

Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil

Análisis experimental de la gelificación de
soluciones de sílice y su aplicación a la mejora de
suelos granulares.

Autor: Manuel Vizuite Longo

Tutor: Manuel Vázquez Boza

**Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería
del Terreno**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

**Análisis experimental de la gelificación de
soluciones de sílice y su aplicación a la mejora de
suelos granulares.**

Autor:

Manuel Vizquete Longo

Tutor:

Manuel Vázquez Boza

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Análisis experimental de la gelificación de soluciones de sílice y su aplicación a la mejora de suelos granulares.

Autor: Manuel Vizuet Longo

Tutor: Manuel Vázquez Boza

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos los profesores que he tenido, tanto en la universidad como fuera de ella, por haber fomentado, aunque algunos más que otros, el desarrollo de mi curiosidad. También quiero agradecer a aquellos que me han formado como profesional y como persona, realizando un trabajo que nunca se podrá valorar lo suficiente. También a mi familia, que me ha dedicado todo su tiempo, todo su esfuerzo y todos sus recursos con tal de educarme y formarme lo mejor posible para afrontar la vida.

A Manolo, por guiarme, por ser mi tutor y ayudarme con este trabajo. También gracias a Concha, Lidia y José Manuel por prestarme su tiempo y ayuda en el laboratorio.

Manuel Vizuete Longo

Sevilla, 2025

Este trabajo analiza la gelificación de soluciones de sílice coloidal y su aplicación en la mejora de suelos granulares mediante ensayos edométricos. Los objetivos principales son evaluar el comportamiento mecánico de mezclas de suelo con Ludox y determinar la concentración óptima de sales para su activación. Los ensayos edométricos no inundados revelaron que la sílice coloidal puede reducir significativamente la deformabilidad del suelo, mejorando su estabilidad. Sin embargo, en condiciones saturadas, es necesario extender el tiempo de curado para evitar posibles colapsos. Los resultados demuestran que la combinación de Ludox con sales activadoras es prometedora para la estabilización de suelos, especialmente en aplicaciones geotécnicas.

Abstract

This study analyzes the gelation of colloidal silica solutions and their application in the improvement of granular soils through oedometer tests. The main objectives are to evaluate the mechanical behavior of soil-Ludox mixtures and determine the optimal salt concentration for activation. Undrained oedometer tests showed that colloidal silica significantly reduces soil deformability, enhancing stability. However, in saturated conditions, extended curing time is required to prevent potential collapses. The results demonstrate that the combination of Ludox with activating salts is promising for soil stabilization, particularly in geotechnical applications.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Notación	¡Error! Marcador no definido.
1 Motivación y Objetivos	1
2 Introducción	3
3 Estado de la Técnica	5
3.1 La Sílice Coloidal	5
3.2 Líneas Previas de Investigación	7
4 Metodología Experimental	11
5 Resultados Experimentales	15
5.1 Ensayo no inundado con muestras de diámetro 50mm	16
5.2 Ensayo no inundado con muestras de diámetro 50mm	20
6 Conclusiones y Lineas de Trabajo Futuro	21
Referencias	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de muestras preparadas y ensayadas en el edómetro con anillos de diámetro 50mm	12
Tabla 2. Lista de muestras preparadas y ensayadas en el edómetro con anillos de diámetro 70mm	13
Tabla 3. Lista de ensayos realizados	13
Tabla 4. Índice de compresión y módulo edométrico en muestras con NaCl	16
Tabla 5. Índice de compresión en y módulo edométrico muestras con NaCl	18
Tabla 6. Índice de compresión y módulo edométrico en muestras con NaCl (ensayo inundado)	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gelificación del CS	4
Figura 2. Ensayos de compresión simple en muestras de arena y arena con CS	7
Figura 3. Ensayos de compresión simple en muestras de CS	8
Figura 4. Muestra el desarrollo de las partículas a medida que aumenta la viscosidad	9
Figura. 5. Curva granulométrica de la arena utilizada	11
Figura. 6. Muestras ensayadas en el laboratorio	12
Figura 7. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox y diferentes concentraciones de NaCl	16
Figura. 8. Índice de compresión y módulo edométrico en función del % NaCl	17
Figura 9. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox y diferentes concentraciones de CaCl₂ ;Error! Marcador no definido.	
Figura. 10. Índice de compresión y módulo edométrico en función del % CaCl₂	18
Figura. 11. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox y diferentes concentraciones de NaCl y CaCl₂	19
Figura 12. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox Inundado	20

