

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2026,
Volumen 10, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2

CEMENTACIÓN GEOTÉRMICA SIN LÍMITES

LIMITLESS GEOTHERMAL CEMENTING

José Luis Villalobos López
Investigador Independiente, Mexico

Cementación Geotérmica sin Límites

José Luis Villalobos López¹

villawolfjl@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-9438-575X>

Investigador Independiente

RESUMEN

La cementación de pozos geotérmicos representa uno de los principales retos técnicos en la construcción de pozos de HT (alta temperatura), debido a condiciones extremas como temperaturas superiores a los 150°C (también clasificados como de alta entalpía), ambientes altamente corrosivos y exposición continua a vapor o salmueras. Por esa razón los sistemas convencionales de cementación presentan limitaciones significativas que afectan la integridad del pozo y sobre todo en su vida útil. Ya que los pozos geotérmicos se clasifican según la temperatura del fluido extraído, lo que determina su uso (electricidad o calor directo). En este artículo analizamos los principales retos de la cementación geotérmica, definiendo los requerimientos técnicos del sistema cementante y evalúa diferentes soluciones tecnológicas, incluyendo cementos inorgánicos modificados, sistemas térmicos o espumados y cementos poliméricos. Se profundiza en el diseño y optimización de estos últimos debido a su desempeño superior en condiciones severas. Los resultados muestran que los sistemas avanzados, particularmente los cementos poliméricos, ofrecen ventajas significativas en estabilidad térmica, resistencia química y durabilidad, posicionándose como una solución clave para el desarrollo sostenible de la energía geotérmica.

Palabras clave: geotermia, cementación de pozos, alta temperatura, cementos poliméricos, integridad de pozo

¹ Autor principal

Correspondencia: villawolfjl@hotmail.com

Limitless Geothermal Cementing

ABSTRACT

Geothermal well cementing represents one of the primary technical challenges in the construction of high-temperature (HT) wells, due to extreme conditions such as temperatures exceeding 150°C (also classified as high-enthalpy systems), highly corrosive environments, and continuous exposure to steam or brines. Under these conditions, conventional cementing systems exhibit significant limitations that compromise well integrity, particularly over the long term. Geothermal wells are typically classified based on the temperature of the produced fluid, which ultimately determines their application (power generation or direct heat use). This article analyzes the key challenges associated with geothermal cementing, defines the technical requirements of the cementing system, and evaluates various technological solutions, including modified inorganic cements, thermal and foamed systems, and polymer-based cements. Special emphasis is placed on the design and optimization of polymer systems due to their superior performance under severe conditions. The results indicate that advanced cementing systems (particularly polymer-based cements) offer significant advantages in terms of thermal stability, chemical resistance, and long-term durability, positioning them as a key solution for the sustainable development of geothermal energy.

Keywords: geothermal well, cementing, high temperature, polymeric cements, well integrity

*Artículo recibido 20 marzo 2026
Aceptado para publicación: 20 abril 2026*



INTRODUCCIÓN

La transición energética global ha impulsado el desarrollo de fuentes renovables confiables, entre las cuales la energía geotérmica destaca por su capacidad de generación continua, baja huella de carbono y alta disponibilidad. En México, esta fuente representa un componente estratégico del sistema energético, con más de 950 MW instalados.

Sin embargo, el desarrollo de proyectos geotérmicos enfrenta desafíos técnicos significativos, siendo la cementación de pozos uno de los más críticos. A diferencia de los pozos convencionales, los sistemas geotérmicos operan bajo condiciones extremas que incluyen altas temperaturas, ambientes corrosivos y esfuerzos mecánicos cíclicos.

Estas condiciones superan las capacidades de los sistemas cementantes tradicionales, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas. Este artículo tiene como objetivo analizar de forma sintetizada dichos retos, definir requerimientos técnicos y evaluar soluciones de diseño para mejorar la integridad y confiabilidad de los pozos geotérmicos.

DESARROLLO

Requerimientos Técnicos del Cemento Geotérmico

La cementación geotérmica enfrenta desafíos derivados de la interacción de múltiples factores:

- Térmicos.- temperaturas superiores a 150°C provocan retrogradación y micro fisuración.
- Químicos.- presencia de CO₂, cloruros y sulfatos genera degradación.
- Mecánicos.- ciclos térmicos inducen fatiga y pérdida de adherencia.
- Hidráulicos.- aumento de permeabilidad permite migración de fluidos.
- Operativos.- condiciones dinámicas afectan la estabilidad del sistema.

Estos retos convierten al cemento en la principal barrera de integridad del pozo, elevando su criticidad dentro del diseño, construcción, y vida productiva.

