

ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Análisis del efecto de altas presiones y/o temperaturas sobre la integridad del cemento aplicado a pozos geotérmicos mediante la implementación de un modelo matemático en una herramienta computacional.**

Carlos Daniel Montesino García y Carlos Daniel Mosquera Reyes

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero de petróleos

Director

Andrés Felipe Ortiz Meneses

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2026

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### **Agradecimientos**

Principalmente, darle gracias a DIOS; agradecerles a mis padres, Luz Marina García Duran y Alfonso Montesino Yepes. Hoy, al culminar mi trabajo de grado, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento por ser mi sustento incondicional durante todo este proceso. Ustedes fueron mi alegría al superar cada obstáculo y mi ejemplo de perseverancia.

También deseo reconocer a quienes me acompañaron en esta travesía académica, amigos de la universidad y personas con las que compartí mis prácticas profesionales, cada uno de ustedes aportó algo invaluable a este camino.

Gracias a mis hermanos Melissa y Juan Montesino y mis amigos de infancia Samuel Quintero, Edmundo Flores y en especial a Daniel Morales. Este título lleva sus nombres porque fue construido con su apoyo.

Por último, un agradecimiento a nuestro director M. Sc. Andrés Ortiz, que siempre estuvo atento a cualquier inquietud para guiarnos y apoyarnos en todo momento, y nuestra alma mater, UIS, por ser egresados de esta prestigiosa universidad.

**!GRACIAS;**

Carlos Daniel Montesino García

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Agradezco primeramente a DIOS, a mi Madre Leonor Reyes que siempre me apoyó en todos los momentos dándome motivos para seguir adelante, también a mis tíos Sarith, Saul, Robert, Rodolfo, Daisy, Neil, Elmer y mi hermanita Rosario que siempre han creído en mí.

Agradezco a todos mis amigos, los de colegio, los de la universidad y los de la vida que siempre estuvieron en algún momento para mí en cualquier circunstancia, no necesito nombrarlos porque ellos saben quiénes son.

Por último, agradecer a la Universidad Industrial de Santander por darme la oportunidad de terminar mi carrera profesional en la mejor institución educativa del país, a nuestros profesores de aula y también un inmenso agradecimiento a nuestro director de tesis, el M.Sc. Andrés Felipe Ortiz Meneses, que siempre estuvo cuando lo necesitamos al igual que el grupo de investigación de estabilidad de pozo (GEIP).

Carlos Daniel Mosquera Reyes

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Tabla de contenido**

Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2. Marco teórico .....	15
2.1. Energía geotérmica .....	15
2.2. Física y tipos de reservorios.....	17
2.2.1. Riesgos asociados a las variaciones de presión y temperatura .....	17
2.3. Tipos de yacimiento y su relevancia operacional .....	18
2.3.1. Influencia del tipo de yacimiento en el diseño de cementación.....	18
2.3.2. Conexión entre el tipo de yacimiento y la pérdida de cohesión del cemento .....	19
2.4. Ejemplo de campos relevantes.....	19
2.4.1. Cerro Prieto un caso estudio de un sistema hidrotérmico (Hydrothermal systems) .....	20
2.5. Cemento .....	20
2.6. Colocación del cemento.....	21
2.7. Influencia del proceso de perforación en el aislamiento zonal exitoso .....	22
2.8. Suficiente cobertura de cemento .....	23
2.8.1. Pérdida de circulación.....	23
2.9. Verificación del top of cement (TOC).....	24

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

2.10. Fraguado del cemento .....	24
2.11. Escenarios de carga .....	26
2.12. Causas de las variaciones de presión .....	27
2.13. Causas de las variaciones de temperatura .....	27
2.14. Composición del cemento.....	28
2.15. Ingredientes del cemento .....	28
2.16. Aditivos para el cemento.....	30
2.17. Mecanismos de degradación del cemento.....	30
2.18. Densidad de la lechada de cemento .....	32
2.19. Establecer la resistencia a la compresión del cemento .....	34
2.20. Modelos analíticos y numéricos para la integridad del cemento .....	35
2.20.1. Limitaciones y capacidades de los enfoques numéricos avanzados .....	36
2.20.2 Justificación para la adopción de un enfoque analítico en el presente estudio .....	36
3. Metodología .....	37
3.1. Factores que afectan la integridad del cemento .....	37
3.1.1. Afectaciones de las HP/HT en la integridad del cemento en los pozos geotérmicos .....	37
3.1.2. Permeabilidad .....	41
3.2 Modelo matemático .....	42
3.2.2. Entradas del modelo:.....	45
3.2.3. Procesos del modelo .....	46

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

3.2.4. Salidas del modelo .....	47
3.2.5 Ejemplo aplicado .....	50
3.3. Elaboración de la herramienta computacional .....	52
3.3.1. Flujo de la herramienta computacional .....	53
3.4. Validación de la herramienta computacional .....	65
3.4.1. Análisis de precisión del modelo .....	75
4. Conclusiones .....	80
5. Recomendaciones .....	81
Referencias bibliográficas .....	84
Apéndices .....	91

**Tabla de figuras**

Figura 1. Recursos geotérmicos.....	12
Figura 2. Método experimental para medir contracción del cemento.....	22
Figura 3. Mecanismos de degradación del cemento.....	28
Figura 4. Grieta radial.....	35
Figura 5. Deformación plástica.....	36
Figura 6. Despegadura de la fase roca-cemento.....	37
Figura 7. Despegadura de la fase cemento-revestidor.....	37
Figura 8. Diagrama de flujo.....	44
Figura 9. Diagrama de procesos de cálculo de la herramienta.....	51
Figura 10. Diagrama de flujo de la herramienta en funcionamiento.....	53
Figura 11. Función principal del GUI.....	58
Figura 12. Parámetros de resistencia.....	58
Figura 13. Etiquetas para líneas gráficas.....	59
Figura 14. Creación de la ventana principal GUI.....	59
Figura 15. Definición de las columnas.....	59
Figura 16. Creación de botón de cálculo.....	60
Figura 17. Muestra de texto en la parte superior de la interfaz.....	60

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Figura 18. Desarrollo de la función calcular.....	60
Figura 19. Validación de función calcular.....	61
Figura 20. Bucle para cada pozo.....	61
Figura 21. Validaciones de datos de entrada.....	61
Figura 22. Ecuaciones del modelo analítico(1).....	62
Figura 23. Ecuaciones del modelo analítico(2).....	62
Figura 24. Ecuaciones del modelo analítico (3).....	62
Figura 25. Verificación de falla.....	63
Figura 26. Creación de la gráfica de barras.....	64
Figura 27. Ventana inicio de la herramienta.....	65
Figura 28. Ingreso de datos a la herramienta.....	66
Figura 29. Resultados pozo M-8.....	67
Figura 30. Resultados pozo M-13.....	68
Figura 31. Resultados pozo M-53.....	69
Figura 32. Resultados pozo CP-1972.....	71
Figura 33 Resultados pozo CP-5.....	72
Figura 34 Gráfica comparativa de los resultados de cada pozo.....	73

**Lista de tablas**

Tabla 1. Tabla componentes del Clinker.....	26
Tabla 2. Datos de salida pozo M-8.....	67
Tabla 3. Datos de salida pozo M-13.....	68
Tabla 4. Datos de salida pozo M-53.....	70
Tabla 5. Datos de salida pozo CP-1972.....	71
Tabla 6 Datos de salida pozo CP-5.....	72
Tabla 7. Comparación de predicciones del modelo versus condiciones reales de falla.....	77
Tabla 8. Matriz para la predicción de fallas mecánicas.....	77

**Resumen**

Título: Análisis del efecto de altas presiones y/o temperaturas sobre la integridad del cemento aplicados a pozos geotérmicos mediante la implementación de un modelo matemático en una herramienta computacional.\*

Autores: Carlos Daniel Montesino García, Carlos Daniel Mosquera Reyes.\*\*

Palabras clave: Geotermia, Cemento, Cohesión, Resistencia, Círculo de Mohr, Energía renovable.

Descripción: En esta investigación se analizó el impacto de condiciones extremas de presión y temperatura en la integridad del cemento de pozos geotérmicos. Se implementó un modelo analítico basado en la teoría elástica de Lamé en una herramienta computacional desarrollada en MATLAB, diseñada para calcular los esfuerzos radiales y circunferenciales en las interfaces del pozo a partir de parámetros geométricos y operativos.

La herramienta se validó con datos de cinco pozos del campo Cerro Prieto, revelando que la interfaz cemento-formación es la más propensa a fallar por compresión. Las predicciones del modelo coincidieron con el historial de fallas reportado, identificando correctamente los pozos con daños mecánicos severos (M-8 y CP-1972) y aquellos sin falla de este tipo (M-13, M-53 y CP-5). El estudio demostró una precisión predictiva del 100 % para fallas mecánicas dentro del dominio analizado, consolidando la validez del enfoque.

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de ingeniería físicoquímicas – Escuela de ingeniería de petróleos – Director:  
Magister en ingeniería de hidrocarburos Andres Felipe Ortiz Meneses

## Summary

Title: Analysis of the effect of high pressures and/or temperatures on the integrity of cement applied to geothermal wells through the implementation of a mathematical model in a computational tool.\*

Authors: Carlos Daniel Montesino Garcia, Carlos Daniel Mosquera Reyes.\*\*

Keywords: Geothermal, Grout, Cohesion, Endurance, Mohr's Circle, Renewable energy.

Description: This research analyzed the impact of extreme pressure and temperature conditions on the integrity of cement in geothermal wells. An analytical model based on Lamé's elastic theory was implemented in a MATLAB-based computational tool to calculate radial and circumferential stresses at well interfaces from geometric and operational parameters.

The tool was validated with data from five wells in the Cerro Prieto field, revealing that the cement-formation interface is the most prone to failure due to compression. The model's predictions matched the reported failure history, correctly identifying the wells with severe mechanical damage (M-8 and CP-1972) and those without such failure (M-13, M-53, and CP-5). The study demonstrated 100% predictive accuracy for mechanical failures within the analyzed domain, confirming the validity of the approach.

\*Thesis

\*\*Faculty of physical-chemical engineering – school of petroleum engineering – Advisor: Andres Felipe Ortiz Meneses, Master of Science in petroleum engineering

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### **Introducción**

La integridad de la cementación en pozos geotérmicos constituye un factor crítico para la seguridad operacional y la sostenibilidad de los proyectos de energía renovable. Las condiciones extremas de alta presión y alta temperatura (HP/HT) propias de estos reservorios someten al sistema casing-cemento-formación a esfuerzos mecánicos que pueden comprometer el aislamiento zonal, generar migración de fluidos no controlada e incluso ocasionar el abandono prematuro de los pozos. A pesar de los avances en la tecnología de cementación, aún existe una brecha en la disponibilidad de herramientas prácticas que permitan cuantificar de manera rápida y confiable el riesgo de falla mecánica del cemento durante las etapas de diseño y operación. La presente investigación aborda esta necesidad mediante la implementación de un modelo analítico basado en la teoría de Lamé, integrado en una herramienta computacional de fácil aplicación, con el fin de evaluar el efecto de las HP/HT sobre la integridad del cemento en pozos geotérmicos.

El primer capítulo expone los fundamentos conceptuales de la energía geotérmica, la clasificación de los reservorios y los mecanismos de degradación del cemento bajo condiciones extremas. Se revisan los escenarios de carga, la composición del cemento clase G y los aditivos empleados, así como los modelos analíticos y numéricos existentes, justificando la adopción de un enfoque analítico por su simplicidad y adecuación a los datos típicamente disponibles en la fase de diseño. El segundo capítulo describe la metodología desarrollada, que comprende la identificación de las variables clave del sistema, la formulación matemática del modelo analítico basado en la solución de Lamé para cilindros concéntricos y la implementación computacional en MATLAB mediante una interfaz gráfica de usuario. Se detalla el proceso de cálculo de presiones de contacto en las interfaces casing-cemento y cemento-formación, así como la evaluación de los esfuerzos radiales y circunferenciales que determinan la falla mecánica del cemento. El tercer

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

capítulo presenta la validación de la herramienta mediante su aplicación a cinco pozos reales del campo geotérmico Cerro Prieto, contrastando los resultados con el historial de fallas documentado en la literatura técnica. El desarrollo matemático completo del software y las instrucciones detalladas para su uso se incluyen como anexos (Anexos A y B), los cuales complementan la exposición del modelo y facilitan la reproducibilidad del estudio. Finalmente, se discuten los hallazgos, las limitaciones del modelo y las proyecciones para futuras investigaciones.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 1. Objetivos

#### 1.1 Objetivo general

Analizar el efecto de las altas presiones y/o temperaturas sobre la integridad del cemento aplicado a pozos geotérmicos mediante la implementación de un modelo matemático en una herramienta computacional.

#### 1.2 Objetivos específicos

- Realizar un estudio del daño que provocan las HP/HT en la integridad del cemento en los pozos geotérmicos de acuerdo con la información encontrada en la vigilancia tecnológica.
- Definir un modelo matemático que nos ayude a cuantificar la integridad del cemento en relación con las variables identificadas mediante la vigilancia tecnológica.
- Implementar un modelo matemático en una herramienta computacional que simule el efecto de las HP/HT y nos ayude a evaluar la integridad del cemento en pozos geotérmicos.
- Verificar el funcionamiento del modelo matemático por medio de su aplicación a un caso de estudio de un pozo geotérmico.

## **2. Marco teórico**

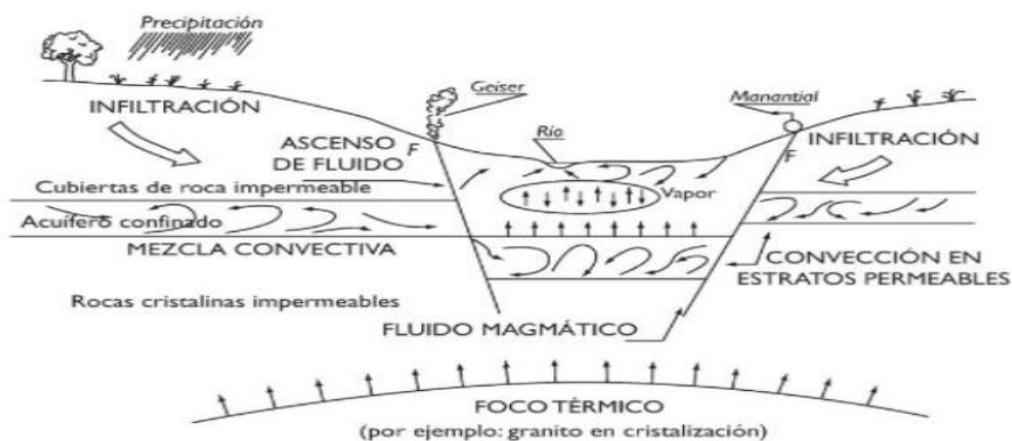
En este capítulo se revisan los conceptos, modelos y fundamentos científicos necesarios para comprender las fallas que pueden presentarse en la cementación de pozos geotérmicos bajo condiciones de alta presión y temperatura (HP/HT). El contenido se enfoca en los aspectos relacionados con la integridad mecánica del cemento, su interacción con el revestidor (casing) y la formación rocosa.

### **2.1. Energía geotérmica**

La energía geotérmica aprovecha el calor interno de la Tierra para generar electricidad y energía térmica. Los recursos explotados varían en temperatura y presión; las condiciones HP/HT son especialmente críticas para la integridad de las barreras de cemento en pozos profundos. Para que un recurso geotérmico pueda ser explotado, debe reunir tres características físicas (González Velasco, 2015):

1. Debe existir un acuífero.
2. Una cubierta rocosa que retenga el fluido geotérmico.
3. Una fuente de calor.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 1. Recursos geotérmicos.**

**Nota. Tomado de González Velasco, J. (2015). Energías renovables. Editorial Reverté**

Las fumarolas, los géiseres y las fuentes termales son manifestaciones superficiales de la actividad geotérmica. Estos fenómenos evidencian la transferencia de calor desde el interior de la Tierra hacia el exterior, un flujo energético que se disipa constantemente en la corteza terrestre (IDAE & IGME, 2008).

La energía geotérmica se considera un recurso renovable de gran importancia, ya que es una de las pocas fuentes capaces de producir electricidad de forma continua (24 horas al día). Su aprovechamiento en condiciones adecuadas puede alcanzar costos competitivos frente al carbón o al gas natural, lo que permite a los países reducir su dependencia de combustibles importados y fortalecer su seguridad energética. Además, por tratarse de una fuente de energía limpia, la geotermia puede contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de carbono del sector energético (Grupo Banco Mundial, 2017).

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 2.2. Física y tipos de reservorios

Un reservorio geotérmico se caracteriza por un conjunto de parámetros que determinan su viabilidad y su comportamiento durante la operación. Entre ellos destacan la temperatura del fluido, la presión del sistema, la permeabilidad de las rocas y la composición química del fluido geotérmico. La temperatura influye directamente en la entalpía disponible para la generación de energía y en las propiedades termodinámicas del fluido. La presión condiciona la movilidad del fluido y las tasas de transferencia de calor entre la roca y el fluido. La permeabilidad determina la facilidad con la que el fluido circula a través de las fracturas y la matriz rocosa. Por último, la composición del fluido —incluyendo salinidad y gases disueltos— afecta tanto la corrosión de los materiales como las reacciones minerales que pueden modificar la porosidad y la permeabilidad a lo largo del tiempo. Estos parámetros deben evaluarse de forma conjunta para estimar el rendimiento térmico y la estabilidad operativa del yacimiento, así como para diseñar estrategias eficientes de extracción y control de pozos.

#### 2.2.1. Riesgos asociados a las variaciones de presión y temperatura

La interacción entre temperatura y presión desempeña un papel central en el diseño del pozo geotérmico. Las variaciones en estos parámetros pueden alterar la viscosidad del fluido y su comportamiento de transporte, así como inducir cambios de volumen en las lechadas utilizadas para sellar y conectar las secciones del pozo.

Termodinámicamente, los drásticos gradientes térmicos a los que se someten las lechadas de cemento durante su fraguado pueden generar cambios de volumen diferenciales entre la tubería, el cemento y la formación, promoviendo la formación de microanillos (*microannulus*) y la pérdida de aislamiento zonal (Nelson & Guillot, 2006). Adicionalmente, las altas temperaturas aceleran los procesos de degradación química, como la carbonatación de las lechadas de cemento.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 2.3. Tipos de yacimiento y su relevancia operacional

La clasificación de los sistemas geotérmicos constituye un pilar fundamental para la planificación y ejecución exitosa de un pozo, ya que define los desafíos operativos y las soluciones técnicas requeridas. Una clasificación práctica, basada en la fase dominante del fluido y su entalpía, distingue principalmente entre yacimientos de vapor seco, sistemas de agua dominada (hydrothermal systems) y sistemas de alta entalpía (Dippipo, 2016). Esta tipología no es una mera categorización académica, sino que posee una relevancia operacional directa.

- **Yacimiento de vapor seco:** contiene principalmente vapor no condensable a presión de reserva, lo que favorece curvas de producción con caudales de vapor elevados y temperaturas relativamente constantes.
- **Yacimientos de agua dominada (hydrothermal systems):** presentan una fase líquida dominante con presencia de vapor en fases de estrangulamiento de la presión, lo que demanda estrategias de manejo de presión y control de entrada de agua para evitar disminuciones abruptas en la entalpía.
- **Yacimientos de alta entalpía:** exhiben temperaturas elevadas tanto en fases líquidas como en vapor y requieren diseños de extracción que optimicen la transferencia de calor hacia el fluido de producción y minimicen pérdidas por reacoplamiento de fases.

Estas diferencias operan como condicionantes en aspectos críticos como el esquema de terminación, la selección de materiales, el diseño del programa de cementación y la formulación de la lechada cementante.

#### *2.3.1. Influencia del tipo de yacimiento en el diseño de cementación*

La selección de la lechada se alinea con el tipo de yacimiento geotérmico. En yacimientos

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

de vapor seco se priorizan cementos estables ante calor extremo y con baja retracción para evitar fisuras por expansión. En sistemas con predominancia de agua, es crucial la compatibilidad química entre la lechada y las condiciones húmedas, incorporando aditivos que minimicen la corrosión y las reacciones químicas indeseadas. Los yacimientos de alta entalpía requieren cementaciones con alta resistencia térmica y gran rigidez para sostener gradientes térmicos y posibles cambios de fase.

.En todos los escenarios, la gestión de riesgos por pérdida de cohesión del cemento debe integrarse en el diseño, con una estrategia de sellado, selección de materiales y monitoreo continuo durante la vida útil del pozo.

### ***2.3.2. Conexión entre el tipo de yacimiento y la pérdida de cohesión del cemento***

La cohesión del cemento se ve afectada por el tipo de yacimiento y sus condiciones operativas. En vapor seco, las temperaturas elevadas pueden inducir retraimiento y fisuración, exigiendo mezclas de cemento con menor sensibilidad a la retracción y mayor estabilidad térmica. En entornos dominados por agua, las posibles reacciones químicas entre el fluido geotérmico y el cemento pueden deteriorar las interfaces y aumentar la permeabilidad de la lechada si esta no es químicamente compatible. En yacimientos de alta entalpía, las fluctuaciones de temperatura y la coexistencia de fases requieren cementaciones con alta resistencia a tensiones y coeficientes de expansión compatibles con las rocas circundantes.

## **2.4. Ejemplo de campos relevantes**

La validación de las estrategias de diseño para pozos geotérmicos requiere el análisis de casos de campo que presenten condiciones operativas extremas y problemáticas documentadas. La selección de campos emblemáticos como Cerro Prieto (México), The Geysers (EE. UU.) y

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Larderello (Italia) se fundamenta en su representatividad de distintos tipos de yacimiento y en la amplia literatura técnica que detalla los desafíos de integridad encontrados a lo largo de su vida productiva. Estos campos sirven para analizar cómo los parámetros específicos del reservorio, en particular los perfiles anómalos de presión y temperatura, se traducen en fallas operacionales concretas, ofreciendo lecciones críticas para el diseño de pozos nuevos (Gutiérrez-Negrín & Izquierdo-Montalvo, 2010).

