresivos, y de mayor magnitud en el contacto cemento-revestimiento.

Figura 32.

Esfuerzos tangenciales obtenidos en los sistemas de cementos fraguado 1 (izq.) y 2 (der.) frente a una formación blanda en el escenario C



8. Conclusiones

El modelo de simulación construido en Abaqus con licencia estudiantil empleó el máximo número de nodos permitidos (1000 nodos). Este permitió conocer el estado y la magnitud de los esfuerzos radiales y tangenciales en el área de la envoltura del cemento, considerando la adición de aditivos, en la interacción revestimiento-cemento-formación.

Los resultados obtenidos se presentan con base en el modelamiento elástico del fenómeno, tomando en consideración variables como el módulo de Young y la relación de Poisson para cada elemento.

El uso de elastómeros como aditivo en el cemento mejora sus propiedades mecánicas a partir de la reducción del módulo de Young, otorgándole una mayor flexibilidad y menor rigidez, con lo que mejora su funcionamiento en condiciones de alta y baja presión, generando también, valores considerablemente más bajos de esfuerzos radiales y tangenciales en su matriz frente formaciones blandas y duras.

Los sistemas de cemento cuyo módulo de Young es significativamente menor que el de la formación, disminuyen la probabilidad de falla por desunión y agrietamiento radial.

La disminución de la presión del pozo debido a operaciones como producción, incrementa la probabilidad de que el cemento falle por agrietamiento radial y desunión.

La magnitud y naturaleza de los esfuerzos horizontales máximo y mínimo *in situ*, definen el tipo y la probabilidad de falla de los cementos, bajas magnitudes de estos en condiciones de alta presión de pozo aumentan la probabilidad de falla por desunión y agrietamiento.

9. Recomendaciones

Se recomienda desarrollar un modelo de simulación numérica tridimensional, que integre la presión aplicada por el esfuerzo principal vertical (σ_3), de modo, que se pueda evaluar el mecanismo de falla de corte y de tensión en el cemento. Además, que permita incluir una mayor cantidad de elementos y nodos en las partes del modelo, especialmente en el cemento, con el objetivo de tener resultados más precisos.

Se recomienda el desarrollo de un modelo de simulación numérica que integre los efectos de la temperatura y la plasticidad en el sistema revestimiento-cemento-formación, y así, evaluar en este escenario el comportamiento mecánico del cemento.

Se recomienda realizar pruebas experimentales aplicando diferentes aditivos y en distintas concentraciones en el cemento, con el fin de cuantificar los efectos causados en las propiedades mecánicas del este.

Referencias Bibliográficas

Abaqus documentation 6.14. Abaqus analysis user's manual, Dassault Systemes Simulia. 2014

Abaqus documentation 6.14. Abaqus/CAE User's Guide, Dassault Systemes Simulia. 2014.

Al-Yami, A., Shakhouri, A., Al-Bahrani, H., Al-Khalaf, S., & Vikrant Wagle. (2022, February).

Improved Cement Properties Prevent Well Control Incidents Potentials at Top of Liners.

In *the International Petroleum Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers.

<https://doi.org/10.2523/IPTC-21957-MS>

Angstadt, R., & Hurley, F. (1963, February). Hydration of the Alite Phase in Portland Cement.

Nature 197-688. <https://doi.org/10.1038/197688a0>

Anon. (2014). Well Engineering Shell Intensive Training Programme 1-46.

Arias, H. (2013). Use of finite-element analysis to improve well cementing in HTHP conditions

(Doctoral dissertation). Recuperado de

<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/151203>

Audebert, R et al. (1997, January). *Cement Composition Containing Chemically Crosslinked*

Polyvinyl Alcohol (PVA). (U.S. Patent No. 5,594,050). U.S. Patent and Trademark Office.

<https://patents.google.com/patent/US5594050A/en>

Behnam Karimi., & Majid Noorian. (2021, October). Numerical study of the effect of rock

anisotropy on stresses around an opening located in the fractured rock mass. *Journal of*

Petroleum Science and Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109593>

Bomá, W., Babs, O., & Islam, S. (2016, August). HPHT Well Integrity and Cement Failure. In

SPE Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum

Engineers. <https://doi.org/10.2118/184254-MS>

- Boncan, V & Gandy, R. (1997, March). *Well Cementing Method Using an AM/AMPS Fluid Loss Additive Blend*. (U.S. Patent No. 4,632,186). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US4632186A/en>
- Bosma, M., Ravi, K., van Driel, W., & Jan Schreppers, G. (1999, October). Design Approach to Sealant Selection for The Life of The Well. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi-org./10.2118/56536-MS>
- Bosma, M., Cornelissen, E., & Schwing, A. (2000, October). Improved Experimental Characterisation of Cement/Rubber Zonal Isolation Materials. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/64395-MS>
- Bradley, W. (1979, December). Failure of Inclined Boreholes. *J. Energy Resour. Technol.* 101, 232–239. <https://doi.org/10.1115/1.3446925>
- Broni-Bediako, Eric., Ogbonna F., & Ofori-Sarpong, G. (2016). Oil Well Cement Additives: A Review of the Common Types. *Oil and Gas Research*. <http://dx.doi.org/10.4172/ogr.1000112>
- Chen, X., Gao, J., Yan, Y., & Liu, Y. (2017, December). Investigation of expansion properties of cement paste with circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*, 1154-1162, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.159>
- Dassault Systemes. (s.f). *Abaqus Unified FEA*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2022 de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>
- De Andrade, J., Sangesland, S., Todorovic, J., & Vralstad, T. (2015, April). Cement Sheath Integrity During Thermal Cycling: A Novel Approach for Experimental Tests of Cement