Requerimientos de desempeño fundamental

Los parámetros base para un cemento geotérmico se resumen en la siguiente tabla:



Tabla 1. Requisitos de desempeño del cemento geotérmico

Propiedad	Requisito típico
Resistencia a compresión (24 h)	> 1000 psi
Resistencia a largo plazo	Estable sin retrogradación
Permeabilidad	< 0.1 mD
Adherencia a Casing	> 10 mV
Estabilidad térmica	Hasta 300–400°C
Tiempo de bombeable	3–4 horas (dependiendo operación)
Compatibilidad con fluidos	Alta

Sin embargo, estos criterios tradicionales requieren complementarse con variables adicionales propias de ambientes geotérmicos para que no sean insuficientes.

Estabilidad térmica y retrogradación

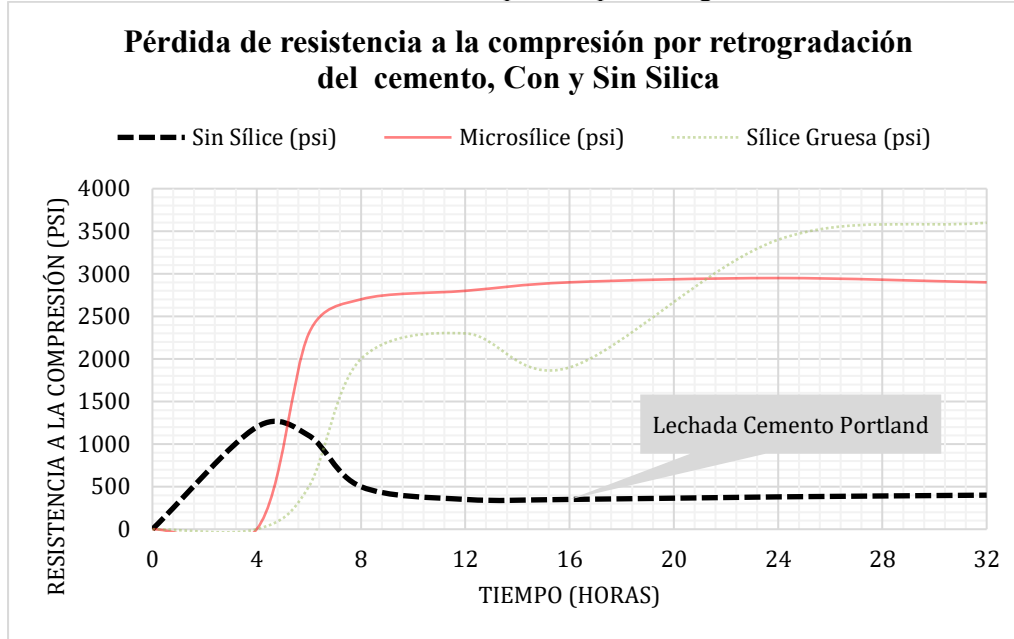
Uno de los principales retos es la pérdida de resistencia mecánica a altas temperaturas. Los cementos Portland convencionales presentan un fenómeno conocido como “pérdida de resistencia a la compresión por retrogradación del cemento” (retrogradación del cemento), particularmente por encima de 110°C (230°F).

Para aplicaciones geotérmicas de alta temperatura han incluido típicamente entre un 35% al 40% de sílice cristalina en peso de cemento (bwoc) para ayudar a prevenir este efecto, el sílice o silica como aditivo evitan la generación de silicato cálcico hidratado o silicato de calcio hidratado, (denominado también gel C-S-H), que es un silicato cálcico que ha sufrido una reacción de hidratación (monohidratada) para convertirse en un gel cementoso. Estos aditivos de sílice permiten en muchos casos soportar temperaturas superiores a 343°C (650°F), sin embargo, esta solución genera una cierta complejidad en su preparación y control de mezcla; lo que genera: Reducción de la resistencia a compresión, Incremento de la porosidad y permeabilidad.

En el estudio de (Iverson, B.J., & Maxson, J.A. , 2010); En el que hicieron pruebas de degradación de lechadas concluyeron que una adición de 40% de sílice resulta insuficiente como punto de partida cuando las temperaturas de curado alcanzan los 550°F.



Grafica 1. Pérdida de resistencia a la compresión por retrogradación del cemento, Con y Sin Sílice.



En contraste, sistemas avanzados como los *Cementos Térmicos*, basados en matrices no Portland, están diseñados para mantener estabilidad estructural en condiciones de temperaturas “ultra-altas”, lo que los hace adecuados para aplicaciones geotérmicas profundas y procesos térmicos intensivos.

Resistencia química y ambientes corrosivos

Los fluidos nativos de los pozos geotérmicos aparte de agua dulce o salobre suelen contener: CO₂ disuelto, Sulfatos, Cloruros y Ácidos débiles (como ácido carbónico).