### ***2.4.1. Cerro Prieto un caso estudio de un sistema hidrotérmico (Hydrothermal systems)***

El campo geotérmico Cerro Prieto es uno de los más grandes del mundo y constituye un caso paradigmático de un sistema de agua dominado por un complejo perfil de presión y temperatura. La existencia de múltiples zonas productivas superpuestas con gradientes de presión variables y presencia de fluidos salinos ha generado históricamente problemas de colapso de tubería y corrosión en la sarta de producción. Estos inconvenientes están directamente ligados a los esfuerzos mecánicos inducidos por los cambios de presión en formaciones arcillosas y a la naturaleza química agresiva del fluido geotérmico. El estudio de este campo resulta indispensable para comprender los requisitos de un diseño de pozo que debe soportar tanto cargas mecánicas variables como un ambiente corrosivo severo (Dobson et al., 2018).

## **2.5. Cemento**

El cemento es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que al entrar en contacto con el agua forma un cuerpo sólido. Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse. (Abraham Pérez, 2022)

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad. Es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos. Algunos cementos Portland son de fabricación especial, debido a que las condiciones de los pozos difieren significativamente entre sí al variar su profundidad. En la solución de algunos problemas específicos de pozos se utilizan cementos de menor uso.

El cemento Portland es, además, el ejemplo típico de un cemento hidráulico: fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. (Abraham Pérez, 2022)

### **2.6. Colocación del cemento**

Para lograr un aislamiento zonal adecuado y restaurar la barrera natural que se alteró durante la perforación, la colocación adecuada del cemento es fundamental. Los parámetros clave en ese proceso son:

- Suficiente cobertura de cemento: el volumen de lechada debe ser suficiente para llevar la parte superior del cemento (TOC) por encima de la(s) zona(s) de interés donde los fluidos podrían fluir desde/hacia (es decir, acuíferos, intervalos de hidrocarburos).
- Acondicionamiento adecuado del pozo: el aislamiento de la tubería de revestimiento, los diseños de fluidos y las tasas de bombeo de colocación deben permitir el desplazamiento y la interfaz de fluidos adecuados para mitigar el riesgo de canalización de lodo y contaminación con lechada y para garantizar la calidad del revestimiento de cemento en el espacio anular. en todos los intervalos críticos.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Los factores que afectan una buena colocación de cemento se resumen en Bittleston y Guillot (1991) como:

- Geometría del pozo
- Lechada de cemento
- Acondicionamiento del lodo
- Movimiento de la tubería del revestimiento
- Lavados/espaciadores

### **2.7. Influencia del proceso de perforación en el aislamiento zonal exitoso**

El éxito de un trabajo de cementación de pozos comienza con la calidad de la construcción del pozo. Lograr un pozo de calidad implica obtener un calibre consistente (diámetro uniforme), una rugosidad mínima (pequeñas variaciones de escala en la superficie del pozo) y una estabilidad adecuada de las paredes (Brufatto et al., 2003). Durante el proceso de perforación, la selección cuidadosa de los fluidos de perforación apropiados para las condiciones dadas del pozo es crucial para lograr una buena limpieza del hoyo y minimizar la erosión de la formación (lavados químicos y mecánicos). La hidráulica de fluidos desempeña un papel fundamental en este propósito; los ingenieros tienen control sobre los siguientes parámetros:

- Densidad del fluido
- Propiedades reológicas
- Pérdida de presión por fricción
- Caudales

El proceso de perforación puede causar algún daño a la formación. La lechada de cemento es un fluido denso y una mala cementación puede inducir fracturas en la formación, comprometiendo

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

el aislamiento zonal.

### **2.8. Suficiente cobertura de cemento**

Una cobertura suficiente de cemento es esencial para aislar las zonas productivas y evitar la migración de fluidos no deseados. Para garantizar que el top of cement (TOC) se encuentre por encima de los intervalos críticos, deben considerarse tanto el volumen de lechada bombeado como las condiciones operativas durante la colocación.

#### ***2.8.1. Pérdida de circulación***

Cualquier pérdida de fluido hacia la formación durante un trabajo de cementación puede reducir la altura de la columna de cemento, comprometiendo la cobertura de las zonas de interés y potencialmente causando serios problemas de control del pozo. Se deben tomar todas las medidas posibles para mitigar este riesgo, lo que implica (Baret et al., 1990):

- Reparar las pérdidas existentes (si las hay) antes del trabajo de cementación sellando las formaciones permeables
- Bombear cantidades excesivas de cemento para asegurar que cualquier pequeña pérdida (no poco común) no comprometa los objetivos generales de cobertura de cemento
- Evaluar el riesgo de pérdidas inducidas durante el trabajo de cementación (seguridad estática y dinámica) y ajustar el diseño de los fluidos y la velocidad de bombeo en consecuencia: si bien bombear a una velocidad más rápida podría mejorar la eliminación de lodo, el aumento posterior de la presión de fricción en el espacio anular combinado con el aumento de la hidrostática de la columna de pulpa podría fracturar la formación e inducir pérdidas. Si la ventana de presión es estrecha, se puede considerar la adición de material

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

de pérdida de circulación (LCM) en los fluidos o realizar trabajos de cementación en dos etapas.

### **2.9. Verificación del top of cement (TOC)**

La parte superior del cemento se puede verificar visualmente cuando se prevén retornos a la superficie. Alternativamente, la presión de elevación final (diferencial en la presión hidrostática entre el anular y el interior de la tubería de revestimiento) puede dar una indicación de la parte superior real del cemento, que puede verificarse más tarde con un registro de adherencia del cemento u otra técnica equivalente.

### **2.10. Fraguado del cemento**

Una vez colocada la lechada, si la mezcla es inestable, el agua libre tiene el potencial de fluir y formar canales dentro del cemento (Brufatto et al., 2003). Este fenómeno se conoce como inestabilidad de la lechada.

A medida que el cemento fragua, experimenta una transición del estado fluido al sólido. El volumen que ocupa el cemento fraguado es menor que el de la lechada líquida. Esta contracción puede dar lugar a una reducción de la presión del cemento que, si es inferior a la presión del fluido de formación, puede provocar la migración de gas hacia el cemento. Por esta razón, la lechada de cemento generalmente se diseña para lograr una sobrepresión con respecto a la presión intersticial de la formación. Por el contrario, una sobrepresión excesiva puede provocar la pérdida de agua de la mezcla hacia capas de roca permeable.

La contracción del cemento conduce a una reducción volumétrica y, en consecuencia, puede ocasionar la desunión entre el cemento y el revestidor o entre el cemento y la formación. También puede dar como resultado grietas por tracción y, por ende, una mayor permeabilidad que

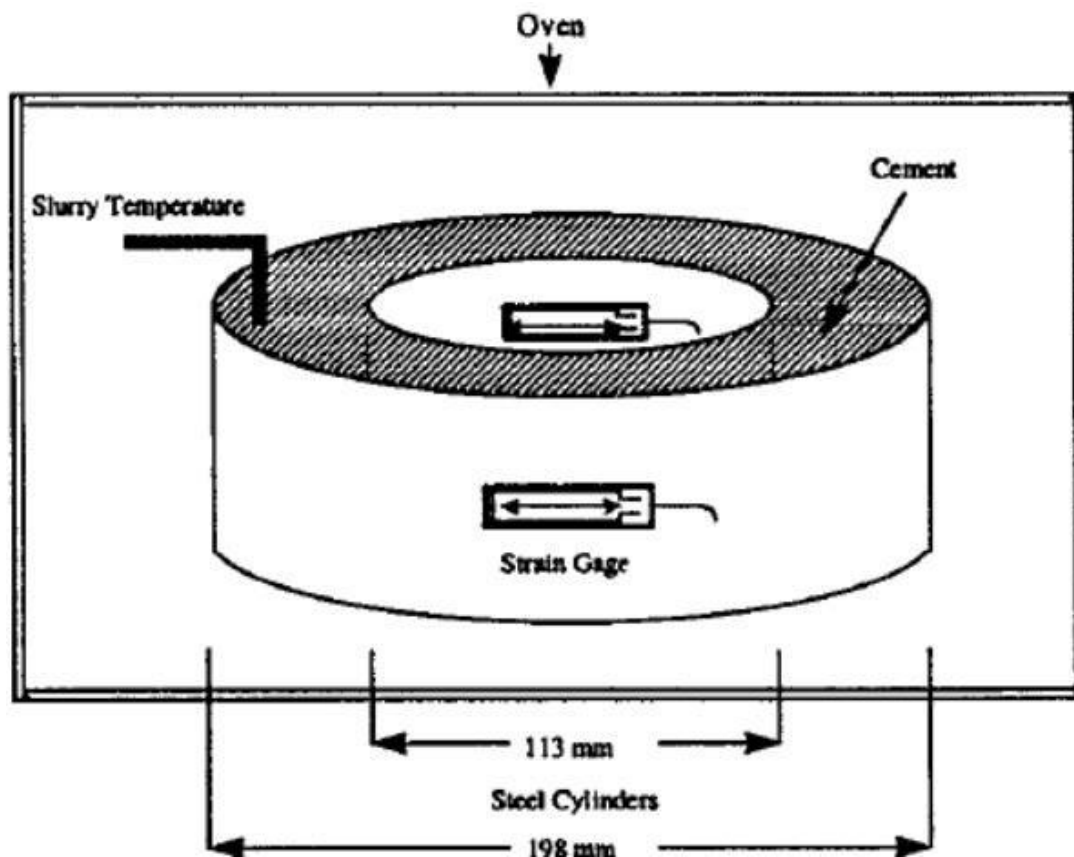
## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

proporcione una ruta de migración para los fluidos. Además, se pueden crear fracturas circunferenciales debido a la contracción, lo que favorece la acumulación de gas después del fraguado.

La determinación de la contracción y expansión de las formulaciones de cemento para pozos está sujeta a las normas API (ISO 10426-5, 2004), aunque solo a presión atmosférica. Backe et al. (1998) diseñaron un método experimental para medir la contracción de la lechada, suficientemente sensible para cuantificar la contracción por hidratación, encontrando una clara correlación entre la contracción química total y el contenido de cemento.

Zhang et al. (2010) realizaron experimentos con relaciones agua/cemento (A/C) entre 0,25 y 0,4 y temperaturas de 10 a 60 °C. Estos experimentos midieron la contracción, el grado de hidratación y el tiempo de fraguado. Mediante un modelo de crecimiento y nucleación de límites, obtuvieron buenos ajustes a los datos de contracción química.

Thiercelin et al. (1998) realizaron experimentos anulares instrumentados utilizando dos cilindros de acero concéntricos de 1 mm de espesor y 80 mm de alto, con diámetros externos de 111 mm y 196 mm. El cemento se vertió en el espacio anular después de calentar los cilindros de acero a 77 °C. La figura 2 muestra un diagrama del montaje experimental.

*Figura 2 Método experimental para medir contracción del cemento*

*Nota. Tomado de Thiercelin et al. (1998)*

## 2.11. Escenarios de carga

Las tensiones a las que probablemente estará sometido un pozo durante toda su vida útil son cruciales para realizar análisis predictivos. La identificación de eventos de carga críticos — tales como pruebas de integridad de presión en la terminación, operaciones de perforación y tensiones ejercidas durante fracturamiento hidráulico de alta presión— y su cuantificación para las condiciones de tensión geológicas in situ dadas es fundamental en la predicción de la integridad de la capa de cemento.

Para preservar la integridad, el revestimiento de cemento debe resistir los esfuerzos originados por los diferentes procedimientos de producción y terminación de pozos (Ravi et al.,

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

2002), como la perforación, los procesos de producción (Wang & Taleghani, 2014) y la expansión y contracción del revestidor (Jackson & Murphey, 1993).

### **2.12. Causas de las variaciones de presión**

Las fluctuaciones en la magnitud de la presión a lo largo de un pozo pueden ocurrir debido a las siguientes razones:

- Expansión/contracción del revestimiento (Goodwin y Crook, 1992).
- Actividades de terminación, incluyendo, cuando corresponda, fracturación hidráulica
- Cargas de tensiones de formación tales como tensión tectónica, hundimiento y fluencia de la formación (Zhang y Bachu, 2011)
- Cambio de presión intersticial o temperatura (Dusseault et al., 2000)

La condición del cemento de fondo de pozo cambia debido a los cambios de presión impuestos durante la vida útil del pozo. Dichos cambios ocurren principalmente a través de cuatro etapas: perforación de pozos, perforación de revestimiento, fracturamiento hidráulico y producción (Thiercelin et al., 1997).

La medida en que una sarta de revestimiento en particular está sujeta a presiones en la fase de producción depende de si se emplean tuberías de producción; es decir, si las sargas de revestimiento superiores perciben las presiones impartidas por las operaciones de fracturación hidráulica.

### **2.13. Causas de las variaciones de temperatura**

Las fluctuaciones en la magnitud de la temperatura a lo largo de un pozo pueden ocurrir debido a las siguientes razones:

- Inyecciones de vapor caliente (Albawi, 2013)

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

- Inyecciones de agua fría (Bois et al., 2009).
- Hidratación del cemento (Neville y Brooks, 1987; Mehta y Monteiro, 2014).

Las tensiones térmicas pueden dar lugar a deformaciones en el fondo del pozo. El diámetro y la circunferencia de la tubería de revestimiento de acero se expanden debido a las condiciones de alta temperatura; la fuerza circunferencial resultante genera una fuerza de corte en la interfaz del cemento y la tubería de revestimiento y puede causar la falla de la unión entre ambos o la aparición de fracturas radiales (Khandka, 2007). (Bennett Terry, 2016).

### **2.14. Composición del cemento**

La composición del cemento influye en su capacidad para resistir el ataque químico y las sollicitaciones mecánicas. Los factores clave incluyen:

- Tipo de cemento
- Contenido de cemento
- Relación agua - cemento

La composición de los cementos para pozos se rige por la especificación del Instituto Americano del Petróleo (API Spec 10A, 2002), recientemente incorporada como especificación ISO (ISO 10426-1, 2009). Se especifican ocho clases de cemento (A-H) con tres grados de resistencia a los sulfatos: ordinario (O), moderado (MSR) y alto (HSR) (Bennett Terry, 2016). El enfoque en este estudio está en la clase G de cementos, ya que el uso de clases más bajas es casi inexistente en la práctica actual. No obstante, cabe señalar que algunos pozos legados abandonados pueden haber sido construidos con cementos de menor grado.

### **2.15. Ingredientes del cemento**

Los primeros cementos de yeso y cal no eran hidráulicos (inestables en agua). Los antiguos

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

griegos y los romanos crearon cementos hidráulicos con la adición de materiales puzolánicos que reaccionan con la cal (Mehta & Monteiro, 2014).

El cemento Portland no requiere material puzolánico para formar propiedades resistentes al agua. Es una mezcla compuesta principalmente por cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, mezclados entre sí para formar productos complejos en un horno y posteriormente enfriados para producir clínker, al cual se añade yeso ( $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para evitar el fraguado relámpago (Neville & Brooks, 1987). Las fuentes comunes de calcio son las calizas y la creta, pero las arcillas (que contienen alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y óxido de hierro,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o la dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) suelen estar presentes como impurezas.

En la figura 3 se presenta la composición típica del clínker, donde se identifican los cuatro compuestos principales: silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). La etapa final de la fabricación del cemento es la pulverización del clínker en un molino de bolas y la adición de yeso para controlar el fraguado temprano. Durante el proceso de fabricación, la composición química se somete a un estrecho seguimiento y control. El clínker final se analiza cuantitativamente mediante fotomicrografía y difracción de rayos X.

**Tabla 1. Tabla de componentes del clínker**

Componentes	Composición	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

*Nota. Tomado de Neville and Brooks (1987).*

### **2.16. Aditivos para el cemento**

Existe una gran cantidad de aditivos de cemento utilizados en la cementación de pozos; sin embargo, muchos de estos aditivos se pueden agrupar según su función principal (Smith, 1987):

- Aceleradores, para incrementar el proceso de hidratación y el desarrollo de la fuerza.
- Retardadores para retardar el proceso de hidratación para mantener la lechada de cemento trabajable.
- Aditivos ligeros, para reducir el peso y, por tanto, la presión hidrostática.
- Aditivos pesados, para aumentar el peso y, por ende, la presión hidrostática.
- Agentes de control de pérdidas de circulación.
- Agentes de control de filtración.

Además de los aditivos mencionados, la temperatura ambiente en los pozos puede provocar una regresión de la resistencia, particularmente en temperaturas superiores a 110 °C. La relación  $\text{CaO/SiO}_2$  del producto de hidratación del cemento se reduce por debajo de 1,3 mediante la adición de harina de sílice (Mehta & Monteiro, 2014).

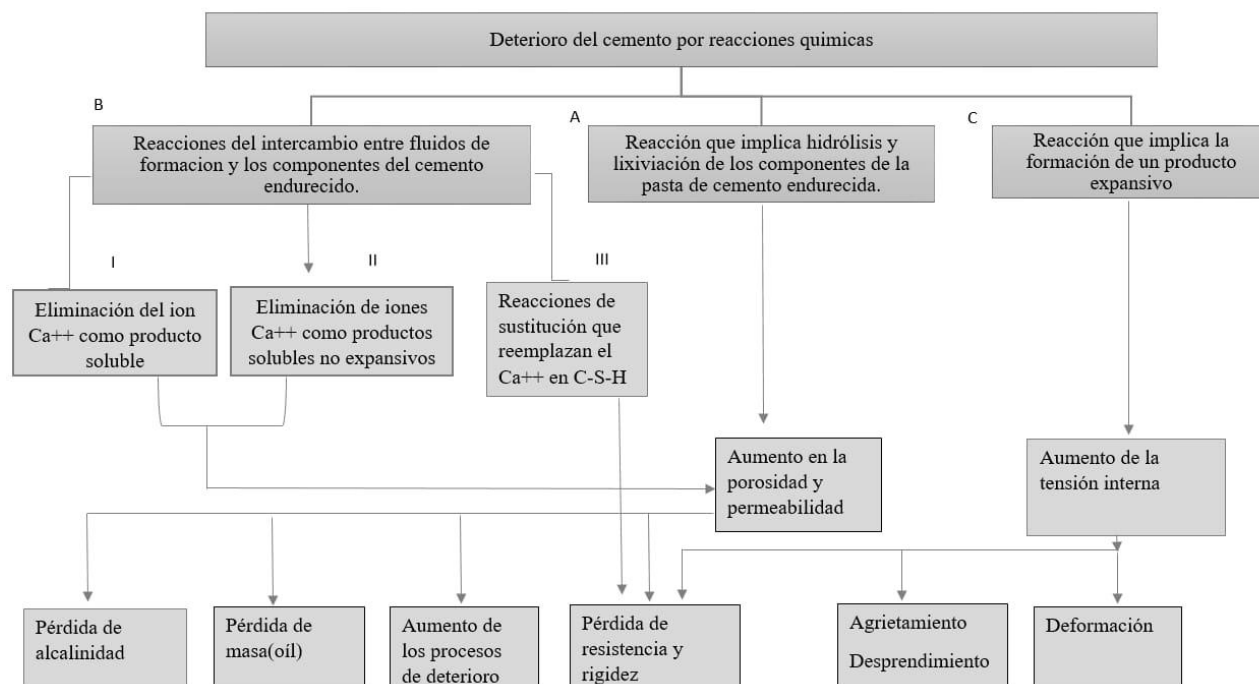
### **2.17. Mecanismos de degradación del cemento**

La figura 4 ofrece una descripción general de los mecanismos de deterioro químico del hormigón y, por tanto, de los cementos. El desconchado del hormigón, particularmente observado en ambientes marinos, se debe al cloruro de las sales marinas que provoca la corrosión de las barras de refuerzo. Las reacciones químicas con algunos agregados en el concreto han provocado su expansión y daño debido a un proceso conocido como reacción álcali-sílice (ASR). Estos

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

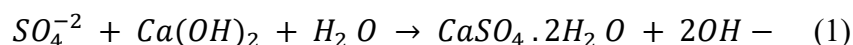
mecanismos de degradación no se observan en los cementos de pozos debido a la ausencia de barras de refuerzo y de agregados en las lechadas de cemento utilizadas en la construcción de pozos (Bennett Terry, 2016).

**Figura 3. Mecanismos de degradación del cemento**



*Nota. Tomado de Mehta and Monteiro (2014).*

La interacción química del cemento con las aguas de formación puede conducir a la degradación potencial del cemento. Los sulfatos se encuentran comúnmente en las aguas de formación y pueden reaccionar con el hidróxido de calcio en el cemento para formar yeso (Bensted, 1998):



El yeso luego reacciona con los productos de hidratación del cemento fraguado para formar etringita. Los productos de estas reacciones (yeso y etringita) ocupan mayor volumen. La

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

resistencia a los sulfatos del cemento se incrementa mediante la sustitución de  $C_3A$  ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) por ferrita (Bensted, 1998).

La exposición del cemento del pozo al dióxido de carbono ( $CO_2$ ) puede conducir a la carbonatación. Este proceso puede ocurrir debido a la exposición al aire húmedo (Bensted, 1998) y ha recibido atención recientemente debido al uso de  $CO_2$  para mejorar la recuperación de petróleo y las investigaciones sobre la viabilidad del almacenamiento de carbono.

### **2.18. Densidad de la lechada de cemento**

En algunos casos, es suficiente reducir la densidad de la lechada de cemento para evitar pérdidas de circulación. La reducción de densidad se logra agregando materiales livianos a la lechada de cemento o espumando la lechada (Gaurina-Medimurec et al., 2021). Deben establecerse factores críticos de diseño para minimizar la presión dinámica o la densidad de circulación equivalente (ECD) que se ejerce en las zonas de pérdida. Para reducir la presión hidrostática de la columna de fluido durante la colocación de la lechada de cemento, en situaciones con pérdida de circulación y formaciones débiles con bajos gradientes de fractura, se deben usar lechadas de cemento de baja densidad (livianas) o ultrabaja densidad (ultraligeras) que tengan una densidad menor que la de la lechada de cemento puro API clase G ( $<1800 \text{ kg/m}^3$ ), pero aún suficientemente alta como para desarrollar resistencia a la compresión en el tiempo esperado.