- Systems. In *SPE Bergen One Day Seminar*. Society of Petroleum Engineers.
<https://doi.org/10.2118/173871-MS>
- Eberhard, J., & Park, A. (1958, January). *Portland Cement-Vinylidene Chloride Polymer Composition, Method of Making, and Method of Using*. (U.S. Patent No. 2,819,239). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US2819239A/en>
- Edwards, G., & Angstadt, R. (1966, May). The Effect of Some Soluble Inorganic Admixtures on the Early Hydration of Portland Cement. *Journal of Applied Chemistry*, 166-168.
<https://doi.org/10.1002/jctb.5010160508>
- EN 197-1. (2011). Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- Gray, K. E., Podnos, E., & Becker, E. (2009). Finite-element studies of near-wellbore region during cementing operations: Part I. *SPE drilling & completion*, 24(01), 127-136.
- Halliburton. (2001). Cementación 1, Libro de Trabajo del Estudiante. Estados Unidos de América
- Hobbs, D. (1967, January). Rock tensile strength and its relationship to a number of alternative measures of rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(67\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(67)90009-5)
- ICP, I. de cimentación. (2014). MÓDULO 1: CEMENTOS PETROLEROS CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS – Unidad 1: Los cementos Petroleros y sus propiedades 1. *Icp*, 3, 1-19
- Jaeger, J., Cook, N., & Zimmerman, R. (2007). *Fundamentals of rock mechanics*. Malden, USA: Blackwell Publishing.

- Jo, H., & Gray, K. E. (2009, January). Mechanical behavior of concentric casing, cement, and formation using analytical and numerical methods. In *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Kirsch, C. (1898). Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 42, 797-807.
- Kuhlmann, L. (1985, November). Latex Modified Concrete for the Repair and Rehabilitation of Bridges. *Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete and Rehabilitation of Bridges*, No.4, 241-247. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(85\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0262-5075(85)90044-2)
- Le Roy-Delage, S et al., (2000, February). New Cement Systems for Durable Zonal Isolation. In *IADC/SPE Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/59132-MS>
- Liu, Quek, S. S., & Liu, G. R. (2003). Finite Element Method. *Elsevier Science & Technology*.
- Mayorga, Karina. (2021). Evaluación del comportamiento mecánico del cemento en el sistema revestimiento-cemento-formación. (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga, Colombia.
- McCulloch, J., Gastineau, J., Bour. D. L., & Ravi, K. (2003). Life cycle modeling of wellbore cement systems used for enhanced geothermal system development Transactions – Geothermal Resources Council, 27, 147-154.
- Messier, E., Stiles, D., & Morgan, R. (2022, June). Controlling Cement Tops Through Use of Fiber-Based Slurries Reduces Drilling Costs. In *PETSOC Canadian International Petroleum Conference*. <https://doi.org/10.2118/2002-085>

- Mignon, A., Snoeck, D., Dubruel, P., Van Vlierberghe, S., & Belie, N. (2017). Crack Mitigation in Concrete: Superabsorbent Polymers as Key to Success?. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. <https://doi.org/10.3390/ma10030237>
- Mohamadian, N., Ramhormozi, M. Z., Wood, D. A., & Ashena, R. (2020). Reinforcement of oil and gas wellbore cements with a methyl methacrylate/carbon-nanotube polymer nanocomposite additive. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103763>
- Nelson, E. B., & Guillot, D. (2006). Well cementing, Second Edi. ed. Schlumberger, Sugar Land, TX, 77478, 258-263.
- Nikbin, I., & Golshekan, M. (2018, April). The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>
- Ning, L., Yousuf, N., Olayiwola, O., & Guo, B. (2021). A Comprehensive Review on the Loss of Wellbore Integrity due to Cement Failure and Available Remedial Methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109123>
- Ohama, Y. (1987, December). Principle of Latex Modification and Some Typical Properties of Latex-Modified Mortars and Concretes. *ACI Materials Journal*, 511-518.
- Oluseun, A., & Salaheldin, E. (2018, April). Cement Failure Modeling for High Pressure High Temperature Wells: Case Studies. In *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/192232-MS>