En presencia de agua, el CO₂ forma ácido carbónico, el cual reacciona con los productos de hidratación del cemento, provocando un proceso de carbonatación que deteriora la integridad mecánica del sistema.

Por ello, un requisito crítico es que el cemento sea:

- Químicamente inerte o altamente resistente a ácidos
- No reactivo con CO₂
- Capaz de mantener su integridad en ambientes de salmuera

Eso lo logramos con aditivos que disminuyan la permeabilidad y aumenten la alcalinidad para impedir que el CO₂ penetre.

Un cemento térmico, basado en sistemas de aluminato de calcio fosfatado, ha demostrado alta resistencia a estos mecanismos de degradación, ofreciendo una barrera más duradera frente a ambientes corrosivos.

Así como aditivos a base de sílice coloidal/silicatos que actúan obturando los poros y capilares del cemento, formando compuestos insolubles que dificultan la penetración de agentes agresivos. Y los de última tecnología son los aditivos Poliméricos/Resinas Sintéticas que mejoran drásticamente la adherencia, reducen la permeabilidad y aumentan la resistencia química, dependiendo la disponibilidad y compañía las limitantes en estos aditivos ronda entre los 137°C (280°F) a los 204°C (400°F).

Elasticidad y resistencia a cargas cíclicas

A diferencia de pozos convencionales, los pozos geotérmicos y sistemas asociados (como almacenamiento o inyección) están sujetos a: Ciclos térmicos, Cambios de presión, Expansión y contracción del Casing.

Estos fenómenos generan esfuerzos que pueden provocar: Microfracturas, Despegue (debonding) del cemento, Fallas en la adherencia.

Por ello, un requerimiento clave es que el cemento tenga: Módulo elástico optimizado, Capacidad de deformación sin fractura, Resiliencia ante cargas cíclicas.

Un cemento térmico debe incorporar modificadores mecánicos que incrementan su elasticidad, permitiendo que el sistema absorba esfuerzos sin perder integridad, lo que resulta crítico en aplicaciones con ciclos térmicos repetitivos. La resistencia a la tensión y las propiedades mecánicas del cemento espumado lo hacen ideal para su aplicación a lo largo plazo, ya que ayuda a mitigar el riesgo de inicio y propagación de fracturas durante los tratamientos a los que sea sometido el pozo.

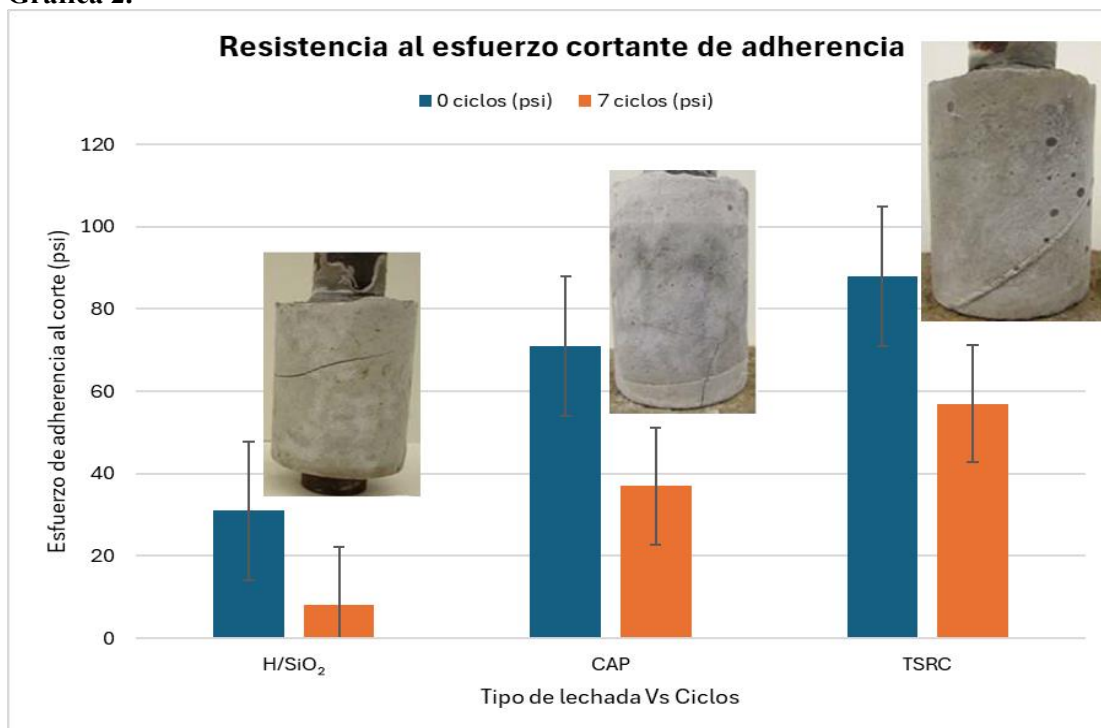
Principales Retos en Cementación Geotérmica