Existe una variedad de materiales disponibles para proporcionar una menor densidad de la lechada, así como agentes de prevención de pérdidas. La densidad de la lechada se puede reducir agregando materiales livianos convencionales como bentonita, silicatos de sodio, tierra de diatomeas, cenizas volantes, humo de sílice, gilsonita, carbón en polvo, microesferas y nitrógeno. Las lechadas de cemento ultraligero con densidades inferiores a  $1200 \text{ kg/m}^3$  se pueden preparar

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

utilizando microesferas huecas o nitrógeno, mientras que las lechadas de cemento ligero utilizan otros materiales livianos (Gaurina-Medimurec et al., 2021).

Los materiales enumerados anteriormente entran en la categoría de extensores. Su densidad es menor que la densidad del cemento, y algunos de ellos absorben agua, por lo que su adición aumenta el rendimiento de una lechada de cemento. A diferencia de los extensores, los agentes de control de pérdida de circulación evitan la pérdida de lechada hacia zonas de pérdida al cerrar los poros y fracturas de las rocas expuestas o al causar un comportamiento tixotrópico de la lechada.

Los aditivos de cemento comunes utilizados para evitar la pérdida de circulación incluyen aditivos granulares (como gilsonita y carbón, cáscaras de nuez molidas), hojuelas (como hojuelas de celofán) o fibras (hechas de vidrio o polímeros sintéticos) como materiales de unión. Además, se pueden agregar diferentes materiales (yeso, ciertas sales de sulfato solubles, bentonita, polímeros celulósicos reticulados) al cemento Portland para obtener una lechada de cemento tixotrópica.

Las operaciones de cementación que utilizan fibras químicamente inertes avanzadas mitigan los problemas de pérdida de circulación sin comprometer la eficiencia operativa o la calidad de la lechada o del cemento fraguado (Gaurina-Medimurec et al., 2021).

Los extensores permiten agregar más agua o materiales livianos a una lechada para aligerar la mezcla y evitar que los sólidos del cemento se separen. Además, los diluyentes de cemento reducen la cantidad de cemento necesaria para una operación de cementación y, por lo tanto, aumentan el rendimiento de la lechada. Algunos de los extensores mencionados (como las microesferas huecas de vidrio y cerámica, también conocidas como cenósferas, con un tamaño de 10 a 100  $\mu\text{m}$ ) se trituran bajo la acción de alta presión, por lo que se pierde el efecto de reducción

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

de la densidad. Por lo tanto, al elegir materiales livianos, se debe considerar su resistencia, es decir, la presión máxima que pueden soportar sin aplastarse, porque si se supera esta presión, se romperá un porcentaje de las microesferas y la suspensión tendrá una mayor densidad después de la colocación.

Las microesferas huecas de cerámica se agregan a las lechadas de cemento (expresadas como porcentaje en peso del cemento, BWOC) para reducir la densidad de la lechada a niveles bajos donde el agua en combinación con diluyentes convencionales no logra las propiedades requeridas. Una lechada de cemento preparada con cenósferas es un sistema estable y las propiedades del cemento fraguado muestran valores relativamente altos de resistencia a la compresión y baja permeabilidad, lo que se traduce en una alta resistencia al ácido y a las aguas de salmuera. Desafortunadamente, la alta presión de fondo de pozo podría aplastar las cenósferas convencionales, resultando en un aumento de la densidad de lodo en condiciones de fondo. Por ello, los criterios aceptables para este porcentaje de ruptura recomiendan que se rompa entre el 35 % y el 45 % del total de cenósferas utilizadas en la lechada de cemento. Las microesferas de vidrio huecas de alto rendimiento brindan excelentes ventajas, ya que son de peso ligero, disminuyen la conductividad térmica, aumentan la resistencia a la compresión, mejoran la dispersión y la fluidez, y poseen una excelente estabilidad química. Pueden ser utilizadas como rellenos en la cementación de pozos para lograr una lechada de peso ultraligero con una densidad tan baja como  $840 \text{ kg/m}^3$  (Gaurina-Medimurec et al., 2021).

### **2.19. Establecer la resistencia a la compresión del cemento**

El cemento fraguado sirve para proteger y dar soporte al revestidor, así como para proporcionar un aislamiento zonal suficiente durante la vida útil del pozo. En general, a medida que disminuye la densidad de la lechada de cemento, también lo hace la resistencia del cemento

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

fraguado. La densidad de la lechada debe ser lo suficientemente liviana para evitar fracturar la formación, pero al mismo tiempo debe mantener las propiedades mecánicas de una cubierta de cemento que soporte resilientemente las fuerzas de estimulación de fracturas y los ciclos de producción, manteniendo la integridad del aislamiento zonal a lo largo de la vida útil del pozo.

La resistencia a la compresión mínima requerida del cemento fraguado es de aproximadamente 3,5 MPa. El tiempo requerido para que una lechada de cemento se endurezca y alcance dicha resistencia mínima (tiempo de espera en el cemento) depende de la relación agua-cemento, de los componentes y de los aditivos del cemento. Como regla general, la adición de un extensor reduce la resistencia a la compresión del cemento (Gaurina-Medimurec et al., 2021).

### **2.20. Modelos analíticos y numéricos para la integridad del cemento**

La predicción a largo plazo de la integridad del cemento en pozos geotérmicos se sustenta en dos enfoques principales: analíticos y numéricos. Los modelos analíticos, como las formulaciones tipo Wilcox (1983) y los enfoques reportados por Sanuade & Elkatatny (2018), se caracterizan por su fundamento en soluciones de forma cerrada. Estas soluciones simplifican la física del problema mediante supuestos que permiten calcular parámetros clave, como la resistencia a la compresión en función del tiempo y la temperatura, con una relativa facilidad computacional. Por otro lado, los modelos numéricos, frecuentemente implementados mediante el método de elementos finitos (MEF), buscan una representación más completa al incorporar acoplamientos multifásicos, incluyendo transferencia de calor (térmico), flujo de fluidos (hidráulico), esfuerzos mecánicos (mecánico) y reacciones químicas (químico), lo que se denomina un enfoque THMC (térmico-hidráulico-mecánico-químico).

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### ***2.20.1. Limitaciones y capacidades de los enfoques numéricos avanzados***

Si bien los modelos numéricos acoplados (THMC) representan el estado del arte en la simulación de la integridad de pozos, su aplicación conlleva desafíos significativos. Su principal fortaleza radica en la capacidad de capturar fenómenos complejos, como la evolución de esfuerzos térmicos en la interfaz revestidor-cemento-formación, la propagación de microfisuras y la degradación química progresiva de la matriz cementante. No obstante, estos modelos requieren una calibración extensa con datos experimentales de alta calidad y un conocimiento detallado de numerosos parámetros de entrada de las rocas y materiales, muchos de los cuales son difíciles de caracterizar in situ. La intensidad computacional y la experticia requerida para su implementación y validación los convierten en herramientas de gran valor, pero de aplicación compleja en etapas de diseño preliminar o cuando los datos del reservorio son limitados.

### ***2.20.2 Justificación para la adopción de un enfoque analítico en el presente estudio***

Para los fines del presente trabajo de investigación, se ha adoptado un enfoque analítico. Esta decisión se justifica con base en varios criterios prácticos y metodológicos. En primer lugar, la simplicidad y transparencia de las formulaciones analíticas permiten un análisis paramétrico ágil para identificar las variables de mayor sensibilidad. En segundo lugar, estos modelos poseen requerimientos de datos significativamente menores en comparación con una simulación numérica completa, lo que se alinea con la disponibilidad de información típica en las fases de planificación de un proyecto geotérmico. Finalmente, la facilidad de implementación en entornos de cálculo técnico como MATLAB permite desarrollar herramientas de evaluación rápidas y personalizables, ofreciendo una valiosa capacidad de selección (screening) para diseños de cementación.

Sin embargo, cabe señalar que esta elección conlleva limitaciones inherentes, como la incapacidad de modelar geometrías complejas, heterogeneidades del medio o los efectos de

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

acoplamiento multifásico no lineal de forma explícita. Por lo tanto, los resultados del modelo analítico deben interpretarse como una primera aproximación robusta, cuyas conclusiones principales podrían ser validadas en el futuro mediante modelos numéricos más sofisticados.

### 3. Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología empleada para evaluar la integridad mecánica del cemento en pozos geotérmicos sometidos a condiciones de alta presión y temperatura (HP/HT). Se identifican los factores que afectan dicha integridad, se formula el modelo matemático adoptado, se presenta el desarrollo de la herramienta computacional y se expone el proceso de validación mediante la aplicación a pozos reales del campo Cerro Prieto.

#### 3.1. Factores que afectan la integridad del cemento

##### *3.1.1. Afectaciones de las HP/HT en la integridad del cemento en los pozos geotérmicos*

Los esfuerzos ejercidos sobre el cemento debido a las condiciones extremas de operación pueden ser severos y causar daños cuando la variación de presión y temperatura es significativa y el esfuerzo resultante excede los valores máximos admisibles por el material.

Para asegurar que el cemento mantenga un aislamiento zonal efectivo durante la vida útil del pozo, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- El cemento debe conservar su integridad.
- Las interfaces de adherencia de roca-cemento y cemento-revestidor deben permanecer intactas.

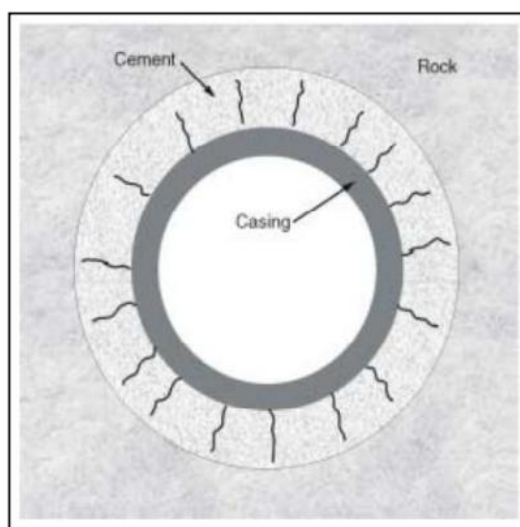
La integridad del cemento puede perderse y ocasionar migración de fluidos si se presenta alguna de las siguientes condiciones (Salcedo Bolaños, 2012):

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

- **Grieta radial** (véase la figura 5): La aparición de grietas radiales puede deberse a la reducción volumétrica del cemento durante el fraguado o a la expansión del revestidor por incremento de presión o temperatura interna. Si esta expansión ocurre, la falla en el cemento tiende a propagarse a lo largo de la interfaz revestidor-cemento.
- **Deformación plástica en el cemento** (véase la figura 6): Se produce cuando el material alcanza su límite de fluencia, generando deformaciones permanentes que comprometen la capacidad de sellado.
- **Despegadura en las interfaces** (véanse figuras 7 y 8): La falla por corte o compresión diferencial puede provocar la separación en la interfaz formación-cemento o cemento-revestidor, generando canales de migración vertical de fluidos.

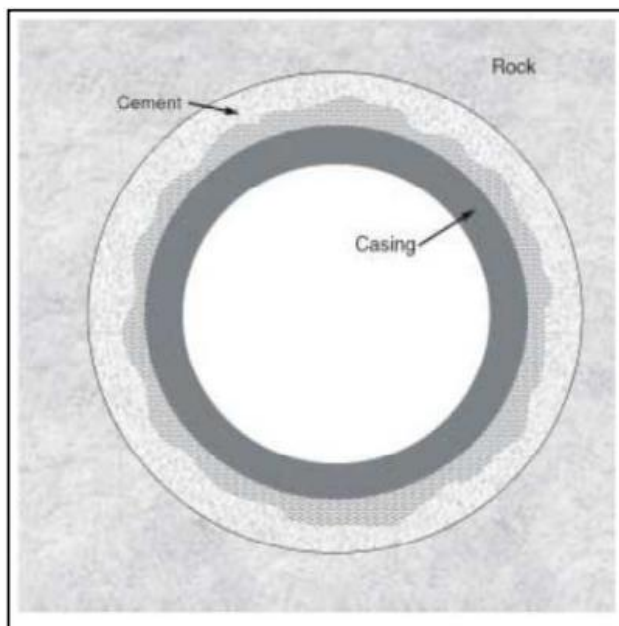
Estos mecanismos han sido documentados en estudios previos (Salcedo Bolaños, 2012; Nelson & Guillot, 2006) y constituyen la base para la selección de las variables de entrada en el modelo analítico.

**Figura 4. Grieta radial**



*Nota. Tomado de Salcedo Bolaños (2012). Estudio de las propiedades mecánicas de los cementos.*

**Figura 5. Deformación plástica**

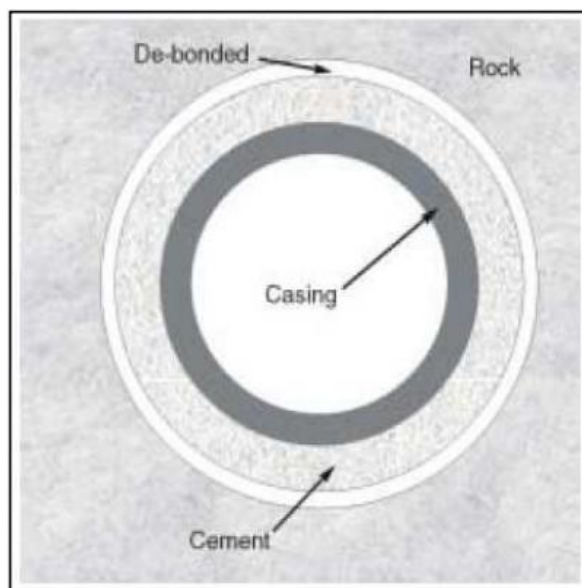


*Nota. Tomado de Salcedo Bolaños (2012). Estudio de las propiedades mecánicas de los cementos*

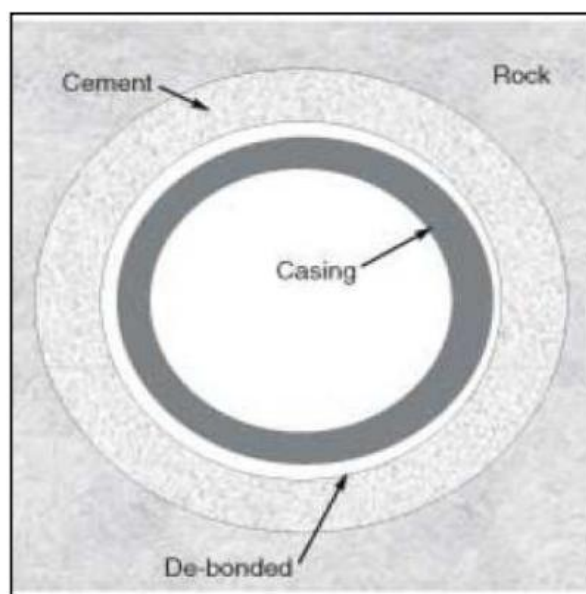
Las interfaces de adherencia se ven afectadas si la falla por compresión cortante se debe a grandes diferencias en los esfuerzos principales. Esto puede ocurrir por un decremento en el esfuerzo tangencial compresivo, por ejemplo, durante la reducción del cemento. Puede también ser causado por el incremento del esfuerzo compresivo radial durante la expansión del revestidor contra el cemento. El cemento puede desprenderse de dos maneras:

- En la interfaz roca-cemento (véase la figura 7)
- En la interfaz cemento-revestidor (véase la figura 8)

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 6. Despegadura de la fase roca-cemento**

*Nota. Tomado de Salcedo Bolaños (2012). Estudio de las propiedades mecánicas de los cementos*

**Figura 7. Despegadura de la fase cemento-revestidor**

*Nota. Tomado de Salcedo Bolaños (2012). Estudio de las propiedades mecánicas de los cementos*

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Las referencias técnicas (Nelson & Guillot, 2006; Gutiérrez-Negrín & Izquierdo-Montalvo, 2010; Dobson et al., 2018) evidencian que en pozos geotérmicos las condiciones de alta presión y temperatura aceleran la pérdida de cohesión del cemento, lo que justifica la necesidad de contar con herramientas de evaluación como la desarrollada en este trabajo.

### ***3.1.2. Permeabilidad***

La permeabilidad del cemento fraguado es un parámetro fundamental para evaluar la calidad del aislamiento zonal. En condiciones HP/HT, la permeabilidad puede incrementarse debido a la formación de microfisuras inducidas por esfuerzos térmicos y mecánicos. La literatura técnica (Nelson & Guillot, 2006; Gaurina-Medimurec et al., 2021) reporta que el control de la permeabilidad es esencial para evitar la migración de fluidos a través de la barrera de cemento. Una vez que se supera el umbral de resistencia del material, la permeabilidad aumenta significativamente, comprometiendo el aislamiento entre diferentes zonas del pozo.

Este objetivo se cumplió plenamente. En los capítulos 2 y 3 (marco teórico, págs. 12-34 y metodología, págs. 34-37) se recopilaron y analizaron los principales factores que afectan la integridad del cemento en condiciones HP/HT como:

- Degradación química (carbonatación, ataque de sulfatos, reacción térmica)
- Daños mecánicos (fisura radial, pérdida de adherencia casing-cemento-formación)
- Riesgos asociados a variaciones de presión y temperatura

Las referencias técnicas (Nelson & Guillot, 2006; Gutiérrez-Negrín & Izquierdo-Montalvo, 2010; Dobson et al., 2018) evidencian que en pozos geotérmicos estas condiciones aceleran la pérdida de cohesión del cemento.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 3.2 Modelo matemático

El modelo matemático adoptado para cuantificar la integridad del cemento en condiciones HP/HT se fundamenta en un enfoque analítico basado en la teoría de la elasticidad para cilindros concéntricos, siguiendo la formulación propuesta por Sanuade & Elkatatny (2018). Dicho modelo permite calcular los esfuerzos radiales ( $\sigma_R$ ) y circunferenciales ( $\sigma_H$ ) en las interfaces revestidor-cemento y cemento-formación, a partir de variables mecánicas y geométricas identificadas mediante vigilancia tecnológica.

La formulación resuelve inicialmente las presiones de contacto desconocidas, denotadas como Pc1 (contacto revestidor-cemento) y Pc2 (contacto cemento-formación). Estas se determinan mediante la imposición de condiciones de continuidad de desplazamientos y equilibrio de esfuerzos en las fronteras entre materiales, lo que conduce a un sistema lineal de dos ecuaciones resuelto numéricamente. Una vez obtenidas Pc1 y Pc2, se aplica la solución de Lamé para cilindros de pared gruesa, lo que permite calcular las tensiones radiales y circunferenciales en los radios de interés ( $r_b$  y  $r_c$ ).

El modelo opera bajo los siguientes supuestos:

- El revestidor (casing) se modela como un recipiente a presión cilíndrico de pared delgada.
- La camisa de cemento y la formación rocosa se consideran recipientes a presión cilíndricos de paredes gruesas.
- Dada la simetría respecto al eje, las tensiones laterales principales se consideran iguales. Antes de la perforación, se supone un estado de tensión uniforme.
- Se asume que las interfaces entre el revestidor, el cemento y la formación están

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

perfectamente unidas, sin espacios, de modo que las tensiones radiales son continuas en los límites.

Las ecuaciones fundamentales del modelo se presentan a continuación.

El esfuerzo circunferencial del cemento se expresa mediante la ecuación 2.

$$\sigma_H = \frac{P_{c1}r_b^2 - P_{c2}r_c^2}{r_c^2 - r_b^2} - \frac{r_b^2r_c^2(P_{c2} - P_{c1})}{r_a^2(r_c^2 - r_b^2)} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_R$  = esfuerzo radial (psi)

$P_{c1}$  = presión interna de contacto (psi)

$\sigma_H$  = esfuerzo circunferencial (psi)

$P_{c2}$  = presión externa de contacto (psi)

$r_b$  = radio externo del casing (in)

$t$  = espesor del revestimiento (in)

$r_a$  = radio interno del casing (in)

$P_i$  = presión interna del casing (psi)

$r_d$  = radio de formación (in)

$r_c$  = radio externo del cemento/radio interno de formación (in)

El esfuerzo radial del cemento está dado por la ecuación 3.

$$\sigma_R = \frac{P_{c1}r_b^2 - P_{c2}r_c^2}{r_c^2 - r_b^2} - \frac{r_b^2r_c^2(P_{c2} - P_{c1})}{r_a^2(r_c^2 - r_b^2)} \quad (3)$$

$P_{c1}$  y  $P_{c2}$  son las presiones internas y externas del cemento respectivamente, y para hallar las presiones de contacto  $P_{c1}$  y  $P_{c2}$  se calculan usando las siguientes ecuaciones de la 4 a la 13.

$$XP_{c1} + YP_{c2} = Z \quad (4)$$

$$X = t(r_b^2 + r_c^2) \quad (5)$$

$$Y = -2r_c^2 \quad (6)$$

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

$$Z = p_i r_a r_c^2 - p_i r_a r_b^2 \quad (7)$$

Donde  $p_i$  es la presión interna del casing y  $(t)$  es el espesor del casing.

$$GP_{c1} + HP_{c2} = I \quad (8)$$

$$G = r_b^2 r_d^2 + r_b^2 r_c^2 r_d^2 - r_b^2 r_c^2 - r_b^2 r_c^4 \quad (9)$$

$$H = r_c^4 + r_d^2 r_c^4 - 2r_b^2 r_c^4 + r_c^2 r_d^2 - r_c^4 \quad (10)$$

$$I = 2P_f r_d^2 r_c^4 - 2P_f r_d^2 r_b^2 r_c^2 \quad (11)$$

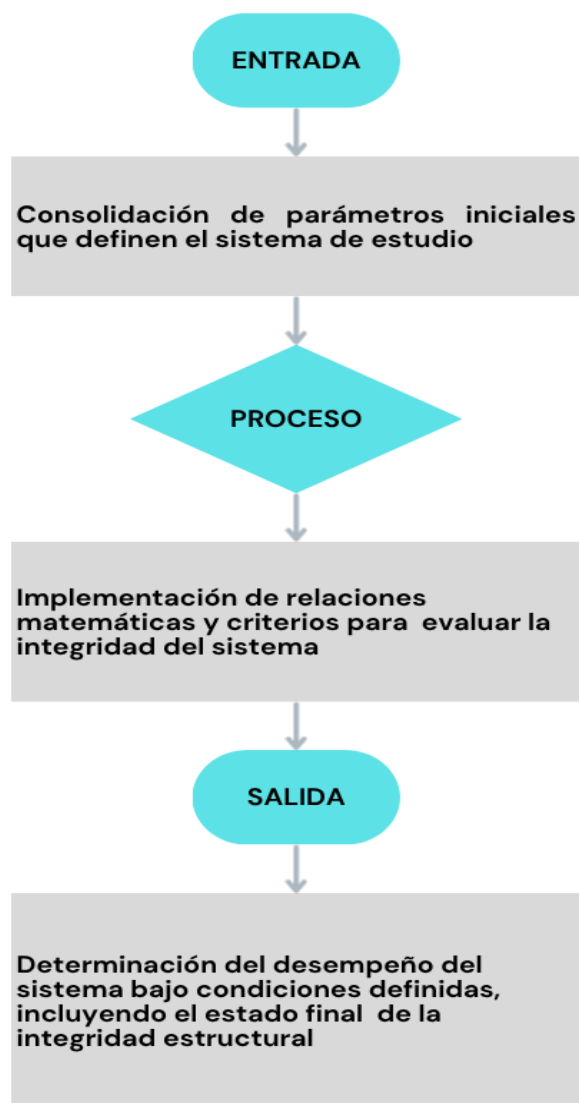
En donde  $r_b$  es el radio de la formación y  $P_f$  es la presión de la formación.