- Palencia Muñoz, M.F. (2018). *Evaluación de modos de falla breakout y exfoliación en la pared del pozo mediante simulación numérica y pruebas de laboratorio*. (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga, Colombia.
- Parcevaux, P et al. (1985, August). *Cement Compositions for Cementing Wells, Allowing Pressure Gas-Channeling in the Cemented Annulus to Be Controlled*. (U.S. Patent No. 4,537,918). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US4537918A/en>
- Parcevaux, P., & Sault, P. (1984, November). Cement Shrinkage and Elasticity: A New Approach for a Good Zonal Isolation. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/13176-MS>
- Phi et al., (2019). Well Integrity Issues: Extreme High-Pressure High-Temperature Wells and Geothermal Wells a Review. In *SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/198687-MS>
- Portland Cement Association., (2022). *Portland Cements*. Illinois., USA.
- Ramachandran, V. (1986, January). Admixture and Addition Interactions in the Cement-Water System. *Il Cemento, No.1, 13-38*.
- Ravi, K., Bosma, M., y Gastebled, O. (2002, January). Improve the economics of oil and gas wells by reducing the risk of cement failure. In *IADC/SPE Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/74497-MS>
- Rayas et al., (2003). Medición del módulo de Young en el hule usando ESPI. *Revista mexicana de física*, 555-564. https://www.researchgate.net/publication/28077289_Medicion_del_modulo_de_Young_en_el_hule_latex_usando_ESI

- Rubiandini, R., Siregar, S., Suhascaryo, N., & Efril, D. (2005, May). The Effect of CaO and MgO as Expanding Additives to Improve Cement Isolation Strength under HPHT Exposure. *ITB Journal of Engineering Science*, 29-48. 10.5614/itbj.eng.sci.2005.37.1.3
- Sanjuán Barbudo, & Chinchón Yepes, S. (2004). Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland. *Publicacions Universitat Alacant*.
- Shadravan, A., & Mahmood, A. (2012, December). HPHT 101 - What Every Engineer or Geoscientist Should Know about High Pressure High Temperature Wells. In *the SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/163376-MS>
- Shaughnessy, J., & Helweg, J. (2002, February). Optimizing HTHP Cementing Operations. In *the IADC/SPE Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/74483-MS>
- Shi, G., Wenjun, L., & Yonghui, G. (1995, November). Modifying Set Cement Performance for Improving Cementing Job Quality. In *the SPE International Meeting*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/29924-MS>
- Soltanian, H., Khalokakaie, Ataei, M., & Kazemzadeh, E. (2016, October). An Elastomer Additive Improving Elastic Properties of Heavy Weight Oil Well Cement: A Laboratory Study. *Journal of Petroleum Science and Technology*
- Susca, A., Bambill, D., & Rossit, C. (2007). Análisis de la concentración de tensiones en placas ortótropas con orificio circular sometidas simultáneamente a cargas normales y tangenciales. *ENIEF 2007, Mecánica Computacional, Vol. (26), 386-405*.

- Teodoriu, C., Ugwu, I., & Schubert J. (2010). Estimation of Casing-Cement-Formation Interaction using a new Analytical Model. In *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/131335-MS>
- Thiercelin, M., Dargaud, J., Baret, J., & Rodriguez, W. (1997, October). Cement Design Based on Cement Mechanical Response. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/38598-MS>
- Tokay, V. (1982, June). *Additive composition for Portland cement materials*. (U.S. Patent No. 4,337,094). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US4337094A/fr>
- Ugwu, I. (2008, December). *Cement Fatigue and Well Integrity with Application To Life of Well Prediction*. (Tesis de Maestría). Texas A&M University., Texas, USA.
- Volpert, E. (2002). *A Cementing Composition Including a Dispersant Agent for Cementing Operation in Oil Wells*. (European Patent No. EP 1 193 230 A1)
- Wahl, W., Dever, C., & Ryan, R. (1963, April). *Low Water-Loss Cement Composition*. (U.S. Patent No. 3,086,588). U.S. Patent and Trademark Office.
- Wang, Z., Wu, P., Zhao, N., Dai, N., Zhai, Z., & Ai, T. (2018, March). Improving cracking resistance of cement mortar by thermo-sensitive poly N-isopropyl acrylamide (PNIPAM) gels. *Journal of Cleaner Production*, 1292-1303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.242>
- Woodarg, G., & Merkle, G. (1964, November). *Composition of Hydraulic Cement and Polyvinyl Acetate and Use Thereof*. (U.S. Patent No. 3,158,520). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US3058520A/en>

- Yetunde, S., & Ogbonna, J. (2011, July). Challenges and Remedy for Cementing of HPHT Wells in Nigerian Operation. In *Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/150751-MS>
- Zhaoguang, Y., Abdullah, S., Jerome S., & Catalin, T. (2012, October). Cement Failure Probability under HPHT Conditions Supported by Long Term Lab Studies and Field Cases. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/154746-MS>
- Zhaoguang, Y., Jerome, S., & Teodoriu, C. (2012, October). The Effect of Hole Angle and Cementing Complications on HPHT Well Integrity. In *SPE Canadian Unconventional Resources Conference*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/162839-MS>
- Zoback, M. (2007). Reservoir Geomechanics. First edition. *United Kingdom at the University Press, Cambridge*.