La cementación de pozos geotérmicos enfrenta una combinación única de retos que no se presentan simultáneamente en otras aplicaciones de la industria energética. Estos desafíos surgen de la interacción entre temperaturas ultra-elevadas, ambientes químicamente agresivos y condiciones operativas dinámicas que evolucionan a lo largo de la vida del pozo. En primer lugar, la exposición continua a temperaturas superiores a 150°C induce procesos de degradación térmica en los sistemas cementantes, provocando retrogradación de resistencia, cambios mineralógicos y generación de microfracturas que incrementan la permeabilidad. A esto se suma el ataque químico derivado de la presencia de salmueras ricas en CO₂, cloruros y sulfatos, los cuales reaccionan con la matriz del cemento, debilitando su estructura interna y comprometiendo su durabilidad.



Adicionalmente, los ciclos térmicos y de presión (propios de la operación geotérmica) generan esfuerzos mecánicos repetitivos que pueden causar fatiga del material, pérdida de adherencia al casing (debonding) y formación de caminos preferenciales de flujo. Finalmente, la ausencia de barreras mecánicas adicionales en muchos diseños de pozos geotérmicos hace que el cemento actúe como la principal defensa frente a fallas de integridad, elevando significativamente la criticidad de su desempeño. En conjunto, estos factores demandan sistemas cementantes con propiedades avanzadas que integren estabilidad térmica, resistencia química, baja permeabilidad y comportamiento mecánico resiliente.

Grafica 2.



Fuente: (Tatiana Pyatina; Toshifumi Sugama, 2018)

Resistencia al esfuerzo cortante de adherencia y apariencia de muestras adheridas de cemento–casing (CS), curadas hidrotermalmente a 300 °C, antes y después de 7 ciclos de pruebas de choque térmico. H/SiO₂ (Cemento Clase H con sílice), CAP (Calcium Phosphate Chemical Bonded Blends-Mezclas de fosfato de calcio de enlace químico), TSRC (Thermal Shock Resistant Cement-Cemento resistente al choque térmico).

Tabla 2. Resumen de retos en cementación geotérmica

Categoría	Reto principal	Mecanismo	Impacto en el pozo
Térmico	Alta temperatura (>150°C)	Retrogradación, microfisuras	Pérdida de resistencia y aumento de permeabilidad
Químico	Ambientes corrosivos (CO ₂ , salmueras)	Carbonatación, disolución	Degradación de la matriz cementante
Mecánico	Ciclos térmicos y de presión	Fatiga, expansión/contracción	Fisuración y pérdida de integridad
Interfacial	Adherencia cemento-casing	Debonding	Canalización de fluidos
Hidráulico	Incremento de permeabilidad	Formación de canales	Migración de fluidos
Operativo	Condiciones dinámicas del pozo	Cargas cíclicas	Reducción de vida útil del sistema
Diseño	Ausencia de barreras adicionales	Dependencia total del cemento	Mayor riesgo de falla crítica

Tipos de Cementos para Aplicaciones Geotérmicas

La selección del sistema de aislamiento en pozos geotérmicos es un factor crítico que impacta directamente la integridad del pozo, su vida útil y el costo total del proyecto. A diferencia de aplicaciones convencionales, donde el cemento Portland modificado puede ser suficiente, las condiciones geotérmicas exigen soluciones especializadas que integren resistencia térmica, estabilidad química, baja permeabilidad y comportamiento mecánico resiliente.

En la práctica, los sistemas utilizados en cementación geotérmica pueden clasificarse en tres grandes categorías: cementos inorgánicos modificados, cementos térmicos avanzados (incluyendo sistemas aligerados y espumados) y cementos poliméricos.

Cementos Inorgánicos Modificados

Los cementos inorgánicos constituyen la base histórica de la cementación de pozos. En aplicaciones geotérmicas, estos sistemas se modifican mediante aditivos para mejorar su desempeño en condiciones severas.

Cementos Portland con sílice

La adición de sílice (flour o sand) tiene como objetivo: mitigar la retrogradación del del cemento, estabilizar fases minerales a alta temperatura y reducir permeabilidad.

Sin embargo, su desempeño se limita típicamente a rangos menores a 300°C, y su preparación puede ser operativamente compleja debido a altas concentraciones de sólidos, como lo menciona (Aluah, Rockson, Fadairo, Adesina, and Ian Foerster, 2025).

Cementos Térmicos

Los cementos térmicos representan una evolución de los sistemas inorgánicos tradicionales, diseñados para operar en condiciones extremas de temperatura y ambientes altamente corrosivos, típicos de aplicaciones geotérmicas.