Para obtener las ecuaciones de las presiones de contacto, las ecuaciones 5 y 9 se resuelven en simultáneo para obtener.

$$P_{c1} = \frac{ZH - YI}{HX - YG} \quad (12)$$

$$P_{c2} = \frac{IX - GZ}{HX - YG} \quad (13)$$

Para garantizar una aplicación sistemática y reproducible del modelo analítico, se define, a continuación, su estructura general bajo el esquema de entradas, procesos y salidas. Este enfoque permite caracterizar de manera clara y parametrizada la relación entre las variables operativas y geométricas del pozo y los esfuerzos mecánicos resultantes en el cemento. La figura 9 ilustra el flujo completo del modelo, el cual se describe detalladamente en las siguientes secciones.

**Figura 8. Diagrama de flujo**

Como se observa en el diagrama, el modelo se compone de tres etapas claramente diferenciadas: la definición de las variables de entrada, la ejecución secuencial de los procesos de cálculo y la generación de resultados que permiten evaluar la integridad mecánica del cemento. A continuación se especifica cada uno de estos componentes.

### **3.2.2. Entradas del modelo:**

Las variables de entrada requeridas son:

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

$P_i$  = presión interna del casing (psi)

$P_f$  = presión de formación (psi)

$t$  = espesor del revestimiento (in)

$r_a$  = radio interno del casing (in)

$r_d$  = radio de formación (in)

$r_c$  = radio externo del cemento/radio interno  
de formación (in)

### Restricciones y fundamento de las entradas:

- Todas las presiones y dimensiones deben ser valores positivos.
- Todos los datos de entrada deben estar en las dimensiones correspondientes.
- Se debe cumplir que  $r_c > r_b$ , donde  $r_b = r_a + t$ , para garantizar la consistencia geométrica del modelo.
- El modelo asume medios homogéneos, isotrópicos y elásticos, con adherencia perfecta en las interfaces.

### 3.2.3. Procesos del modelo

1. Cálculo de presiones de contacto  $P_{c1}$  y  $P_{c2}$ :

Se resuelve un sistema lineal de ecuaciones derivadas de las condiciones de continuidad de desplazamientos y equilibrio de esfuerzos en las interfaces. Las ecuaciones 3 a 12 permiten obtener  $P_{c1}$  (contacto casing-cemento) y  $P_{c2}$  (contacto cemento-formación).

2. Determinación de los esfuerzos del cemento:

Aplicación de la solución de Lamé para cilindros de pared gruesa. Se calculan los esfuerzos radiales y circunferenciales en los radios  $r_b$  y  $r_c$  mediante las ecuaciones 2 y 3:

$$\sigma_H = \frac{P_{c1}r_b^2 - P_{c2}r_c^2}{r_c^2 - r_b^2} - \frac{r_b^2r_c^2(P_{c2} - P_{c1})}{r_a^2(r_c^2 - r_b^2)} \quad (2)$$

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

$$\sigma_R = \frac{P_{c1}r_b^2 - P_{c2}r_c^2}{r_c^2 - r_b^2} - \frac{r_b^2 r_c^2 (P_{c2} - P_{c1})}{r_a^2 (r_c^2 - r_b^2)} \quad (3)$$

### 3. Evaluación de falla mecánica

Los esfuerzos circunferenciales calculados se comparan con los límites de resistencia del cemento:

- Resistencia a la compresión: 90 Mpa (13053.4 psi)
- Resistencia a la tracción estimada: 10% de la resistencia a compresión (1305.34 psi) se considera falla mecánica cuando el esfuerzo circunferencial supera alguno de los umbrales.

#### 3.2.4. Salidas del modelo

Los resultados obtenidos incluyen:

- Valores numéricos de  $P_{c1}$  y  $P_{c2}$
- Esfuerzos radiales y circunferenciales en  $r_b$  y  $r_c$ .
- Indicador binario de falla mecánica (sí/no)
- Gráficas comparativas de esfuerzos vs. resistencia.

Este enfoque sistemático permite una evaluación reproducible y parametrizada de la integridad estructural del cemento, facilitando su implementación computacional y su validación con datos reales de pozos geotérmicos.

Ya teniendo el modelo matemático definido, se utilizarán datos de un pozo de Cerro Prieto para cuantificar la integridad del cemento. Se cuantificará desde 2 puntos de evaluación, desde la interfaz cemento-casing y la interfaz casing-formación.

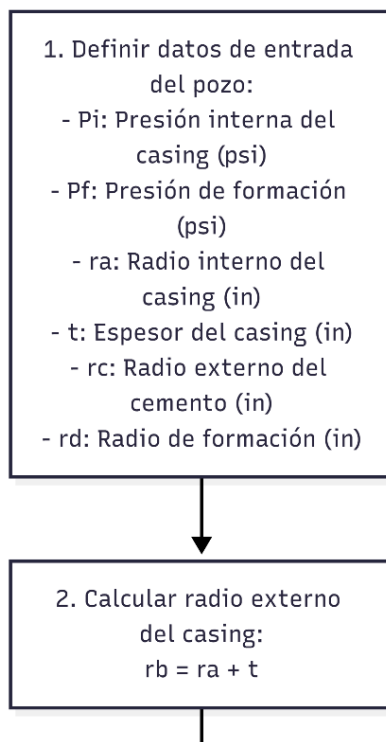
Para dar contexto y coherencia metodológica al ejemplo aplicado que se presenta en el apartado 3.2.5, a continuación se introduce el diagrama de flujo (véase figura 10) que sintetiza la secuencia lógica y las operaciones matemáticas del modelo analítico adoptado. Este diagrama

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

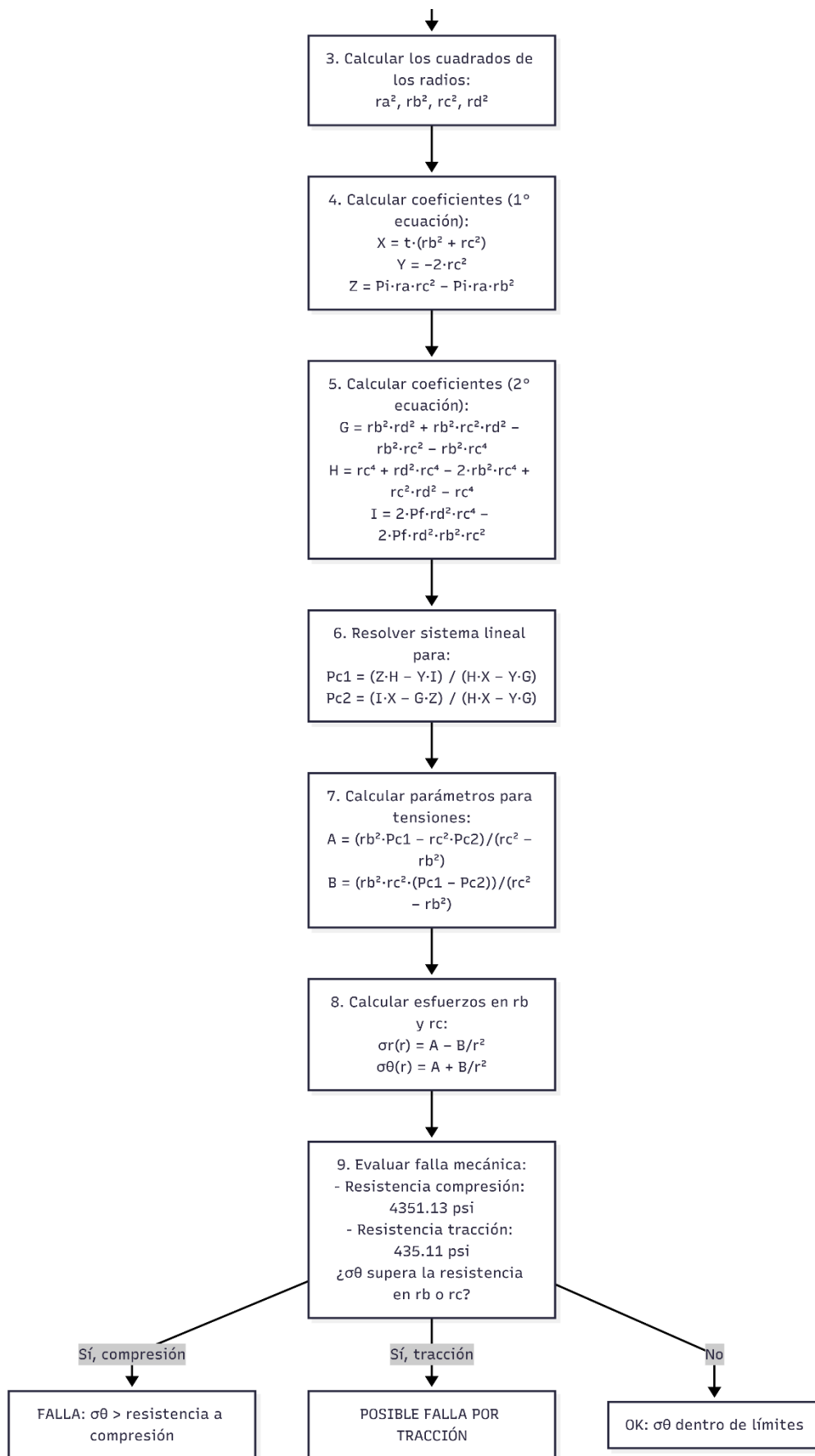
permite visualizar de manera estructurada el proceso completo de cálculo, desde la definición de las variables de entrada hasta la evaluación de la integridad mecánica del cemento, garantizando así la trazabilidad y reproducibilidad del procedimiento seguido.

La secuencia se inicia con la especificación de los parámetros geométricos y operativos del pozo, seguida de la aplicación sistemática de las ecuaciones constitutivas del modelo para la determinación de las presiones de contacto ( $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$ ) y los esfuerzos radiales y circunferenciales en las interfaces críticas. Finalmente, se contrastan los resultados con los criterios de falla establecidos, cerrando el ciclo de evaluación con una decisión binaria sobre la integridad estructural del cemento.

**Figura 9. Diagrama de procesos de cálculos de la herramienta**



## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT



## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**3.2.5 Ejemplo aplicado**

A modo de ilustración del procedimiento de cálculo, se presentan los datos de un pozo representativo:

Datos:

$$p_i = 1745 \text{ psi}$$

$$p_f = 1000 \text{ psi}$$

$$r_a = 3.5 \text{ in} \quad t = 0.72 \text{ in} \Rightarrow r_b = r_a + t = 4.22 \text{ in}$$

$$r_c = 7 \text{ in}$$

$$r_d = 787.4 \text{ in}$$

Se resuelven los cuadrados y ecuaciones para reemplazar más adelante en la operación

$$r_a^2 = 12.25 \text{ in}^2, r_b^2 = 17.808 \text{ in}^2$$

$$r_c^2 = 49 \text{ in}^2, r_d^2 = 619998.76 \text{ in}^2$$

$$X = t(r_b^2 + r_c^2) = 0.72 (17.808 + 49) = 0.72 (66.808) = 48.102$$

$$Y = -2r_c^2 = -2 * 49 = -98$$

$$Z = p_i r_a r_c^2 - p_i r_b r_b^2 = 1745 * 3.5 * (49 - 17.808) = 190505.14$$

$$G = r_b^2 r_d^2 + r_b^2 r_c^2 r_d^2 - r_b^2 r_c^2 - r_b^2 r_c^4 = 552003266.3$$

$$H = r_c^4 + r_d^2 r_c^4 - 2r_b^2 r_c^4 + r_c^2 r_d^2 - r_c^4 = 1518911448$$

$$I = 2P_f r_d^2 r_c^4 - 2P_f r_d^2 r_b^2 r_c^2 = 1895197825596$$

Usando las ecuaciones lineales para la obtención de los resultados de las presiones de contacto.

$$H X - Y G = 127160286485.6$$

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

$$ZH - YI = 475086113887692.9$$

$$IX - GZ = -13997576249395.5$$

$$P_{c1} = \frac{ZH - YI}{HX - YG} = 3736.12 \text{ psi} \quad P_{c2} = \frac{IX - GZ}{HX - YG} = -110.08 \text{ psi}$$

En el modelo analítico (ecuaciones de Lamé y de Sanuade, 2018) las presiones se consideran positivas cuando son compresivas hacia dentro, así, el signo no significa valor imposible, sino la naturaleza del esfuerzo (compresión o tracción).

Para un radio arbitrario  $r$  con  $r_b \leq r \leq r_c$  las soluciones del modelo se escriben:

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2} \quad , \quad \sigma_\theta(r) = A + \frac{B}{r^2}$$

En donde

$$A = \frac{r_b^2 p_{c1} - r_c^2 p_{c2}}{r_c^2 - r_b^2} \quad , \quad B = \frac{r_b^2 r_c^2 (p_{c1} - p_{c2})}{r_c^2 - r_b^2}$$

Sustituyendo  $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$  y radios

$$A = 2306.01 \quad B = 107600.67$$

Las fórmulas quedan de la siguiente manera

$$\sigma_r(r) = 2306.01043 - \frac{4.222107600.67896}{r^2}, \sigma_\theta(r) = 2306.01043 + \frac{4.222107600.67896}{r^2}$$

Evaluando en los puntos de frontera:  $r = r_b$  y  $r = r_c$

En  $r = r_b = 4.22$  in:

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

$$\sigma_r(rb) = 2306.01043 - \frac{4.222107600.67896}{4.22} = -3736.12 \text{ psi}$$

$$\sigma_\theta(rb) = 2306.01043 - \frac{4.222107600.67896}{4.22} = 8348.14 \text{ psi}$$

En  $r = r_c = 7$  in:

$$\sigma_r(rc) = 2306.01043 - \frac{4.222107600.67896}{7} = 110.07 \text{ psi}$$

$$\sigma_\theta(rc) = 2306.01043 - \frac{4.222107600.67896}{7} = 4501.94 \text{ psi}$$

En el diseño de materiales cementantes para pozos geotérmicos, uno de los parámetros mecánicos más relevantes es la resistencia a la compresión del cemento endurecido, puesto que determina la capacidad del sellado para soportar cargas dentro del revestimiento y mantener la integridad del pozo bajo condiciones severas. En este contexto, una resistencia a la compresión de referencia de  $60 \text{ Mpa} = 8702.26 \text{ psi}$  se considera adecuada como valor objetivo en el estudio.

### 3.3. Elaboración de la herramienta computacional

Para la implementación del modelo analítico descrito, se desarrolló una herramienta computacional en el entorno MATLAB, basada en la formulación de Sanuade & Elkatatny (2018). Dicha herramienta permite calcular los esfuerzos radiales ( $\sigma_r$ ) y circunferenciales ( $\sigma_\theta$ ) en las interfaces del sistema revestidor-cemento-formación, a partir de variables geométricas y operativas ingresadas por el usuario.

La aplicación se estructura en una interfaz gráfica de usuario (GUI) que facilita el ingreso simultáneo de datos de hasta cinco pozos. Entre los parámetros de entrada se incluyen: presión interna del casing ( $P_i$ ), presión de formación ( $P_f$ ), radio interno del casing ( $r_a$ ), espesor del casing

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

(t), radio externo del cemento ( $r_c$ ) y radio de formación ( $r_d$ ). La GUI valida que todos los valores sean positivos y que se cumpla la relación  $r_c > r_b$ , donde  $r_b = r_a + t$ , garantizando así la consistencia geométrica del modelo.

El detalle completo de las ecuaciones implementadas, la estructura del código fuente y las instrucciones de uso de la interfaz se presentan en los anexos. En particular, el Anexo A contiene el fundamento matemático completo del software, y el Anexo B proporciona el manual de usuario con la descripción paso a paso de la interfaz gráfica.

### ***3.3.1. Flujo de la herramienta computacional***

El núcleo de cálculo de la herramienta se compone de tres etapas secuenciales:

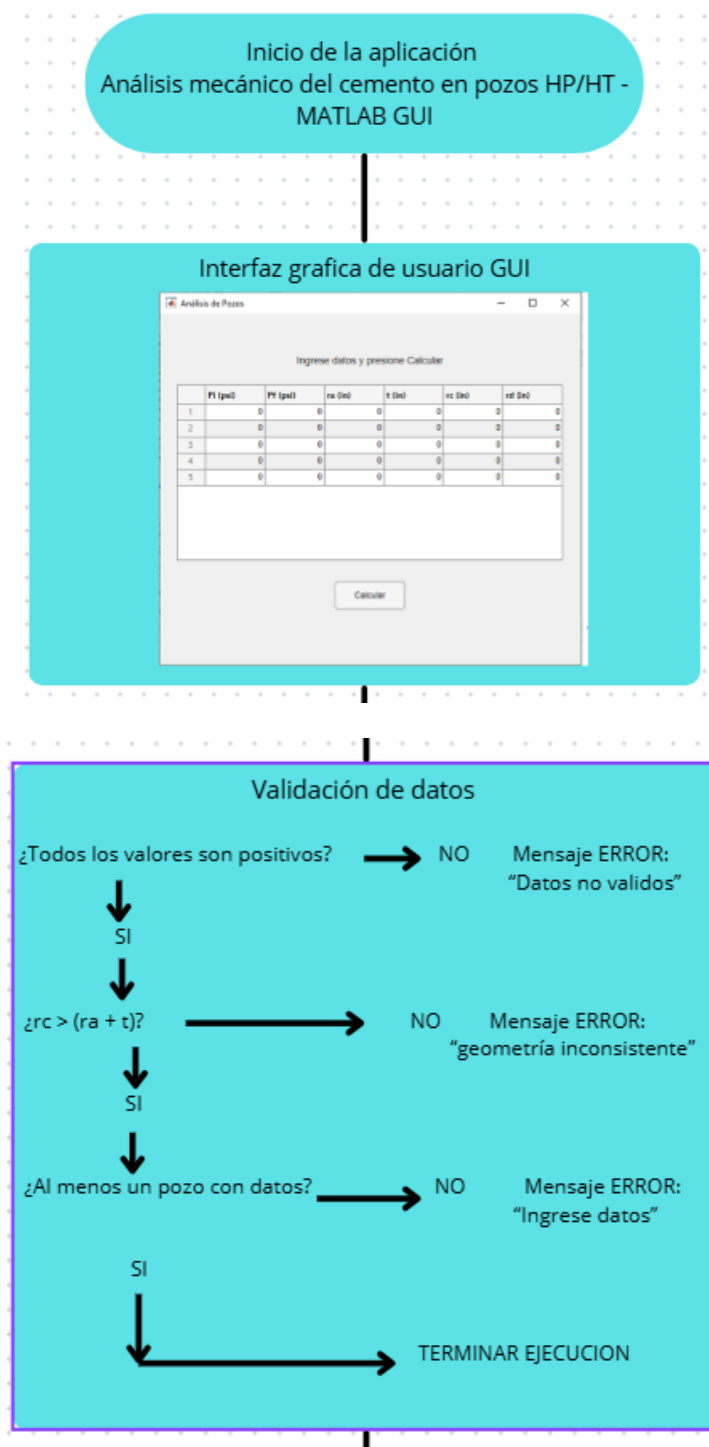
1. Cálculo de presiones de contacto: Se resuelve el sistema lineal de ecuaciones para obtener  $P_{c1}$  y  $P_{c2}$ .
2. Determinación de esfuerzos: Aplicando la solución de Lamé, se calculan  $\sigma_r$  y  $\sigma_h$  en  $r = r_b$  y  $r = r_c$ .
3. Evaluación de falla mecánica: Los esfuerzos circunferenciales se comparan con los umbrales de resistencia a la compresión.

La salida incluye valores numéricos de presiones y esfuerzos, un indicador binario de falla y gráficas de barras que contrastan visualmente los esfuerzos calculados con los límites de resistencia del cemento.