Características y formulación

Estos sistemas se distinguen por: Ser base No Portland, estabilidad térmica superior a 300°C, Alta resistencia química (CO₂, salmueras, ambientes ácidos), Baja permeabilidad e Incorporación de modificadores mecánicos.

Generalmente están formulados a partir de: Aluminatos de calcio, Fosfatos y/o Sistemas híbridos con aditivos funcionales.

Desempeño en condiciones extremas

A diferencia de los cementos convencionales, los cementos térmicos: No presentan retrogradación significativa de resistencia, Mantienen su resistencia mecánica a largo plazo, Conservan su integridad estructural en condiciones de alta temperatura, Además, su diseño incorpora resiliencia mecánica les permite poseer una mayor elasticidad, menor propagación de fracturas, y una mayor resistencia a ciclos térmicos y de compresión/descompresión.

Esto los hace especialmente adecuados no solo para pozos geotérmicos somero o profundos, también son aplicables para ambientes con vapor de alta temperatura, y algún pozo al que vaya a estar sometido a operaciones con cargas cíclicas como pozos inyectores, fracturamiento hidráulico que espere altas presiones de bombeo, etc.

Sistemas aligerados y diseño híbrido

Para optimizar el desempeño en campo, los cementos térmicos pueden integrarse con sistemas de reducción de densidad, permitiendo un balance entre integridad estructural y control operativo.



a) Lechadas espumadas (Foamed Cement)

Se generan mediante la incorporación de gas inerte (nitrógeno), formando una estructura celular única. La cual nos ofrece muchas ventajas como lo son: reducción de densidad (control hidrostático), alta resiliencia mecánica, disminución de pérdidas de circulación, mejor respuesta a esfuerzos térmicos.

Las limitaciones que se pueden tener son la sensibilidad a la calidad de la espuma si no se ejecuta bien la operación, riesgo de inestabilidad a alta temperatura por limitación térmica del agente tensoactivo que se utilice, y tiene una mayor complejidad operativa.

Sin embargo, es de las mejores opciones estructurales y celulares de cemento portland no solo para pozos geotérmicos, si no para pozos sometidos a largos esfuerzos cíclicos, pozos con formaciones débiles o zonas con pérdidas.

Lechada base + N₂ → Estructura espumada → Cemento Térmico

b) Sistemas aligerados con microesferas

Es una forma no solo de reducir la densidad de una lechada sin introducir gas, Las microesferas de vidrio se incorporan y distribuyen en la matriz de lechada líquida generando mayor estabilidad líquida, mejor control reológico y sobre todo una baja permeabilidad relativa.

Las limitaciones que puede presentar es la dependencia de la integridad de las esferas que están sujetas al posible colapso por altas presiones, o estas lechadas especiales son de mayor costo.

También es una opción viable como un cemento híbrido con cemento portland y aditivos, usados habitualmente en intervalos que requieren balance entre baja densidad y flexibilidad estructural del cemento en la vida del pozo.

Cementos Poliméricos

Los cementos poliméricos constituyen una de las tecnologías más avanzadas para aplicaciones geotérmicas, especialmente en condiciones extremas donde los sistemas inorgánicos convencionales alcanzan sus límites de desempeño.

Como se mencionó previamente, estos sistemas se formulan mediante la incorporación de aditivos poliméricos y resinas sintéticas, los cuales modifican la microestructura del material, incrementando



significativamente la adherencia interfacial, reduciendo la permeabilidad y mejorando la resistencia química frente a ambientes agresivos.

No obstante, es importante considerar que el desempeño térmico de estos aditivos depende de su naturaleza química y del proveedor, presentando generalmente limitaciones de estabilidad térmica en el rango de 137°C (280°F) a 204°C (400°F), lo cual debe ser cuidadosamente evaluado durante el diseño para aplicaciones de alta temperatura, ya que existen otros aditivos poliméricos con base en politetrafluoroetileno (PTFE) en forma de polvo fino como un aditivo de alto rendimiento que pueden ayudar a que el cemento soporte temperaturas superiores a los 260°C (500°F).

Propiedades, ventajas y consideraciones operativas de los cementos poliméricos

Los cementos poliméricos presentan un conjunto de propiedades que los posicionan como una de las soluciones más avanzadas para aplicaciones geotérmicas de alta exigencia. Su desempeño se deriva de la formación de una matriz polimérica termoestable que encapsula los agregados, generando un material compuesto con comportamiento superior frente a condiciones térmicas, químicas y mecánicas extremas. Desde el punto de vista mecánico, estos sistemas destacan por su alta resistencia a compresión, típicamente superior a 20,000 psi, así como por su capacidad de retener dicha resistencia incluso después de exposición prolongada a altas temperaturas. A diferencia de los cementos hidráulicos tradicionales, cuya estructura depende de productos de hidratación susceptibles a degradación, los cementos poliméricos mantienen su integridad gracias a su red tridimensional estable.

En términos térmicos, ofrecen excelente estabilidad a temperaturas superiores a 150°C, sin presentar fenómenos de retrogradación de resistencia ni cambios estructurales significativos. Esta característica es particularmente crítica en ambientes geotérmicos donde las condiciones de operación pueden ser extremas y variables en el tiempo.

Otra propiedad clave es su muy baja permeabilidad, lo que reduce significativamente el riesgo de migración de fluidos y canalización. Esto se complementa con una alta resistencia química, permitiendo su desempeño en presencia de CO₂, salmueras y ambientes ácidos, donde los sistemas convencionales suelen degradarse. Asimismo, su baja absorción de agua minimiza procesos de deterioro asociados a interacción fluido-material.



Comparación con Cementos Convencionales

La inclusión del cemento espumado permite entender claramente su papel dentro de las soluciones de cementación: aunque no compite directamente con sistemas de alto desempeño térmico como los poliméricos, ofrece ventajas importantes como el control de la presión hidrostática, la mitigación de pérdidas de circulación y una mayor capacidad de deformación gracias a su estructura celular, que le brinda resiliencia frente a esfuerzos térmicos y mecánicos. Sin embargo, esto implica compromisos en resistencia mecánica y una mayor dependencia de la calidad de ejecución. En ambientes geotérmicos, considero que su mejor aplicación es como sistema complementario, especialmente en secciones superficiales o zonas problemáticas, o bien como parte de diseños híbridos junto con cementos térmicos; en lo personal, me gusta trabajar con cemento espumado por su versatilidad operativa y su capacidad para resolver condiciones complejas en campo.

Tabla 3. Comparación de desempeño

Propiedad Criterio	Cemento Convencional (Portland + Sílice)	Cemento Espumado	Cemento Térmico	Cemento Polimérico
Base química	Hidratación (C-S-H)	Hidratación + gas (estructura celular)	Inorgánico modificado	Polímero termoestable
Rango de temperatura operativa	De 110 – 160°C	Hasta 300°C*	~150– >150°C	>150°C (dependiente formulación)
Resistencia a compresión inicial	3,000 – 8,000 psi	500 – 12,000 psi	8,000 – 15,000 psi	20,000 – 28,000 psi
Retención de resistencia (alta T°)	Baja (retrogradación)	Alta	Alta	Alta
Permeabilidad	Media	Media–alta*	Baja	Muy baja
Resistencia química (CO ₂ , salmueras)	Moderada a baja	Moderada	Alta	Muy alta
Absorción de agua	Media–alta	Media	Baja	Muy baja
Durabilidad a largo plazo	Limitada	Alta	Alta	Muy alta
Resistencia a ciclos térmicos	Baja	Media–alta (mejor resiliencia)	Media–alta	Alta
Elasticidad / resiliencia	Baja (frágil)	Alta	Media	Alta
Adherencia a casing	Moderada	Alta*	Alta	Alta
Riesgo de microfracturas	Alto	Medio	Medio	Bajo
Tendencia a canalización	Alta	Media	Baja	Muy baja



Estabilidad volumétrica	Moderada (contracción)	Buena (estructura compresible)	Alta	Alta
Control de densidad	Limitado	Excelente	Bueno	Limitado
Compatibilidad con pérdidas de circulación	Baja	Alta	Media	Baja
Facilidad de diseño y mezcla	Alta	Media*	Media	Baja (requiere control químico)
Requerimientos operativos	Estándar	Moderados*	Moderados	Especializados
Costo inicial	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Costo ciclo de vida (LCC)	Alto	Medio-bajo	Medio	Bajo
Aplicación recomendada	Pozos convencionales	Zonas débiles / pérdidas/Geotermia	Geotermia media-alta	Geotermia extrema

* Dependiente de estabilidad de la espuma y condiciones de operación.