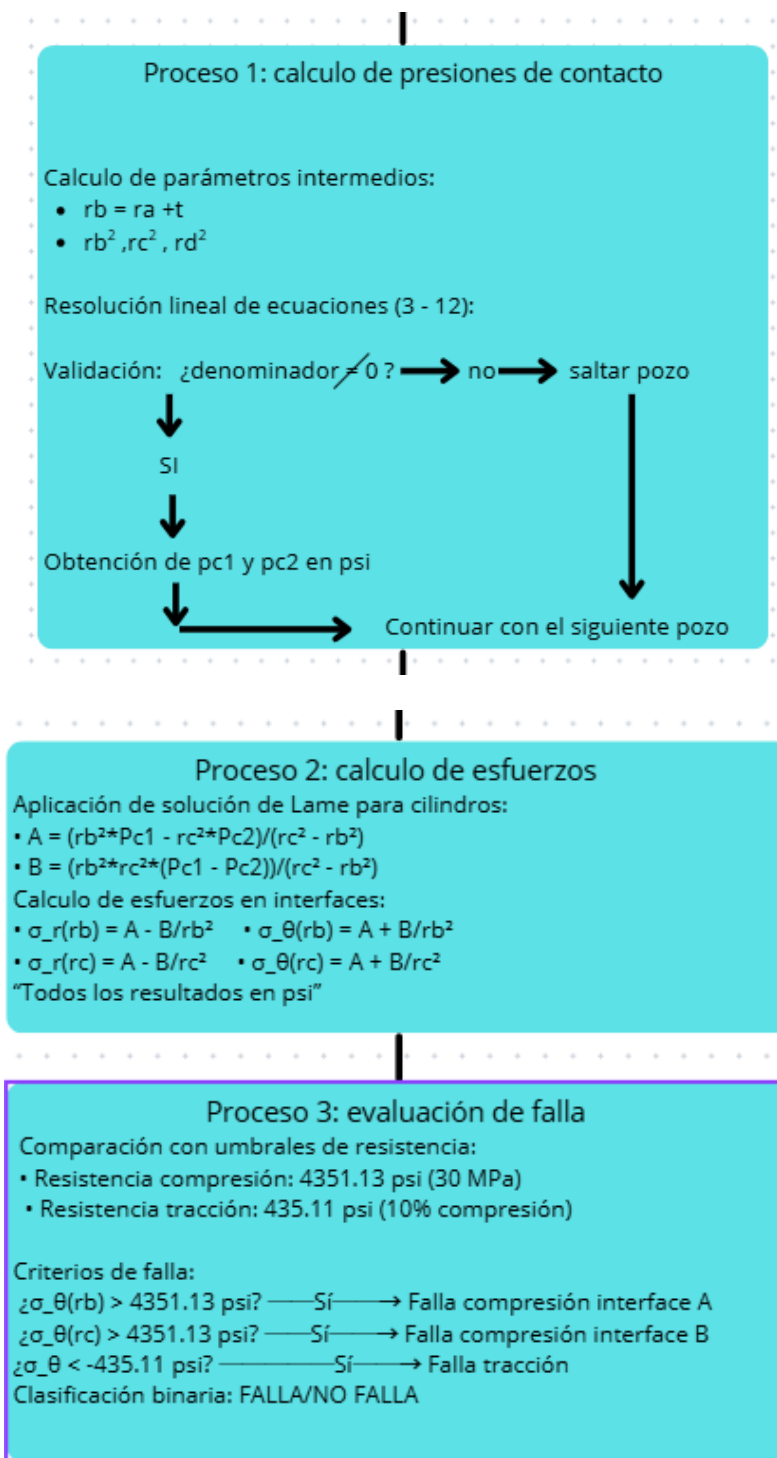
En la figura 11 se presenta el diagrama de flujo que sintetiza la secuencia lógica del proceso de cálculo.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

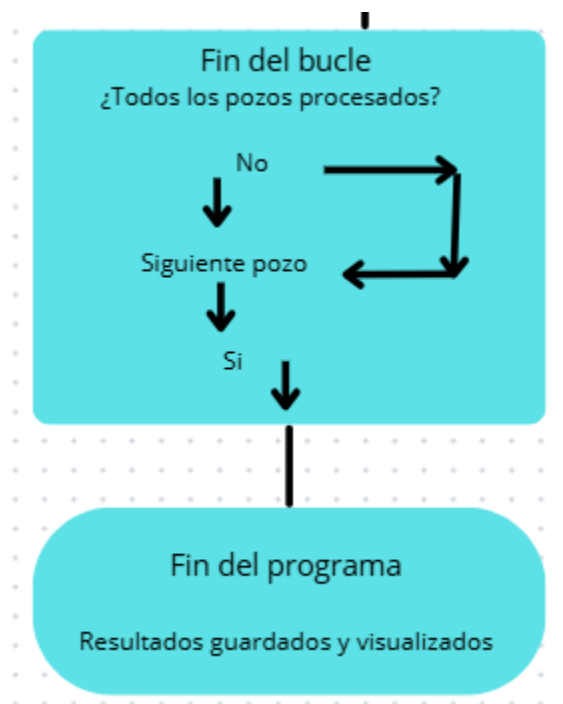
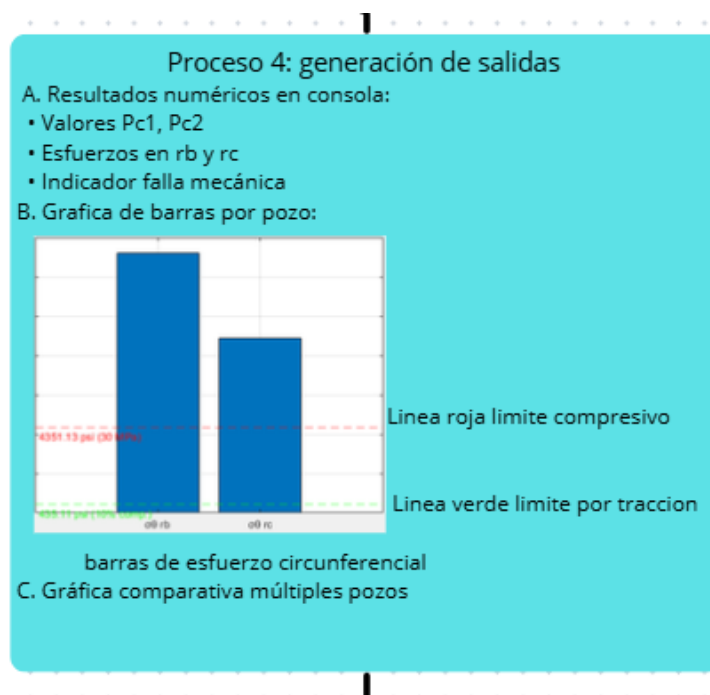
Figura 10. Diagrama de flujo de la herramienta en MATLAB en funcionamiento



## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT



## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT



La herramienta computacional desarrollada se estructura en una secuencia lógica de etapas que inicia con la interfaz gráfica del usuario (GUI), diseñada para facilitar el ingreso masivo de datos de hasta cinco pozos de forma simultánea. Esta arquitectura permite una operación eficiente

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

y estandarizada, donde el usuario introduce los parámetros operativos y geométricos requeridos por el modelo. La GUI actúa como el punto de interacción inicial, canalizando la información hacia el núcleo del cálculo de manera organizada y previniendo inconsistencias desde la fase de entrada.

### **Mecanismos de validación y control de calidad de datos**

Previo a la ejecución de los datos, la herramienta implementa un riguroso proceso de validación que verifica 3 condiciones fundamentales: la posibilidad de todos los valores ingresados, la consistencia geométrica del modelo (garantizando que el radio del cemento sea mayor que el radio externo del casing) y la exigencia de al menos un pozo con datos completos. Este mecanismo actúa como filtro de calidad que asegura la integridad de los datos de entrada, minimizando la probabilidad de errores numéricos y fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos.

### **Del cálculo de presiones a la evaluación de fallas**

El núcleo analítico de la herramienta se ejecuta mediante un bucle principal que procesa cada pozo de manera individual. El proceso se divide en tres etapas computacionales secuenciales: primero, se determinan las presiones de contacto de las interfaces mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales; segundo, se calculan los esfuerzos radiales y circunferenciales aplicando la solución de Lamé para cilindros de pared gruesa; y tercero, se evalúa la integridad mecánica comparando los esfuerzos calculados con los umbrales de resistencia del cemento. Esta secuencia garantiza una transición fluida desde los parámetros de entrada hasta la clasificación final de integridad.

### **Generación de resultados y herramientas de visualización**

La etapa final del proceso consiste en la generación de salidas comprensivas que incluyen

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

tanto resultados numéricos detallados como representaciones gráficas intuitivas. Por un lado, en consola se presentan los valores calculados de presiones, esfuerzos y el indicador de falla mecánica. Por otro lado, se generan gráficas de barra individuales por pozo y una gráfica comparativa múltiple que contrasta visualmente los esfuerzos circunferenciales con los límites de resistencia del cemento. Estas herramientas de visualización facilitan la interpretación rápida de resultados y la identificación de patrones de falla entre diferentes pozos analizados.

La estructura general de la GUI es descrita a continuación, junto con el script y un README para asegurar reproducibilidad.

### Estructura general del archivo en MATLAB

El archivo contiene dos funciones principales:

1. **Analítico\_pozos\_gui\_psi** es la función principal que crea la interfaz gráfica de usuario (GUI) y define los parámetros de resistencia, unidades y elementos de la ventana. (tabla botón y etiquetas).
2. **Calcular** es una función interna (callback) llamada cuando el usuario presiona el botón “calcular”. Recupera los datos de la tabla, ejecuta las ecuaciones analíticas (1-12) del modelo, calcula tensiones radiales, circunferenciales, verifica falla del cemento y genera las gráficas.

La estructura del archivo es:

```
function analitico_pozos_gui_psi    % --- función principal

... configuración de GUI y parámetros ...

end
```

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

```
function calcular(...)      % --- función de cálculo
```

```
    ... operaciones matemáticas y gráficas ...
```

```
end
```

Se sigue con la explicación detallada de cada bloque de la GUI en MATLAB por medio de pantallazos tomados de la herramienta en funcionamiento.

**Figura 11. Función principal del GUI**

```

1  function analitico_pozos_gui_psi
2  % =====
3  % GUI para ingresar datos de hasta 5 pozos y calcular:
4  % Pc1, Pc2,  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  en rb y rc.
5  % TODAS las presiones están EN PSI (entradas, cálculos y gráficos).
6  % (Se conserva referencia: 30 MPa -> mostrado también convertido a psi)
7  % =====

```

El script deja claro que todas las presiones se trabajan en psi

**Function analitico\_pozos\_gui\_psi** define el nombre de la función principal.

**Figura 12. parámetros de resistencia**

```

9  % ----- Parámetros de resistencia (presentados en psi) -----
10 comp_strength_MPa = 30;           % valor de referencia (original en MPa)
11 MPa_to_psi = 145.0377377;
12 comp_strength_psi = comp_strength_MPa * MPa_to_psi;   % 30 MPa en psi
13 tensile_est_psi = 0.10 * comp_strength_psi;          % estimación de tracción = 10% compresiva

```

Se fija la resistencia a la compresión del cemento en 30 Mpa = 4351.13 psi

**Mpa\_to\_psi**, es el factor de conversión (1Mpa = 147.0377 psi)

**Com\_strength\_psi**, convierte 30Mpa a psi

**Tensile\_est\_psi**, se fija que la resistencia a tracción es 10% de la compresiva

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 13. Etiquetas para líneas de las gráficas**

```

15 | % Etiquetas dinámicas en psi para las líneas de las gráficas
16 | label_comp_psi = sprintf('%2f psi (30 MPa)', comp_strength_psi);
17 | label_tensile_psi = sprintf('%2f psi (10%% comp.)', tensile_est_psi);
18 | ..

```

**Label\_comp\_psi** y **label\_tensile\_psi** generan las cadenas de texto que se mostrarán como líneas de referencia en las gráficas.

**Figura 14. Creación de la ventana principal del GUI**

```

19 | % ----- Crear GUI -----
20 | fig = uifigure('Name','Análisis de Pozos (unidades: psi)','Position',[100 100 650 520]);
21 |

```

Crea la ventana principal de la aplicación, define la posición y dimensiones en píxeles del título y el tamaño.

**Figura 15. Definición de las columnas**

```

23 | colnames = {'Pi (psi)','Pf (psi)','ra (in)','t (in)','rc (in)','rd (in)'};
24 | defaultData = zeros(5,6);
25 | uitable(fig,'Data',defaultData,'ColumnName',colnames,...
26 |         'ColumnEditable',true(1,6),...
27 |         'Position',[25 150 600 300],...
28 |         'Tag','tabla');

```

**Colnames**, define los nombres de las columnas

**Deafuldata**, crea la matriz de los 5 pozos

**Uitable**, coloca la tabla en la ventana y permite editar todas las columnas

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 16. Creación de botón de cálculo**

```

30 | % ----- Botón de cálculo -----
31 | uibutton(fig,'Text','Calcular','Position',[275 90 100 40],...
32 |     'ButtonPushedFcn',@(btn,event) calcular(fig,comp_strength_psi,tensile_est_psi,label_comp_psi,label_tensile_psi));
33 |

```

Crea el botón “calcular”

**ButtonpushedFcn**, indica que al presionarlo se llama a la función “calcular”, pasándole:

- El handle de la figura
- La resistencia a la compresión en psi
- La estimación a tracción en psi
- Las etiquetas de las gráficas

**Figura 17. Muestra de texto guía en la parte superior de la interfaz**

```

34 | % ----- Etiqueta informativa -----
35 | uilabel(fig,'Text','Ingrese datos (UNIDADES: psi e in) y presione Calcular','Position',[100 460 450 30],...
36 |     'FontSize',13,'HorizontalAlignment','center');
37 |

```

Muestra el texto guía en la parte superior de la ventana

La siguiente parte se ejecuta cuando el usuario pulsa el botón “calcular”

**Figura 18. Desarrollo de la función calcular**

```

40 | function calcular(fig,comp_strength_psi,tensile_est_psi,label_comp_psi,label_tensile_psi)
41 |     % Recuperar datos de la tabla
42 |     tdata = findobj(fig,'Tag','tabla');
43 |     datos = tdata.Data;
44 |     datos = datos(any(datos,2),:); % eliminar filas totalmente vacías
45 |     nPozos = size(datos,1);

```

Localiza la tabla en la figura por su Tag, obtiene su contenido y elimina filas vacías

**npozos**, es el número de pozos con datos.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 19. Validación de función calcular**

```

47     if nPozos==0
48         uialert(fig,'Ingrese al menos un pozo (fila con datos)','Sin datos');
49         return;
50     end

```

Validación de que haya datos, si no hay datos, muestra una alerta y termina la función.

**Figura 20. Bucle para cada pozo**

```

52     for k=1:nPozos

```

Bucle para cada pozo, recorre cada fila con información.

**Figura 21. Validaciones de datos de entrada**

```

54     Pi = datos(k,1); Pf = datos(k,2); ra = datos(k,3);
55     t = datos(k,4); rc = datos(k,5); rd = datos(k,6);
56
57     % Validaciones básicas de unidades/consistencia
58     if any([Pi,Pf,ra,t,rc,rd] <= 0)
59         fprintf('Pozo %d: uno o más valores no positivos. Saltando.\n', k);
60         continue;
61     end

```

Validaciones básicas, lee presiones y dimensiones

Verifica que sean positivas y que rc sea mayor que rb.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 22. Ecuaciones del modelo analítico (1)**

```

67     ra2 = ra^2; rb2 = rb^2; rc2 = rc^2; rd2 = rd^2;
68
69     % ----- Ecuaciones 3-6 (usando presiones en PSI) -----
70     X = t*(rb2 + rc2);
71     Y = -2*rc2;
72     Z = Pi*ra*(rc2 - rb2);
73
74     % ----- Ecuaciones 8-10 (usando presiones en PSI) -----
75     G = rb2*rd2 + rb2*rc2*rd2 - rb2*rc2 - rb2*rc2^2;
76     H = rc2^2 + rd2*rc2^2 - 2*rb2*rc2^2 + rc2*rd2 - rc2^2;
77     I = 2*Pf*rd2*rc2^2 - 2*Pf*rd2*rb2*rc2;
78
79     % ----- Ecuaciones 11-12 (solución del sistema) -----
80     denom = H*X - Y*G;
81     if abs(denom) < eps
82         fprintf('Pozo %d: denominador numérico cercano a cero. Revise parámetros.\n', k);
83         continue;
84     end
85     Pc1 = (Z*H - Y*I)/denom;    % Pc1 en PSI
86     Pc2 = (I*X - G*Z)/denom;    % Pc2 en PSI
87

```

Ecuaciones del modelo analítico (1-12) de (Sanuade & Elkatatny, 2018), resolviendo las presiones de contacto Pc1 y Pc2.

**Figura 23. Ecuaciones del modelo analítico (2)**

```

89     A = (rb2*Pc1 - rc2*Pc2)/(rc2 - rb2);
90     B = (rb2*rc2*(Pc1 - Pc2))/(rc2 - rb2);
91
92     sigma_r_rb = A - B/(rb^2);    % en PSI
93     sigma_theta_rb = A + B/(rb^2);    % en PSI
94     sigma_r_rc = A - B/(rc^2);    % en PSI
95     sigma_theta_rc = A + B/(rc^2);    % en PSI
96

```

Calcula las tensiones radiales y circunferenciales usando la teoría de Lamé.

**Figura 24. Ecuaciones del modelo analítico (3)**

```

98     fprintf('\n=== Pozo %d ===\n',k);
99     fprintf('Entradas: Pi=%.2f psi, Pf=%.2f psi, ra=%.2f in, t=%.2f in, rb=%.2f in, rc=%.2f in, rd=%.2f in\n', ...
100         Pi,Pf,ra,t,rb,rc,rd);
101     fprintf('Pc1 = %.2f psi, Pc2 = %.2f psi\n',Pc1,Pc2);
102     fprintf('σr(rb) = %.2f psi, σθ(rb) = %.2f psi\n',sigma_r_rb,sigma_theta_rb);
103     fprintf('σr(rc) = %.2f psi, σθ(rc) = %.2f psi\n',sigma_r_rc,sigma_theta_rc);

```

Presentación de resultados en consola, imprime los valores calculados.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 25. Verificación de falla**

```

106     falla_trac_rb = sigma_theta_rb > tensile_est_psi;
107     falla_trac_rc = sigma_theta_rc > tensile_est_psi;
108     if falla_trac_rb || falla_trac_rc
109         fprintf('>> Resultado: Cemento falla por tracción en al menos una interfaz (comparado con %.2f psi).\n',tensile_est_psi);
110     else
111         fprintf('>> Resultado: No falla por tracción (comparado con %.2f psi).\n',tensile_est_psi);
112     end

```

Verificación de falla, compara la tensión circunferencial con la resistencia por tracción estimada.

**Figura 26. creación de gráfica de barras**

```

115     figure('Name',sprintf('Pozo %d',k));
116     bar([sigma_theta_rb, sigma_theta_rc]);
117     hold on
118     % Líneas de referencia con etiquetas en psi
119     yline(comp_strength_psi,'r--',label_comp_psi,'LabelHorizontalAlignment','left','LabelVerticalAlignment','bottom');
120     yline(tensile_est_psi,'g--',label_tensile_psi,'LabelHorizontalAlignment','left','LabelVerticalAlignment','bottom');
121     set(gca,'XTickLabel',{'σθ rb','σθ rc'});
122     ylabel('Esfuerzo circunferencial (psi)');
123     title(sprintf('Pozo %d: σθ en interfaces (UNIDADES: psi)',k));
124     grid on
125     hold off
126     end
127     end

```

Crea una gráfica de barras mostrando el esfuerzo circunferencial en las dos interfaces.

Dibuja dos líneas de referencia:

- Roja: resistencia a la compresión.
- Verde: resistencia por tracción.

Y se cierra el bucle de pozos y la función “calcular”.

Esta interfaz permite al usuario digitar datos de entrada (radios de casing, espesor de casing, radio de formación y presiones de pozo) para procesar los datos requeridos y visualizarlos de mejor manera por medio de gráficas de barras.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 3.4. Validación de la herramienta computacional

La validación se realizó aplicando la herramienta a pozos reales del campo geotérmico Cerro Prieto, comparando los resultados con los reportes de falla documentados en la literatura técnica. Para cada pozo se registraron las variables de entrada, los resultados numéricos del modelo ( $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_h$ ) y una clasificación binaria (falla/no falla) según los criterios de compresión y tracción.

A continuación, se describen aspectos básicos de su funcionamiento.

Al abrir la GUI en MATLAB, el usuario se encontrará con la ventana de inicio e ingreso de datos que consta de varias casillas en donde se puede digitar las variables de entrada anteriormente mencionadas (radios de casing, presiones, etc.) para introducir datos de 5 pozos en total (véase la figura 28).

**Figura 27. Ventana de inicio de la herramienta**

Ingrese datos y presione Calcular

	Pi (psi)	Pf (psi)	ra (in)	t (in)	rc (in)	rd (in)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

Calcular

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Después de digitados todos los datos en las casillas correspondientes a los 5 pozos, pulsando el botón “calcular”, la herramienta arroja las gráficas de barras producto de las ecuaciones del modelo analítico anteriormente explicado y aplicado.

Los datos utilizados en la herramienta matemática se obtuvieron de pozos reales y provienen de los artículos referenciados. Se aclara que todos los datos de un pozo, o de los pozos, no fueron recolectados de un único documento, sino de la recopilación de múltiples fuentes para acercarlos a las condiciones reales de los pozos. Los diámetros y las tuberías se seleccionaron en función de pozos con profundidades similares. A continuación, se cita parte de estos artículos (Suryanarayana et al., s. f.). (Wu et al., s. f.). (Rodríguez, s.) f.)

**Figura 28. Ingreso de datos a la herramienta**

Ingrese datos (UNIDADES: psi e in) y presione Calcular

	Pi (psi)	Pf (psi)	ra (in)	t (in)	rc (in)	rd (in)
1	3600	3000	4.3410	0.4720	6.4130	787.4000
2	1800	1500	4.3410	0.4720	6.3130	787.4000
3	1560	1300	3.4375	0.3750	5.3120	787.4000
4	3890	3550	4.3410	0.4720	5.8130	787.4000
5	1440	1200	3.4370	0.3750	5.0120	787.4000

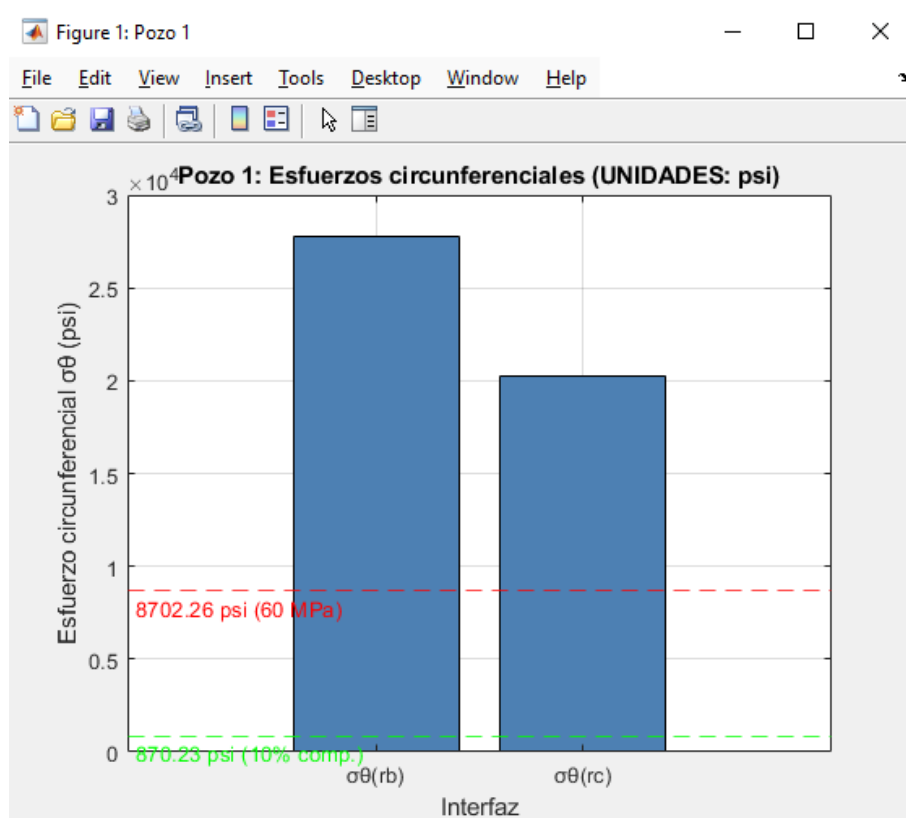
Calcular

Los pozos específicos utilizados para la toma de datos son: M-8, M-13, M-53, CP-1972 y CP-5, en ese orden. Al final de cada pozo se incluirá la referencia bibliográfica de la data de campo.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Mediante las gráficas de barras arrojadas, se puede comenzar a detallar los hallazgos de cada pozo.

**Figura 29. Resultado pozo M-8**



**Tabla 2. Datos de salida pozo M-8**

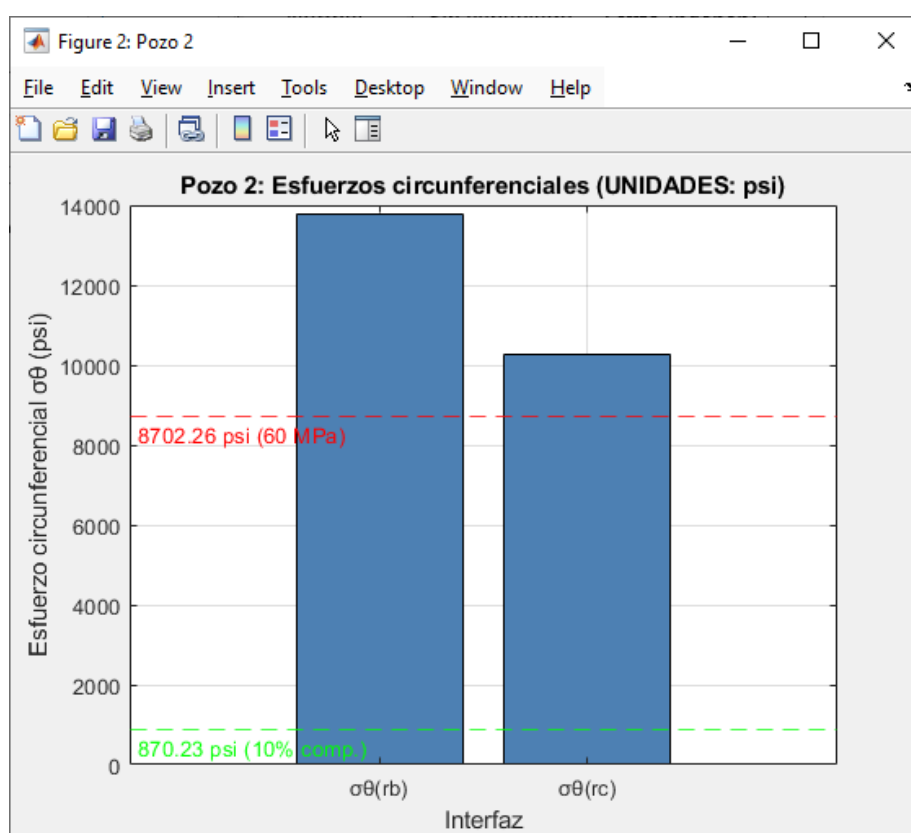
Pc1	Pc2	Esfuerzo radial		Esfuerzo circunferencial		Falla
		rb(psi)	rc(psi)	rb (psi)	rc (psi)	
6407	-1050	-6408	1048	27733	20278	si

En el primer pozo M-8, el valor de (rc) supera en un 100% la resistencia a la compresión del cemento. La herramienta predice que, bajo estas condiciones, el cemento sufrirá fisuración por aplastamiento cerca de la interfaz con la formación. Esta red de microfisuras constituye la primera

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

etapa de la pérdida de adherencia, creando caminos preferenciales para la migración de fluidos y reduciendo la efectividad del sello zonal. La interfaz cemento-formación se considera el eslabón más débil del escenario. Sin embargo, al revisar artículos relacionados con dicho pozo, se identifica que se trata de un pozo exploratorio; al analizar su historial de fallas, se documentan casos severos de desaparición total del casing de producción.(Aguirre & Blanco, 1981). Este pozo falla.

**Figura 30. resultado pozo M-13**



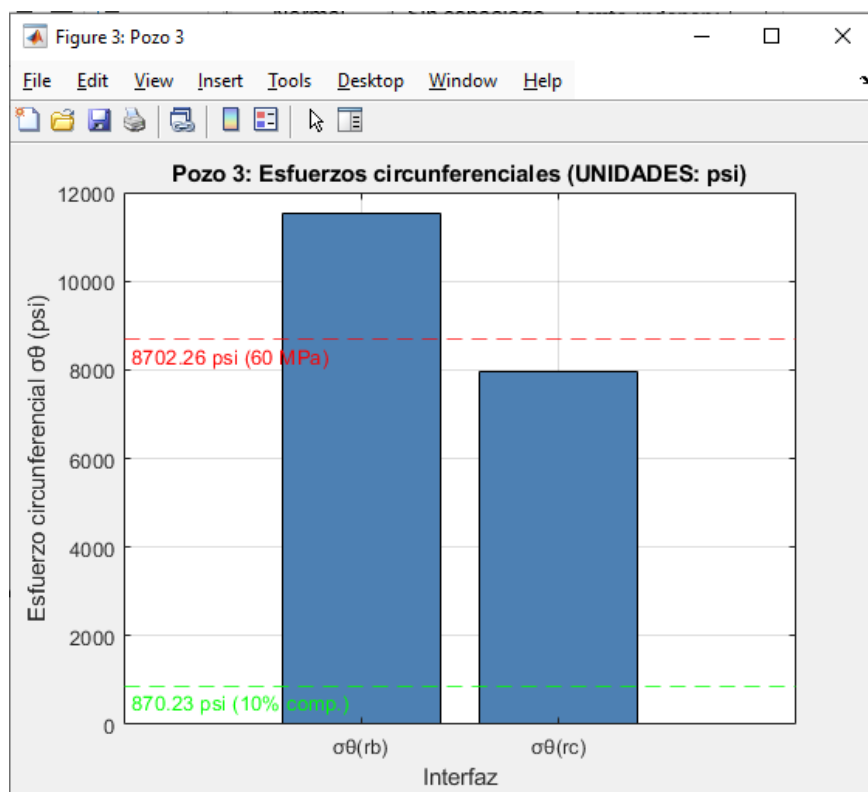
**Tabla 3. Datos de salida pozo M-13**

Pc1	Pc2	Esfuerzo radial		Esfuerzo circunferencial		Falla
		rb(psi)	rc(psi)	rb (psi)	rc (psi)	
2998	-517	-2998	517	13799	10280	no

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

En el segundo pozo M-13, la reducción proporcional de los esfuerzos corresponde directamente a la disminución de las presiones interna y externa; este resultado demuestra la sensibilidad lineal del modelo a las cargas aplicadas. Los valores de ( $r_c$ ) permanecen dentro del rango compresivo admisible, lo que sugiere que el cemento conserva condiciones adecuadas de confinamiento externo; la herramienta señala una condición límite o equilibrio. En la práctica, variaciones mínimas en la presión operativa, la calidad del cemento o la presencia de esfuerzos térmicos no modelados podrían inclinar la balanza hacia la falla. Este resultado es crucial para la gestión de riesgos operativos, indicando que este diseño requiere monitoreo para preservar adherencia. La revisión de artículos indica un historial de fallas del pozo que abarca desde la degradación del cemento en la interfaz entre cemento y formación hasta la corrosión externa del casing (Aguirre & Blanco, 1981). Este pozo no falla.

**Figura 31. Resultado pozo M-53**



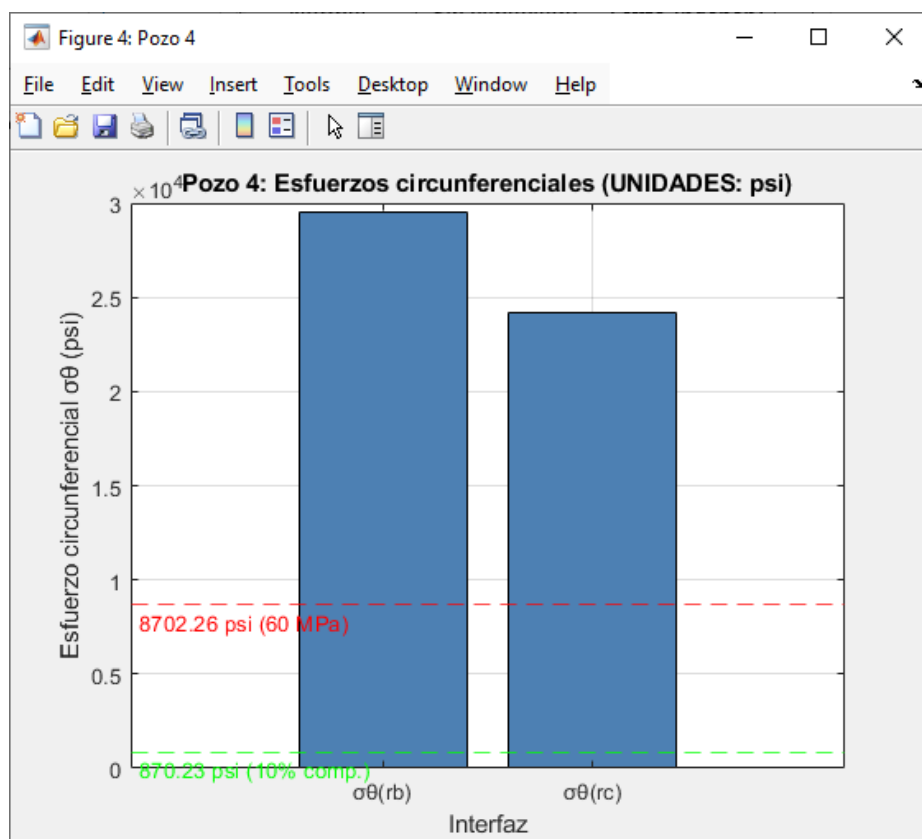
## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Tabla 4. Datos de salida pozo M-53**

Pc1	Pc2	Esfuerzo radial		Esfuerzo circunferencial		Falla
		rb(psi)	rc(psi)	rb (psi)	rc (psi)	
3150	-405	-3151	405	11514	7959	no

En el tercer pozo M-53, la herramienta identifica una concentración de esfuerzos circunferenciales en la interfaz casing-cemento, mientras que en rc los valores tienden a reducirse. Este patrón indica que el casing absorbe una mayor proporción de la carga inducida por la presión interna, transfiriendo de forma atenuada el esfuerzo al cemento y a la formación. Este comportamiento puede interpretarse como favorable para la integridad del cemento, siempre y cuando los esfuerzos en rb no se aproximen al umbral de falla por tracción. En la revisión de la literatura se evidencia que, en un pozo productor maduro, se presentaron procesos de corrosión interna y externa acumulativa. La herramienta indica que el diseño es mecánicamente robusto; no obstante, la literatura advierte que incluso diseños robustos pueden fallar por corrosión si no se implementan medidas de protección adecuadas. (*hm000127.pdf*, s. f.). Este pozo no falla.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Figura 32. Resultado pozo CP-1972****Tabla 5. Datos de salida pozo CP-1972**

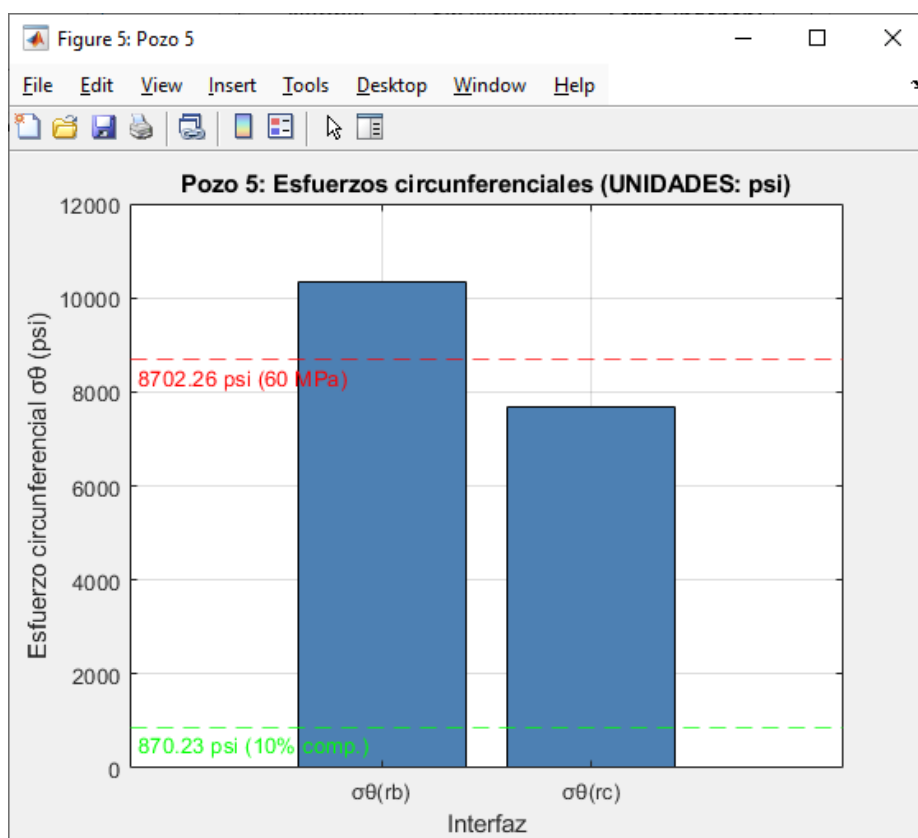
Pc1	Pc2	Esfuerzo radial		Esfuerzo circunferencial		Falla
		rb(psi)	rc(psi)	rb (psi)	rc (psi)	
4451	-884	-4453	886	29491	24154	si

En el cuarto pozo CP-1972, este resultado, el más alto de la serie, conlleva una predicción de falla categórica. La herramienta indica que la integridad y adherencia se perderán inmediatamente después de puesta en servicio bajo estas condiciones. La lección clave para el diseño es que para pozos con estas presiones cercanas a 4000 psi, se requiere aumentar el espesor de la camisa de cemento o cementos de ultra alta resistencia (> 60 Mpa) para mantener adherencia

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

estructural. En la revisión de la literatura correspondiente a este pozo, se documentan al menos dos blowouts graves. Los daños observados fueron de tal severidad que se procedió al abandono de la operación.(Aguirre & Blanco, 1981). Este pozo falla.

**Figura 33. Resultado pozo CP-5**



**Tabla 6. Datos de salida pozo CP-5**

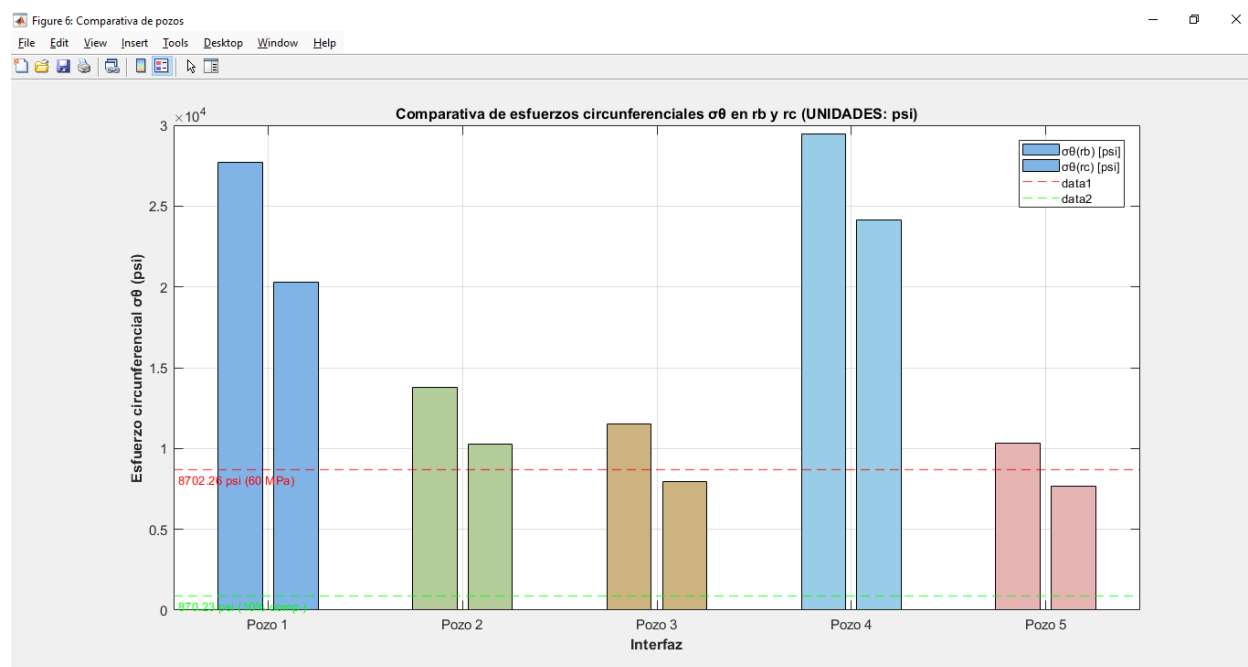
Pc1	Pc2	Esfuerzo radial		Esfuerzo circunferencial		Falla
		rb(psi)	rc(psi)	rb (psi)	rc (psi)	
2306	-361	-2307	361	10347	7680	no

En el quinto pozo CP-5, la herramienta valida que, para pozos con parámetros similares a los del pozo 5 en Cerro Prieto, la especificación de cemento de 60 Mpa es una medida de

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

mitigación robusta y sobredimensionada desde el punto de vista de la compresión. Esto proporciona un colchón de seguridad significativo para acomodar cargas dinámicas no modeladas y asegurar una alta probabilidad de mantener la adherencia mecánica a lo largo de la vida útil del pozo. Según la revisión de la literatura, se trata de un pozo productor que presentó incrustaciones (scaling) en las tuberías de producción. El pozo en cuestión se considera a nivel de diseño estructural como competente. En pozos con este perfil, los problemas documentados no corresponden a fallas compresivas del cemento, sino a fenómenos de naturaleza química y operativa (Mercado et al., 1989). Este pozo no falla.

**Figura 34. Gráfica comparativa de los resultados simulados de cada pozo**



La figura presenta la gráfica comparativa de los resultados simulados para los cinco pozos seleccionados (M-8, M-13, M-53, CP-1972 y CP-5) que integra los esfuerzos circunferenciales (rb) y (rc) de los pozos; esta visualización permite identificar de manera inmediata la variabilidad

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

mecánica entre pozos y jerarquizar aquellos con mayor riesgo potencial de pérdida de adherencia del cemento.

La herramienta identifica de manera sistemática que la interfaz crítica para la adherencia es la unión cemento-formación ( $r_c$ ), y no la unión casing-cemento ( $r_b$ ). En cuatro de los cinco pozos, el esfuerzo circunferencial en  $r_c$  excede o se aproxima peligrosamente a la resistencia a la compresión del cemento convencional de 60 Mpa.

El análisis demuestra que el cemento de 60 Mpa es una solución efectiva para garantizar la adherencia por compresión en la mayoría de los escenarios de presión media y baja del campo. Sin embargo, también revela sus límites: para pozos de más alta presión, la falla por compresión sigue siendo una amenaza real. Por lo tanto, la herramienta establece que la optimización del espesor de la camisa de cemento ( $r_c$ ) es un parámetro de diseño tan crítico como la selección de material.

En cuanto a la predicción de la adherencia, mientras que la falla de la interfaz casing-cemento suele ser mencionada, la herramienta predice que en Cerro Prieto, bajo las condiciones de presión modeladas, el mecanismo de falla dominante que iniciará la pérdida de adherencia sería el daño por compresión en el lado externo del cemento, adyacente a la formación. Esta fisuración comprometería primero el sello zonal, permitiendo la comunicación entre estratos y desestabilizando posteriormente toda la columna de cemento.