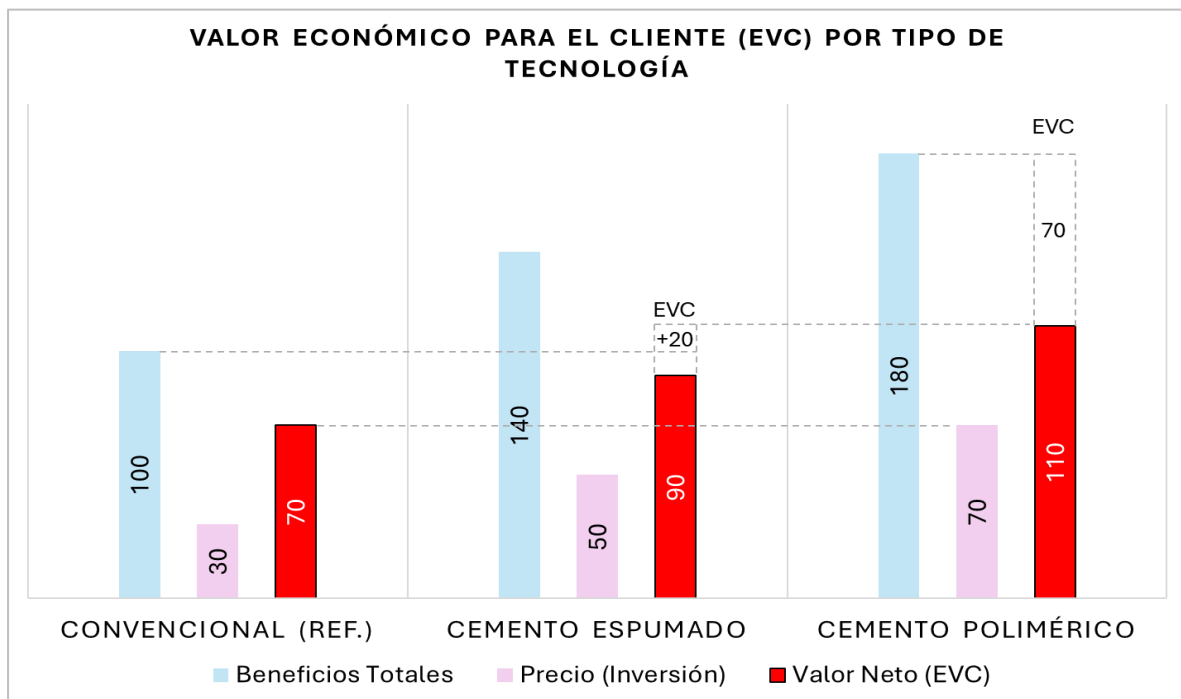
Implicaciones Operativas y Económicas en la Cementación Geotérmica

El diseño e implementación de sistemas de cementación en pozos geotérmicos no solo representa un reto técnico, sino también un factor determinante en la viabilidad operativa y económica del proyecto. La correcta selección, diseño y ejecución de la lechada impacta directamente en la integridad del pozo, la continuidad operativa y el costo total del ciclo de vida.

Tabla 4. Matriz de Selección de Lechadas

Característica / Beneficio	Cemento Convencional (Portland + Sílice)	Cemento Espumado	Cemento Térmico	Cemento Polimérico
Capacidad para alcanzar superficie con pérdidas severas		✓		✓
Capacidad para soportar esfuerzos cíclicos (térmicos/mecánicos)		✓	✓	✓
Protección térmica prolongada	✓	✓	✓	✓
Ajuste de densidad de la lechada en tiempo real		✓		
Mejora en el desplazamiento del lodo	✓	✓	✓	
Solución de bajo costo	✓	✓		

Grafica 3. Valor Económico para el Cliente (EVC) por tipo de tecnología Cemento Convencional, Espumado y Polimérico.



El EVC demuestra por qué los sistemas avanzados (como el polimérico o espumado), aunque más costosos inicialmente, ofrecen un valor neto sustancialmente mayor al mitigar riesgos como la retrogradación térmica y la corrosión, asegurando la durabilidad del pozo a largo plazo y reduciendo el Costo del Ciclo de Vida del Pozo. El Cemento Convencional es el punto de referencia, a menudo el status quo con mayores riesgos de remediación.

Diseño de lechadas

El diseño de la lechada de cemento como en todas las cementaciones debe fundamentarse en condiciones reales del pozo, integrando variables críticas que gobiernan su desempeño tanto durante la colocación como a lo largo de la vida útil del sistema. Entre los parámetros más relevantes siempre considerar la temperatura de fondo (BHST) y calcular adecuadamente la temperatura circulante (BHCT), que define la estabilidad térmica y la selección de aditivos; el tiempo bombeable, que debe garantizar una ventana operativa adecuada sin comprometer el fraguado; y la compatibilidad con el lodo, esencial para evitar contaminación, inestabilidad reológica o fallas de adherencia. Un diseño deficiente puede generar problemas operativos inmediatos o en pérdida de integridad del pozo a largo plazo.

El diseño de una cementación debe considerar cuatro ejes principales: logística, condiciones del pozo, diseño de la lechada y planeación de contingencias. Esto implica asegurar la disponibilidad de materiales (incluyendo almacenamiento y sistemas de mezclado adecuados), contar con datos precisos del pozo (registros, reportes, etc), y validar la compatibilidad de fluidos (lodo-espaciador, espaciador-lechada, lechada-lodo). Asimismo, el uso de información de pozos vecinos (offset wells para reducir incertidumbre y mejorar la confiabilidad del diseño.

Los pozos geotérmicos por su categoría y condiciones altamente demandantes, el diseño también debe incorporar un enfoque preventivo mediante la planeación de contingencias, evaluando escenarios como pérdidas de circulación, limitaciones mecánicas del equipo, Casing, fallas de equipos o desviaciones operativas durante la ejecución. La verificación de la estabilidad térmica de los aditivos, la integridad del sistema cementante a condiciones de producción y la capacidad de respuesta ante fallas operativas son elementos críticos para asegurar una cementación exitosa.

CONCLUSIONES

La cementación en pozos geotérmicos de alta entalpía exige sistemas que superen las limitaciones del cemento Portland convencional, el cual es propenso a la retrogradación y fallas por ciclos térmicos. Mientras que los sistemas espumados ofrecen una solución operativa crucial para mitigar pérdidas de circulación y absorber esfuerzos mecánicos, los cementos poliméricos se posicionan como la tecnología de vanguardia por su durabilidad extrema, nula permeabilidad y resistencia química. En conclusión, la selección del sistema debe basarse en el Costo del Ciclo de Vida del pozo y no solo en la inversión inicial, ya que las tecnologías avanzadas garantizan la integridad estructural y la viabilidad económica del pozo a largo plazo.

Se debe reconocer que la durabilidad a largo plazo es el verdadero impulsor de la viabilidad y preparación para una frugalidad económica. Para evitar los problemas que presentan los pozos y sus instalaciones hoy en día. Mirando hacia el futuro, la adopción de materiales de nueva generación y sistemas híbridos será crucial para optimizar la confiabilidad y construcción de los pozos. Se debe trabajar en el cliente que la cementación no es solo una tarea operativa para continuar con la perforación, sino que es la finalización de una etapa estratégica previa a la continuación, así la industria garantiza



no solo la protección de los activos, sino también la sostenibilidad y eficiencia de la energía geotérmica como fuente inagotable de potencia limpia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Allahvirdizadeh, P. (2020). A review on geothermal wells: Well integrity issues. *Journal of Cleaner Production*, Volume 275.
- Aluah, Rockson, Fadairo, Adesina, and Ian Foerster. (2025). Enhancing Geothermal Well Integrity: Optimizing Class G Cement with Pumice and Eggshell-Derived Pozzolanic Additives. California, USA: SPE Western Regional Meeting, Garden Grove.
- Eric Ángel Aguirre Hernandez; Gerardo Antonio Mendoza Rossano . (2018). Análisis de datos de pozos productores e inyectores y su relación con la sismicidad en campos geotérmicos. CDMX, CDMX, México: Tesis. UNAM.
- Hewlett, P. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier.
- Hoang, N. H., Bois, A. P., Naumann, M., Sæther, S., and T. Coudert. (2022). Effect of Cement Behaviour on Casing Integrity in Superhot Geothermal Wells: A Numerical Study. New Mexico, USA: 56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Santa Fe.
- Iverson, B.J., & Maxson, J.A. . (2010). Strength Retrogression in Cements under High-temperature Conditions. Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- J. J. Abraham; C. Devers; C. Teodoriu; M. Amani; M. AlMujalhem. (2025). Evaluating Thermal Stability of Geopolymers and Other Common Cement Formulations in Geothermal and Other HPHT Operations . Texas, USA: SPE Offshore Technology Conference, Houston.
- LAMBARI, J. G. (1977). Problemas en la operacion de los pozos geotermicos de cerro prieto . México: OLADE (Organización Latinoamericana de Energía).
- Patchen, A. D. (1960). High-temperature cementing with silica flour. *Journal of Petroleum Technology*, 12(11), 63–67.
- Programa Fomento de la Geotermia en Centro América. (2017). Geotermia: Una alternativa para mejorar la matriz energética centroamericana. *Revista Geotermia Vol. 30, Núm. 1 Enero-Junio de 2017*, 42-45.



RAMÍREZ, M. A. (2023). Diseño de lechadas livianas de cemento para pozos geotérmicos. Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Rosa M. Barragán et Al. (2006). Helium anomalies at Los Azufres geothermal field, Mexico. *Geothermia, Vol. 19, No. 1, Enero-Junio de 2006*, 33-40.

Stiles, D. A. (2006). Long-term effects of high-temperature exposure on oilwell cement systems. *SPE Drilling & Completion*, 21(04), 286–292.

Tatiana Pyatina; Toshifumi Sugama. (2018). Cements for High-Temperature Geothermal Wells. *Brookhaven National Laboratory*.

Taylor, H. F. (1997). *Cement Chemistry*. Thomas Telford.