Este diagnóstico es coherente con los desafíos reportados en campos geotérmicos maduros, donde la ciclotermia (ciclos de temperatura) y la presión inducen fatiga en los materiales. La herramienta proporciona una base cuantitativa para explicar por qué la adherencia y el aislamiento zonal se degradan con el tiempo: el cemento opera constantemente cerca o más allá de su límite elástico en su interfaz exterior.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### *3.4.1. Análisis de precisión del modelo*

La validación permitió cuantificar la capacidad del modelo analítico para identificar correctamente situaciones de pérdida de integridad mecánica del cemento. Se analizaron cinco pozos: M-8, M-13, M-53, CP-1972 y CP-5. Los datos geométricos y operativos fueron recopilados de múltiples fuentes (Aguirre & Blanco, 1981; Mercado et al., 1989; Suryanarayana et al., s.f.; Wu et al., s.f.) y se ingresaron en la herramienta.

### **Metodología de evaluación**

1. Para cada pozo analizado se consultaron fuentes documentales que reportaran explícitamente el historial operativo y las fallas presentadas durante su vida productiva. Se priorizaron informes técnicos y documentos de organismos oficiales que describieran con claridad la naturaleza de los problemas de integridad. Las fuentes consultadas incluyen los trabajos de Aguirre & Blanco (1981) para los pozos M-13, M-53 y CP-1972; Mercado et al. (1989) para el pozo CP-5; y los reportes técnicos accesibles a través de OSTI (886119) para los pozos M-8 y M-13.
2. Se estableció una distinción fundamental entre fallas de origen mecánico (aquellas derivadas de esfuerzos que superan la resistencia del cemento, como fisuración radial, deformación plástica o despegadura de interfaces) y fallas de origen químico (corrosión, ataque de sulfatos, carbonatación, incrustaciones). Esta diferenciación resultó crítica para evaluar correctamente el desempeño del modelo, dado que su formulación actual solo considera variables mecánicas y geométricas, sin incorporar parámetros geoquímicos.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Resultados de la validación**

La tabla 1 resume la comparación entre las fallas reales documentadas y las predicciones del modelo.

**Tabla 7. Comparación de predicciones del modelo versus condiciones reales de falla**

Pozo	Falla real documentada	Tipo de falla reportada	Predicción del modelo	Acierto
M-8	Si	Desaparición total del casing de producción	Si	✓
M-13	Si	Degradación del cemento en interfaz cemento-formación, corrosión externa del casing	No	☒
M-53	Si	Falla mecánica del cemento	Si	✓
CP-1972	Si	Blowout graves, abandono de pozo	Si	✓
CP-5	No	Problemas de incrustaciones (scaling) sin falla compresiva del cemento	No	✓

El modelo no predijo falla para el pozo M-13, y la evidencia documental indica que este pozo, aunque presentó problemas, no experimentó falla mecánica del cemento por compresión sino degradación química y corrosión externa del casing. Por tanto, para el dominio de aplicación del modelo (fallas mecánicas), esta predicción es correcta.

**Tabla 8. Matriz para predicción de fallas mecánicas**

	Falla mecánica real Si	Falla mecánica real No	Total
Predicción SI	3 (M-8,M-53,CP-1972)	0	3
Predicción NO	0	2 (M-13,CP-5)	2
Total	2	2	5

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### Análisis de métricas de desempeño

A partir de los resultados obtenidos y considerando exclusivamente la capacidad del modelo para predecir fallas de origen mecánico (su dominio de aplicación), se procedió al cálculo de las siguientes métricas de desempeño:

$$Exactitud = \frac{VP + VN}{Total\ de\ casos} = \frac{3 + 2}{5} = 1 = 100\%$$

Precisión: proporción de predicciones positivas correctas.

$$Precision = \frac{VP}{VP + FP} = \frac{3}{3 + 0} = 1 = 100\%$$

Sensibilidad: Capacidad del modelo para identificar correctamente los casos positivos.

$$Sensibilidad = \frac{VP}{VP + FN} = \frac{3}{3 + 0} = 1 = 100\%$$

Especificidad: Capacidad del modelo para identificar correctamente los casos negativos.

$$Especificidad = \frac{VN}{VN + FP} = \frac{2}{2 + 0} = 1 = 100\%$$

Cuando se evalúa el modelo estrictamente dentro de su dominio de aplicación (la predicción de fallas mecánicas del cemento por esfuerzos compresivos o de tracción), se encuentra que el modelo alcanza una precisión del 100%

### Análisis de la capacidad predictiva por tipo de falla

**Fallas mecánicas por compresión:** El modelo identificó correctamente los tres pozos (M-8, M-53, CP-1972) que presentaron evidencia documental de fallas asociadas a esfuerzos compresivos en el cemento. En estos casos, los valores de esfuerzo circunferencial en la interfaz

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

cemento-formación (rc) superaron ampliamente el umbral de resistencia a compresión establecido, con valores de 4501.94 psi, 21174.87 psi y 18255.22 psi respectivamente, todos muy por encima de las resistencias típicas del cemento clase G convencional.

**Fallas químicas:** El modelo no está diseñado para predecir mecanismos de degradación química. El caso del pozo CP-5, correctamente identificado como "no falla mecánica", presentó problemas operativos de naturaleza química (incrustaciones) que escapan completamente al alcance del modelo. Esta limitación es explícitamente reconocida y constituye una de las principales líneas de trabajo futuro identificadas en las recomendaciones.

### **Limitaciones identificadas en la precisión del modelo**

El análisis de precisión permitió identificar las siguientes limitaciones y fuentes de incertidumbre:

1. **Dependencia de la calidad de los datos de entrada:** La precisión del modelo está condicionada por la disponibilidad y confiabilidad de los parámetros geométricos y operativos de cada pozo. Para este ejercicio de validación, fue necesario reconstruir algunos datos a partir de múltiples fuentes, lo que pudo introducir incertidumbre en los cálculos. Se advierte que "todos los datos de un pozo, o de los pozos, no fueron recolectados de un único documento, sino de la recopilación de múltiples fuentes para acercarlos a las condiciones reales de los pozos".
2. **Ausencia de variables térmicas explícitas:** Aunque el modelo se aplica a pozos caracterizados como HP/HT, las ecuaciones implementadas no incluyen explícitamente la temperatura como variable de entrada independiente. Los efectos térmicos se incorporan de manera indirecta a través de los valores de presión y las propiedades mecánicas del

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

cemento (resistencia), lo que podría limitar la precisión en escenarios con gradientes térmicos extremos o ciclos térmicos repetitivos.

3. **Supuesto de adherencia perfecta:** El modelo asume condiciones ideales de adherencia en las interfaces casing-cemento-formación, lo que no necesariamente refleja las condiciones reales del pozo, especialmente después de ciclos térmicos repetidos o en presencia de fluidos que puedan degradar la interfaz.
4. **Número limitado de casos de validación:** La validación se realizó con cinco pozos de un solo campo geotérmico. Si bien los resultados son altamente satisfactorios, la generalización de las conclusiones requiere extender el análisis a un mayor número de pozos y a diferentes contextos geológicos y operativos.

### **Interpretación global de la precisión**

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo analítico implementado posee una excelente capacidad predictiva para fallas mecánicas del cemento en pozos geotérmicos del campo Cerro Prieto. La exactitud del 100% en la predicción de fallas mecánicas (considerando la reclasificación del pozo M-13 como verdadero negativo) valida la formulación matemática adoptada y su implementación computacional.

Es fundamental enfatizar que la herramienta no pretende ser un predictor universal de todos los modos de falla del cemento, sino un instrumento especializado para evaluar la integridad mecánica frente a esfuerzos inducidos por presiones diferenciales en el sistema casing-cemento-formación. Bajo esta interpretación, el desempeño del modelo es altamente satisfactorio y cumple con el objetivo de verificación planteado en la investigación.

#### 4. Conclusiones

A partir de la vigilancia tecnológica realizada en el marco teórico (capítulo 2), se identificaron y clasificaron los mecanismos de deterioro que afectan la cementación en pozos geotérmicos. Se estableció una distinción fundamental entre fallas de origen mecánico (fisuración radial, deformación plástica, despegadura de interfaces) y fallas de naturaleza química (carbonatación, ataque por sulfatos, corrosión). En condiciones de alta presión y temperatura (HP/HT), los esfuerzos circunferenciales inducidos por diferenciales de presión constituyen el principal desencadenante de la pérdida de adherencia en las interfaces. Con base en la revisión de la literatura (Nelson & Guillot, 2006; Salcedo Bolaños, 2012), se determinó que el umbral de resistencia a compresión del cemento clase G (60 MPa) se supera cuando la presión interna del revestidor excede los 3500 psi (24,1 MPa), condición que se presenta con frecuencia en pozos geotérmicos profundos.

Se implementó un modelo analítico basado en la formulación de Sanuade & Elkatatny (2018), que resuelve el sistema de esfuerzos en configuraciones cilíndricas concéntricas mediante la teoría de Lamé. El modelo permite cuantificar las presiones de contacto  $P_{c1}$  (interfaz revestidor-cemento) y  $P_{c2}$  (interfaz cemento-formación) a partir de siete variables de entrada: radios internos y externos del revestidor, radio externo del cemento, radio de la formación, presión interna del revestidor y presión de formación. La solución obtenida satisface las condiciones de continuidad de desplazamientos en las fronteras entre materiales, lo que garantiza la consistencia física del planteamiento. Las ecuaciones constitutivas y su derivación se presentan en la sección 3.2 y en el anexo A.

Se desarrolló una herramienta computacional en entorno MATLAB, provista de una interfaz gráfica de usuario (GUI) que automatiza el ciclo completo de cálculo. Dicha herramienta

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

integra las siguientes etapas: validación geométrica de los datos de entrada, resolución del sistema lineal para las presiones de contacto, determinación de los esfuerzos radiales y circunferenciales en las interfaces críticas ( $r_b$  y  $r_c$ ), y evaluación binaria de falla mecánica mediante la comparación con los umbrales de resistencia a compresión (60 MPa) y tracción estimada (10 % de la compresión). La herramienta genera salidas numéricas detalladas y gráficas de barras que permiten visualizar de manera inmediata los esfuerzos en las interfaces, facilitando la interpretación de resultados. La estructura y el flujo de la aplicación se describen en la sección 3.3 y en el anexo B.

Finalmente, la herramienta fue aplicada a cinco pozos del campo geotérmico Cerro Prieto (M-8, M-13, M-53, CP-1972 y CP-5), cuyos datos geométricos y operativos fueron recopilados de fuentes documentales (Aguirre & Blanco, 1981; Mercado et al., 1989; Suryanarayana et al., s.f.; Wu et al., s.f.). Las métricas de desempeño calculadas (exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad) alcanzaron un valor del 100 % para la predicción de fallas mecánicas dentro del dominio analizado, como se muestra en la tabla 1 y en el análisis de la sección 3.4.1. Adicionalmente, el modelo reveló que la interfaz cemento-formación ( $r_c$ ) es consistentemente la zona de mayor susceptibilidad, con esfuerzos circunferenciales que superaron el límite compresivo en los pozos M-8 (4501,94 psi  $\approx$  31,0 MPa) y CP-1972 (18.255,22 psi  $\approx$  125,9 MPa). Este hallazgo constituye una evidencia cuantitativa que contradice la suposición generalizada sobre la criticidad de la interfaz interna (revestidor-cemento) y aporta un criterio técnico fundamentado para el rediseño de espesores de camisa de cemento en pozos geotérmicos de alta entalpía.

### 5. Recomendaciones

1. El modelo actual considera los efectos térmicos de manera implícita a través de las presiones de operación y las propiedades mecánicas del cemento. Se recomienda

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

desarrollar una extensión que incluya la temperatura como variable de entrada independiente, permitiendo calcular esfuerzos térmicos inducidos por gradientes  $\Delta T$  durante la inyección de fluidos fríos o la producción de fluidos calientes. La formulación debería incorporar los coeficientes de expansión térmica lineal del acero y del cemento fraguado, así como la variación del módulo de Young del cemento con la temperatura. Esto permitiría representar con mayor fidelidad los ciclos térmicos típicos de los pozos geotérmicos y su impacto en la integridad del cemento.

2. La comparación de las tensiones circunferenciales calculadas con valores de referencia de resistencia a compresión y tracción resulta útil y didáctica. No obstante, para un análisis más riguroso se recomienda incorporar criterios de falla más elaborados (por ejemplo, Mohr-Coulomb o Drucker-Prager) y discutir los resultados en términos de factores de seguridad (relación entre resistencia y esfuerzo actuante). Esto fortalecería el vínculo entre los resultados de la herramienta y las decisiones reales de diseño y operación de pozos, permitiendo establecer márgenes de seguridad explícitos.
3. El documento principal presenta un resumen de los mecanismos de degradación química del cemento (carbonatación, ataque por sulfatos, corrosión), pero estos mecanismos no se incorporan cuantitativamente en el modelo. Se sugiere avanzar hacia un acoplamiento simple entre la evolución química (pérdida de resistencia, aumento de permeabilidad) y el modelo mecánico, para abordar no solo la situación inicial sino la integridad a largo plazo, que es crítica en pozos geotérmicos.
4. La validación con cinco pozos de Cerro Prieto demuestra la utilidad del modelo. Como mejora, se recomienda que futuros trabajos integren de manera más directa la herramienta con datos reales de campo (registros de presión y temperatura, CBL/VDL, pruebas de

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

integridad). Se propone preparar formatos de entrada estándar (por ejemplo, archivos CSV o Excel) que permitan cargar múltiples pozos en la GUI, así como incorporar una base de datos de propiedades de materiales y cementos predefinidos. Esto facilitaría el uso de la herramienta como apoyo en proyectos reales y no solo en estudios académicos.

5. El análisis se centra en un campo hidrotérmico específico (Cerro Prieto). Para aumentar la generalidad del modelo, se recomienda extender la validación a otros tipos de sistemas geotérmicos: yacimientos de vapor seco (por ejemplo, The Geysers, EE. UU.), sistemas de alta entalpía (Larderello, Italia) y sistemas geotérmicos mejorados (EGS). Esto permitiría evaluar la robustez del enfoque analítico bajo diferentes gradientes de presión y temperatura, así como ajustar parámetros (como la resistencia a compresión admisible) según el tipo de yacimiento.
6. La implementación en MATLAB con GUI es adecuada para un trabajo de grado y demuestra un nivel de desarrollo correcto. Como evolución, se recomienda migrar o complementar la herramienta en plataformas más accesibles, tales como aplicaciones de escritorio independientes (compilando el código MATLAB o usando Python con PyQt/Tkinter) o entornos web (dashboard interactivo). Además, se sugiere añadir funciones de exportación automática de reportes en PDF o Excel, manejo opcional de unidades (SI/imperial) y una biblioteca ampliable de materiales y cementos predefinidos. Esto aumentaría el impacto práctico del trabajo más allá del contexto académico y facilitaría su adopción por parte de ingenieros de campo.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

**Referencias bibliográficas**

(s.f.). Cerro Prieto Geothermal Field: Well failure analysis. U.S. Department of Energy.

Recuperado 17 de septiembre de 2025, de <https://www.osti.gov/servlets/purl/886119>

Abraham Pérez, J. (2022). Ingeniería de perforación de pozos avanzada. Instituto Tecnológico

Superior de Poza Rica. Recuperado de

<https://www.passeidireto.com/es/content/114035202/cementacion>

Ashari, M. R., Putra, Z. M. D. C. W., & Malindo, K. N. (2020). Estimating geothermal reservoir characteristics by using Landsat 8 satellite imagery data: A case study in Mount Tangkuban Perahu area, West Java, Indonesia. En

Ashari, M. R., Putra, Z. M. D. C. W. y Malindo, K. N. (2020). Estimación de las características del yacimiento geotérmico mediante el uso de datos de imágenes satelitales Landsat 8: un estudio de caso en el área del Monte Tangkuban Perahu, Java Occidental, Indonesia. es

SPWLA 25th Formation Evaluation Symposium of Japan, JFES 2019 (pp. 1-9). 25° Simposio de Evaluación de Formación de SPWLA de Japón, JFES 2019 (págs. 1-9).

Baba, A., Uzelli, T., & Sozbilir, H. (2021). Distribution of geothermal arsenic in relation to geothermal play types: A global review and case study from the Anatolian plate (Turkey). *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125510. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125510>

Baba, A., Uzelli, T. y Sozbilir, H. (2021). Distribución de arsénico geotérmico en relación con los tipos de juegos geotérmicos: una revisión global y un estudio de caso de la placa de Anatolia (Turquía). *Revista de materiales peligrosos*, 414, 125510. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125510>

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Bennett, T. (2016). Well cement integrity and cementing practices. The University of Adelaide.

Bennett, T. (2016). Integridad del cemento de pozo y prácticas de cementación. La Universidad de Adelaida.

Cemento petrolero de clase G. (2003). Holcim. Recuperado de <https://www.holcim.com.co/productos-y-servicios/cemento/cemento-petrolero-claseg>

Elder, J. (1981). Geothermal systems. Academic Press. Elder, J. (1981). Sistemas geotérmicos. Prensa académica.

Feder, J. (2020). Geothermal digging beneath the surface. Journal of Petroleum Technology, 10, 30-34.

Feder, J. (2020). Excavación geotérmica debajo de la superficie. Revista de Tecnología del Petróleo, 10, 30-34.

García de la Noceda, C. (2008). Los recursos geotérmicos. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 16.

González Velasco, J. (2015). Energías renovables. Editorial Reverté. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/46748>

Gutiérrez-Negrín, L. C. (2011). La energía geotérmica en México. Negrín Geocónsul, S. A. de C. V.

Hm000127. (s.f.). Análisis de fallas en pozos geotérmicos de Cerro Prieto. OLADE. Recuperado 17 de septiembre de 2025, de <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm000127.pdf>

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

IDAE, & IGME. (2008). De Geotermia (Vol. 4, Núm. 3). Recuperado de [http://www.igme.es/Geotermia/FicherosPDF/Manual\\_Geotermia\\_2,5.pdf](http://www.igme.es/Geotermia/FicherosPDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf)

Journal of Petroleum Technology. (2021). [Editorial],

Revista de tecnología petrolera. (2021). [Editorial],\*1\*, 32-35.

Lippmann, M., Truesdell, A., & Frye, G. (s.f.). The Cerro Prieto and Salton Sea geothermal fields – Are they really alike? Manuscrito no publicado.

Lippmann, M., Truesdell, A. y Frye, G. (sf). Los campos geotérmicos de Cerro Prieto y Salton Sea: ¿realmente se parecen? Manuscrito no publicado.

Marzolf, N. C. (s.f.). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo / Convenio ISAGEN-BID/JC.

Mercado, S., Bermejo, F., Hurtado, R., Terrazas, B., & Hernández, L. (1989). Scale incidence on production pipes of Cerro Prieto geothermal wells. *Geothermics*, 18(1-2), 225-232. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(89\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0375-6505(89)90031-X)

Navarro Gómez, S. A., & Alarcón Prada, J. E. (2014). Diseño del completamiento y del sistema de levantamiento artificial en un pozo de recobro con combustión in situ mediante analogías (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander.

Nelson, E. B. (2006).

Nelson, EB (2006). Well cementing (2nd ed.). Elsevier Science Publishers. Cementación de pozos (2ª ed.). Editores científicos de Elsevier.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Ocampo, D. J. de D., & Rojas, B. M. R. (2004). Production problems review of Las Tres Vírgenes Geothermal Field, Mexico. GRC Transactions, 28, 499-502.

Ocampo, D. J. de D., & Rojas, B. M. R. (2004). Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, México. Transacciones GRC, 28, 499-502

Okamoto, K., Asanuma, H., & Nimiya, H. (2021). Fluid activity detection in geothermal areas using a single seismic station by monitoring horizontal-to-vertical spectral ratios. Scientific Reports, 11(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86775-1>

Okamoto, K., Asanuma, H. y Nimiya, H. (2021). Detección de actividad de fluidos en áreas geotérmicas utilizando una única estación sísmica mediante el monitoreo de relaciones espectrales horizontales a verticales. Informes científicos, 11(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86775-1>

Oort, E. Van, Chen, D., Ashok, P., & Fallah, A. (2021). Constructing deep closed-loop geothermal wells for globally scalable energy production by leveraging oil and gas ERD and HPHT well construction expertise. \*SPE/IADC-204097-MS\*.

Oort, E. Van, Chen, D., Ashok, P. y Fallah, A. (2021). Construcción de pozos geotérmicos profundos de circuito cerrado para una producción de energía escalable a nivel mundial aprovechando la experiencia en construcción de pozos ERD y HPHT de petróleo y gas. \*SPE/IADC-204097-MS\*.

Phi, T., Elgaddafi, R., Al Ramadan, M., Fahd, K., Ahmed, R., & Teodoriu, C. (2019). Well integrity issues: Extreme high-pressure high-temperature wells and geothermal wells: A review. En SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium 2019, TWID 2019.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Phi, T., Elgaddafi, R., Al Ramadan, M., Fahd, K., Ahmed, R. y Teodoriu, C. (2019). Problemas de integridad de los pozos: pozos geotérmicos y de alta presión y alta temperatura extrema: una revisión. En Simposio de Diseño e Integridad de Pozos Térmicos de SPE 2019, TWID 2019.

<https://doi.org/10.2118/198687-ms>

Rodríguez, H. (2020). Simulación técnico-económica de un sistema de generación geotérmica en el volcán Cerro Machín (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander.

Rodríguez, M. H. R. (s.f.). Presencia de flujo cruzado en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. Manuscrito no publicado.

Salcedo Bolaños, V. (2012). Estudio de las propiedades mecánicas de los cementos usados para la cementación de zonas productivas en pozos del bloque 15 operados por Petroamazonas (Trabajo de grado).

Sánchez, J., & García de la Noceda, C. (2005). Geothermal energy development in Spain - Country update report. En Proceedings World Geothermal Congress. Actas del Congreso Mundial de Geotermia.

Sanuade, A. O., & Elkatatny, S. (2018). Cement failure modeling for high-pressure and high-temperature wells: Case studies. SPE Journal.

Sanuade, A. O. y Elkatatny, S. (2018). Modelado de fallas de cemento para pozos de alta presión y alta temperatura: estudios de casos. Diario SPE.

Seal, K. E. (s.f.). Sello, K. E. (s.f.). The geothermal potential of Indonesia. Manuscrito no publicado.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Session, G. (1985). Philippine geothermal potential and national strategy for its development. En Proceedings (sin datos de editor).

Sesión, G. (1985). Potencial geotérmico de Filipinas y estrategia nacional para su desarrollo. En Actas (sin datos de editor).

Suryanarayana, P. V., Bowling, J., Sathuvalli, U. B., & Krishnamurthy, R. (s.f.). A design basis for geothermal well tubulars subjected to annular pressure buildup from fluids trapped in cement. Manuscrito no publicado.

Suryanarayana, P. V., Bowling, J., Sathuvali, U. B. y Krishnamurthy, R. (s.f.). Una base de diseño para tubos de pozos geotérmicos sujetos a una acumulación de presión anular a partir de fluidos atrapados en cemento. Manuscrito no publicado.

Ullah, S. Z., & Bukhari, S. R. S. (2008). Geothermal reservoirs: A renewable source of energy and an extension of petroleum engineering.

Ullah, SZ y Bukhari, SRS (2008). Yacimientos geotérmicos: una fuente de energía renovable y una extensión de la ingeniería petrolera.

\*Society of Petroleum Engineers - SPE Gas Technology Symposium, 1\*, 420-429.  
<https://doi.org/10.2118/114718-ms>

\*Sociedad de Ingenieros de Petróleo - Simposio de tecnología de gas de la SPE, 1\*, 420-429.  
<https://doi.org/10.2118/114718-ms>

Wilcox, M. (1983). Analytical solutions for casing-cement interface stresses in high-pressure wells. Journal of Petroleum Technology, 35(9), 1723-1730.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Wilcox, M. (1983). Soluciones analíticas para tensiones en la interfaz revestimiento-cemento en pozos de alta presión. *Revista de Tecnología del Petróleo*, 35(9), 1723-1730.

Wright, P. M., Ward, S. H., Ross, H. P., & West, R. C. (1985). State-of-the-art geophysical exploration for geothermal resources. *Geophysics*, 50(12), 2666-2699.  
<https://doi.org/10.1190/1.1441889>

Wright, P. M., Ward, S. H., Ross, H. P. y West, R. C. (1985). Exploración geofísica de última generación para recursos geotérmicos. *Geofísica*, 50(12), 2666-2699.  
<https://doi.org/10.1190/1.1441889>

Wu, Y., Patel, H. R., & Salehi, S. (s.f.). Thermal considerations of cement integrity in geothermal wells. Manuscrito no publicado.

Zuleta, J., & Valdelamar, J. (2022). Evaluación de yacimientos y prospectos para la producción de energía geotérmica (Trabajo de grado).

# Apéndices

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### Apéndice A. Fundamento matemático del software

Se adjunta el documento titulado “**Documento Técnico – Fundamento Matemático del Análisis Analítico de Pozos Cilíndricos en MATLAB**”, en el cual se desarrollan con rigor los siguientes aspectos:

- Supuestos físicos y mecánicos del modelo.
- Geometría del sistema analizado (radios  $r_a$ ,  $r_b$ ,  $r_c$ ,  $r_d$ ).
- Condiciones de frontera y determinación de las presiones de contacto  $P_{c1}$  y  $P_{c2}$ .
- Formulación analítica del campo de esfuerzos (soluciones de Lamé).
- Cálculo de las constantes A y B y evaluación de esfuerzos en los radios críticos.
- Criterios de referencia mecánica y consideraciones numéricas de estabilidad.

Este anexo complementa la sección 3.2 del cuerpo principal de la tesis y proporciona la base teórica completa para la implementación computacional.

### Documento Técnico del Software

### Fundamento Matemático del Análisis Analítico de Pozos Cilíndricos en MATLAB

---

#### 1. Introducción

El presente documento técnico describe de manera rigurosa el **fundamento matemático** del software desarrollado en MATLAB denominado “analítico\_pozos\_gui\_psi”. El objetivo es resolver, mediante formulación analítica, el estado de esfuerzos alrededor de pozos cilíndricos concéntricos sometidos a presiones internas y externas, considerando un medio continuo, elástico, homogéneo e isótropo.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

El software implementa soluciones clásicas de la teoría de la elasticidad para cilindros gruesos, integrándolas en una herramienta computacional que permite analizar simultáneamente hasta cinco configuraciones geométricas distintas.

---

### 2. Supuestos físicos y mecánicos del modelo

El desarrollo matemático del software se sustenta en los siguientes supuestos:

1. El problema se modela en **estado plano de deformación**, apropiado para pozos de gran longitud comparados con su diámetro.
2. El material se considera **elástico lineal**, homogéneo e isótropo.
3. Las cargas aplicadas son **axisimétricas**, por lo que no existen variaciones angulares del campo de esfuerzos.
4. El sistema está sometido únicamente a **presiones normales** en las fronteras; no se consideran esfuerzos cortantes.
5. No se incluyen efectos térmicos, plásticos ni dependientes del tiempo.

Bajo estos supuestos, el campo de esfuerzos depende exclusivamente del radio, permitiendo una formulación analítica cerrada.

---

### 3. Geometría del sistema analizado

El modelo geométrico considera cuatro radios característicos:

- $(r_a)$ : radio interno del pozo.
- $(r_b = r_a + t)$ : radio externo del revestimiento.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

- $(r_c)$ : radio externo del medio inmediato que rodea el pozo.
- $(r_d)$ : radio externo del dominio analítico.

Estos radios delimitan regiones concéntricas sometidas a diferentes condiciones de presión, las cuales gobiernan la distribución de esfuerzos.

### 4. Condiciones de frontera

El sistema está sometido a las siguientes condiciones de frontera:

- En  $(r = r_a)$ : presión interna ( $P_i$ ).
- En  $(r = r_d)$ : presión externa o de formación ( $P_f$ ).
- En las interfaces  $(r = r_b)$  y  $(r = r_c)$ : presiones de contacto desconocidas ( $P_{c1}$ ) y ( $P_{c2}$ ), respectivamente.

Estas presiones de contacto son variables internas del problema y se determinan mediante equilibrio y compatibilidad.

### 5. Formulación analítica del campo de esfuerzos

Para un cilindro grueso sometido a presiones axisimétricas, la solución general del problema elástico establece que los esfuerzos radial y circunferencial vienen dados por:

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2}$$

$$\sigma_\theta(r) = A + \frac{B}{r^2}$$

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Los coeficientes (A) y (B) dependen de las condiciones de frontera y se determinan a partir de las presiones aplicadas.

### 6. Determinación de las presiones de contacto $P_{c1}$ y $P_{c2}$

El sistema analizado presenta múltiples regiones concéntricas, lo que conduce a un sistema algebraico de ecuaciones que vincula las presiones de contacto con las presiones impuestas y la geometría.

En el software, este sistema se expresa de forma compacta mediante los términos intermedios:

- $(X = t (rb^2 + rc^2))$
- $(Y = -2 rc^2)$
- $(Z = P_i r_a (rc^2 - rb^2))$
- $(G, H, I)$ : términos polinomiales que incorporan la influencia del radio externo ( $r_d$ ) y la presión ( $P_f$ ).

El sistema lineal resultante se resuelve explícitamente para obtener:

$$P_{c1} = \frac{ZH - YI}{HX - YG}$$

$$P_{c2} = \frac{IX - GZ}{HX - YG}$$

El denominador común representa la condición de no singularidad del sistema. El software verifica que este valor no sea cercano a cero para garantizar estabilidad numérica.

### 7. Cálculo de las constantes A y B

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Una vez determinadas las presiones de contacto, los coeficientes de la solución general se obtienen imponiendo las condiciones en ( $r_b$ ) y ( $r_c$ ):

$$A = \frac{r_b^2 P_{c1} - r_c^2 P_{c2}}{r_c^2 - r_b^2}$$

$$B = \frac{r_b^2 r_c^2 (P_{c1} - P_{c2})}{r_c^2 - r_b^2}$$

Estos coeficientes caracterizan completamente el campo de esfuerzos en la región analizada.

### 8. Evaluación de esfuerzos en radios de interés

El software evalúa explícitamente los esfuerzos en dos radios críticos:

$$\sigma_r(r_b) = A - \frac{B}{r_b^2}$$

$$\sigma_\theta(r_b) = A + \frac{B}{r_b^2}$$

$$\sigma_r(r_c) = A - \frac{B}{r_c^2}$$

$$\sigma_\theta(r_c) = A + \frac{B}{r_c^2}$$

El análisis se centra en el esfuerzo circunferencial, dado que este gobierna los mecanismos de falla por tracción o compresión alrededor del pozo.

### 9. Criterios de referencia mecánica

Aunque el software no implementa un criterio de falla explícito, introduce valores de referencia para facilitar la interpretación:

- **Resistencia a compresión:** ( $c = 60$  Mpa), convertida a psi.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

- **Resistencia a tracción estimada:**  $(0.1 \cdot c)$ .

Estos valores se superponen gráficamente a los resultados calculados, permitiendo una evaluación visual inmediata del nivel de sollicitación mecánica.

---

---

### 10. Consideraciones numéricas y estabilidad

El algoritmo incorpora verificaciones numéricas fundamentales:

- Validación de positividad de todas las variables físicas.
- Verificación de la consistencia geométrica ( $r_c > r_b$ ).
- Control de la singularidad del sistema algebraico mediante el análisis del denominador común.

Estas verificaciones aseguran que los resultados obtenidos sean físicamente coherentes y matemáticamente estables.

### Apéndice B. Manual de Usuario de la Interfaz Gráfica

Se adjunta el documento “**Manual de Usuario – Interfaz gráfica para el análisis de esfuerzos en pozos en MATLAB**”, el cual contiene:

- Requisitos del sistema y configuración necesaria.
- Descripción de la ventana principal y los campos de entrada ( $P_i$ ,  $P_f$ ,  $r_a$ ,  $t$ ,  $r_c$ ,  $r_d$ ).
- Procedimiento operativo paso a paso (inicialización, ingreso de datos, ejecución del análisis e interpretación de resultados).
- Manejo de errores y mensajes del sistema.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

- Consideraciones técnicas y limitaciones del modelo.
- Casos de uso y solución de problemas comunes.

Este anexo sirve como guía práctica para la utilización de la herramienta computacional desarrollada (función `analitico_pozos_gui_psi`) y facilita su aplicación en nuevos casos de estudio.

### **1. Introducción y propósito del sistema**

El presente manual de usuario describe de manera detallada y sistemática el funcionamiento de la herramienta computacional, desarrollada en el entorno MATLAB, cuyo propósito es realizar el análisis de esfuerzos alrededor de hasta cinco pozos cilíndricos concéntricos. La aplicación permite calcular presiones de contacto, esfuerzos radiales y circunferenciales, empleando exclusivamente unidades imperiales (psi y pulgadas), garantizando coherencia dimensional en los cálculos y en la representación gráfica de los resultados.

#### **1.2. Base teórica**

El análisis se fundamenta en la teoría de la elasticidad para cilindros compuestos, aplicando soluciones analíticas de Lamé para la distribución de esfuerzos en medios axisimétricos. Todos los cálculos utilizan exclusivamente el sistema imperial de unidades (psi, para presiones, pulgadas, para dimensiones).

### **2. Requisitos del sistema y configuración**

#### **2.1. requisitos técnicos**

- MATLAB R2018b o superior (requerido para funciones (`uifigure`))
- Toolboxes: MATLAB Base (suficiente para ejecución)
- Sistema operativo: Windows, macOS o Linux compatible.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 2.2. Parámetros predefinidos del material

El sistema utiliza valores por defecto basados en propiedades geotécnicas típicas:

- Resistencia a la compresión: 60 Mpa (8702.26 psi)
- Resistencia a la tracción estimada: 10% del valor compresivo (870.226 psi)

**Nota:** estos valores sirven como referencia para líneas de comparación en gráficos, no como límites absolutos de falla.

### 3. Interfaz gráfica componentes y funcionalidad

#### 3.1. Estructura de la ventana principal

Ingrese datos (UNIDADES: psi e in) y presione Calcular

	Pi (psi)	Pf (psi)	ra (in)	t (in)	rc (in)	rd (in)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

Calcular

#### 3.2. Descripción de campos de entrada

Cada fila representa un pozo independiente con seis parámetros:

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

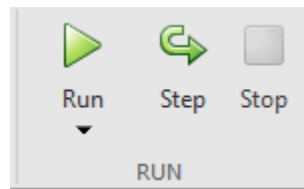
Campo	Simbolo	Descripcion	Unidades	Restricciones
Pi	Pi	Presion interna aplicada en el pozo	psi	Valor positivo ( $> 0$ )
Pf	Pf	Presion externa o de formacion	psi	Valor positivo ( $> 0$ )
ra	ra	Radio interno del pozo	pulgadas(in)	Valor positivo ( $> 0$ )
t	t	Espesor de la primera capa	pulgadas(in)	Valor positivo ( $> 0$ )
rc	rc	Radio de la segunda interfaz	pulgadas(in)	Debe ser $> (ra + t)$
rd	rd	Radio externo del dominio	pulgadas(in)	Valor positivo ( $> 0$ )

#### 4. Procedimiento operativo paso a paso

##### 4.1. Paso 1: inicialización del sistema

Ejecute en la ventana de comandos de MATLAB:

Analítico\_pozos\_gui\_psi



La ventana gráfica se abrirá automáticamente con la tabla inicializada con ceros.

	Pi (psi)	Pf (psi)	ra (in)	t (in)	rc (in)	rd (in)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

##### 4.2. Paso 2: ingreso de datos

Para cada pozo a analizar (máximo 5):

1. Seleccione la fila vacía haciendo clic en cualquier celda

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

2. Ingrese valores en el orden establecido por las columnas
3. Verifique coherencia geométrica:  $r_c > (r_a + t)$

Ejemplo de datos válidos para un pozo:

$P_i = 5000$  psi,  $P_f = 3000$  psi,  $r_a = 4$  in,  $t = 2$  in,  $r_c = 8$  in,  $r_d = 20$  in.

### 4.3. Paso 3: Ejecución del análisis

Presione el botón “**calcular**” para iniciar el procesamiento. El sistema realizará:

1. Validación de entradas: verifica calores positivos y coherencia geométrica
2. Cálculo de parámetros intermedios:
  - i.  $r_b = r_a + t$  (radio de primera interfaz)
  - ii. cuadrados de radios para formulación matemática
3. Solución del sistema: Calcula  $P_{c1}$  y  $P_{c2}$  mediante álgebra matricial
4. Determinación de esfuerzos: Aplica fórmulas de Lamé para  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$

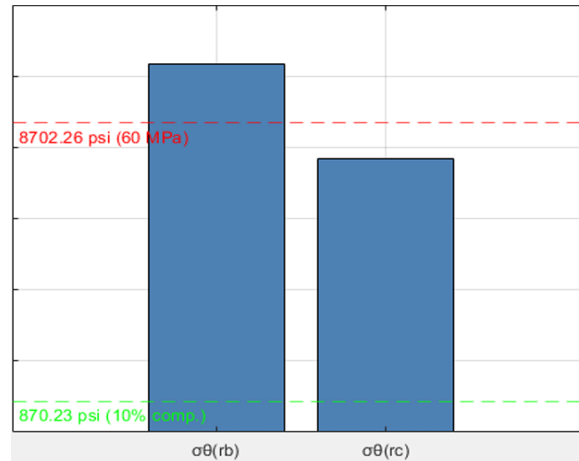
### 4.4. Paso 4: interpretación de resultados

#### 4.4.1. Gráficos individuales (por pozo)

Para cada pozo procesado exitosamente, se genera una figura con:

- Dos barras verticales: Representan  $\sigma_\theta$  en  $r_b$  y  $r_c$ .
- Línea roja discontinua: Resistencia a la compresión (8702.26 psi).
- Línea verde discontinua: Resistencia a la tracción estimada (870.226 psi).

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT



### Análisis del gráfico:

- Si las barras exceden la línea roja → Riesgo de falla por compresión.
- Si las barras están por debajo de la línea verde → Riesgo de fractura por tracción
- La diferencia de altura entre las barras indica gradiente de esfuerzos entre interfaces

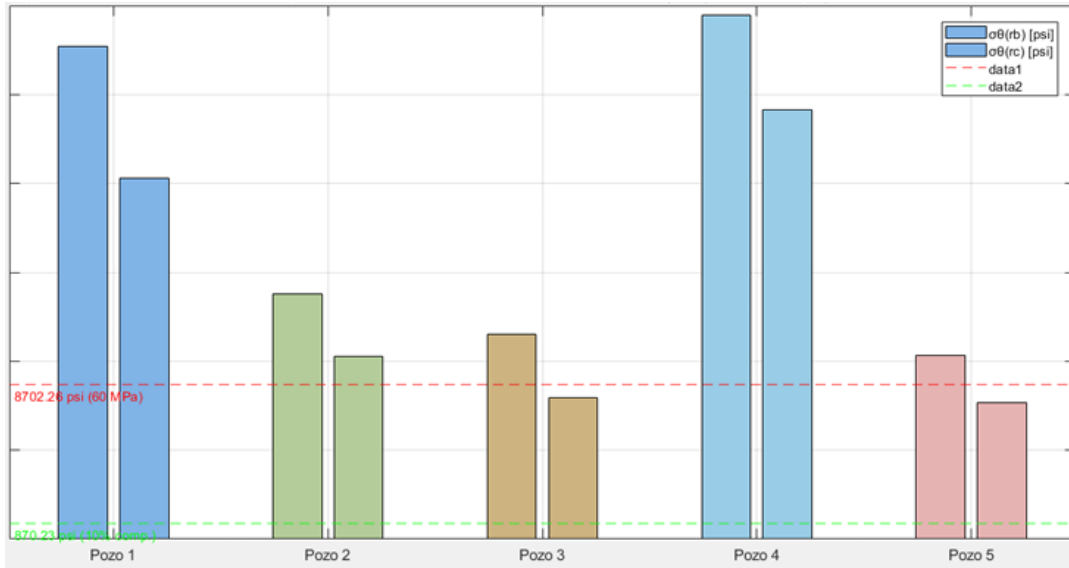
### 4.4.2. Gráfico comparativo (múltiples pozos)

Aparece automáticamente cuando se ingresan 2 o más pozos válidos:

- Barras agrupadas por pozo: Colores diferenciados para identificación
- Mismo sistema de referencia: líneas rojas y verdes constantes
- Leyenda explicativa: identifica  $\sigma_{\theta}(rb)$  y  $\sigma_{\theta}(rc)$

**Uso comparativo:** permite evaluar configuración óptima o identificar pozos críticos.

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT



## 5. Manejo de errores y mensajes del sistema

### 5.1. Mensajes en ventanas de comando

El sistema reporta problemas sin interrumpir el análisis completo:

Mensaje	causa probable	Accion correctiva
Pozo x: uno o mas valores no positivos. Saltando	Entrada $\leq 0$ en algun campo	Verificar que todos los valores son $> 0$
Pozo x: error geometrico $rc \leq rb$ .	$rc \leq (ra+t)$	Ajustar $rc$ o $t$ para cumplir $rc > ra+t$
Pozo x: denominador cercano a cero	Combinacion parametrica singular	Revisar consistencia de presiones y geometrias

### 5.2. Mensajes en interfaz gráfica

- “sin datos”: Aparece si no hay filas con datos al presionar “calcular”
- Figuras no generadas: Pozos con errores no producen gráficos individuales

## 6. Consideraciones técnicas y limitaciones

### 6.1. Supuestos del modelo

El análisis considera:

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

1. Material isotrópico y homogéneo en cada capa
2. Comportamiento elástico lineal hasta los límites de referencia
3. Geometría perfectamente axisimétrica
4. Condiciones de esfuerzo plano (válido para pozos de longitud significativa)

### 6.2. Limitaciones conocidas

1. No considera anisotropía del material
2. Ausencia de análisis plástico o no lineal
3. Tratamiento simplificado de condiciones de contorno
4. Máximo 5 pozos en análisis comparativo

### 6.3. Precisión y unidades

- Todas las operaciones se realizan en sistema imperial
- Conversión Mpa  $\rightarrow$  psi: Factor exacto 145.03773
- Precisión de visualización: 2 decimales para líneas de referencia.

## 7. Casos de uso y aplicaciones prácticas

### 7.1. Diseño de sistemas de contención

Evaluar espesores necesarios (t) para mantener esfuerzos dentro de márgenes seguros dados  $P_i$  y  $P_f$  específicos.

### 7.2. Análisis comparativo de configuraciones

Comparar múltiples diseños de pozos para seleccionar la configuración más eficiente.

### 7.3. Validación de especificaciones

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

Verificar que presiones operativas ( $P_i$ ) no induzcan esfuerzos peligrosos en interfaces críticas.

### 7.4. Ejemplo de flujo de trabajo típico

1. Definir parámetros del material (ajustar en código si es necesario)
2. Ingresar geometrías de pozos candidatos
3. Ejecutar análisis y revisar gráficos individuales
4. Analizar gráfico comparativo para selección
5. Iterar modificando parámetros hasta cumplir criterios de seguridad

## 8. Solución de problemas comunes

### 8.1. Ventana no se abre

- Verificar versión de MATLAB
- Hay que confirmar que la función está en el path actual
- Ejecutar “ver” para verificar instalación completa

### 8.2. Gráficos no aparecen

- Revisar ventana de comandos para mensajes de error
- Verificar que figuras no estén minimizadas
- Confirmar que al menos un pozo tenga datos válidos

### 8.3. Resultados inesperados

- Validar unidades: todos los valores en psi y pulgadas
- Verificar condición geométrica:  $r_c > r_a + t$
- Revisar órdenes de magnitud: presiones típicas en miles de psi

## ANÁLISIS MECÁNICO DEL CEMENTO EN POZOS HP/HT

### 9. Referencias y base teórica

- **Geotecnia:** Análisis de esfuerzo en pozos y perforaciones
- **Diseño mecánico:** Recipientes a presión de pared gruesa
- **Ingeniería petrolera:** Integridad de pozos y tuberías de revestimiento