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

"La mejor manera de predecir el futuro es inventarlo"

-Alan Kay -

Este estudio se centra en examinar el comportamiento de muestras de arena tratadas con Ludox, una forma especializada de sílice coloidal, combinada con soluciones salinas específicas que activan la gelificación de la lechada. La motivación principal radica en explorar un método de mejora del terreno que sea efectivo, simple y respetuoso con el medio ambiente. El uso de Ludox y sales activadoras podría ofrecer una alternativa sostenible frente a los métodos tradicionales de estabilización de suelos, lo que favorecería su aplicación en un amplio rango de proyectos de ingeniería civil, desde la construcción de taludes y carreteras hasta la mitigación de deslizamientos de tierra.

La principal motivación de esta investigación surge de la necesidad de desarrollar soluciones que no solo sean efectivas en la mejora mecánica de los suelos, sino que también reduzcan el impacto ambiental asociado a los métodos de estabilización convencionales, que suelen involucrar el uso de materiales más agresivos o de alto coste. El Ludox, al ser una sílice coloidal, presenta propiedades que permiten una penetración eficiente en los suelos, logrando una estabilización que no altera significativamente el entorno natural. Su bajo impacto ambiental, combinado con su capacidad para mejorar la rigidez y la cohesión del suelo, lo convierte en una opción prometedora que podría revolucionar la forma en que se manejan los problemas de estabilidad de suelos en la ingeniería geotécnica.

Para lograr estos objetivos, este estudio analizará de manera exhaustiva el efecto de las sales activadoras (NaCl y CaCl₂) en el comportamiento mecánico de la arena tratada con sílice coloidal. Los ensayos edométricos se llevarán a cabo con diversas combinaciones de concentraciones salinas para evaluar de manera precisa el potencial del Ludox como estabilizante de suelos arenosos. La investigación buscará determinar la cantidad óptima de estas sales necesarias para activar el gel de manera efectiva, maximizando su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, tales como la rigidez, la resistencia a la compresión y la estabilidad estructural bajo diferentes condiciones de carga.

El objetivo principal de este estudio es cuantificar la cantidad óptima de soluciones de NaCl y CaCl₂ para lograr el mejor comportamiento esfuerzo-deformación en los suelos tratados, especialmente en condiciones edométricas que simulan situaciones de carga vertical sostenida. Se espera que estos datos proporcionen una base sólida para el uso del Ludox en aplicaciones prácticas, identificando las combinaciones de sales y sílice coloidal más efectivas para la mejora del terreno. Esto permitirá desarrollar protocolos de tratamiento que sean fácilmente implementables en campo, ofreciendo una alternativa competitiva en términos de costo, sostenibilidad y eficacia.

Como objetivo secundario, se pretende estudiar el comportamiento del suelo tratado con Ludox en situaciones de saturación, evaluando cómo varía la resistencia y estabilidad del suelo en función del tiempo de curado. Se analizarán muestras con tiempos de curado de 7 y 14 días, investigando el efecto del curado prolongado en la cohesión y rigidez del suelo bajo condiciones de inundación. Este análisis es crucial, ya que muchos suelos tratados están expuestos a fluctuaciones de humedad y eventos de saturación, por lo que comprender cómo el tiempo de curado influye en la durabilidad y el rendimiento a largo plazo del suelo tratado es esencial para validar la efectividad del Ludox en condiciones reales.

2 INTRODUCCIÓN

“La ciencia es el conocimiento organizado”

- Herbert Spencer -

Este estudio tiene como objetivo principal desarrollar una solución que sea no solo económica, sino también respetuosa con el medio ambiente, para abordar los problemas actuales de estabilidad de taludes en terrenos granulares. Estos taludes, presentes en diversas infraestructuras y áreas naturales, son susceptibles a sufrir fallos que pueden resultar en deslizamientos de tierra, poniendo en riesgo tanto a las poblaciones cercanas como a los ecosistemas afectados. En la búsqueda de materiales y métodos que mejoren la estabilidad de estos taludes, se propone el uso de Sílice Coloidal como una alternativa innovadora y eficiente.

Los deslizamientos de tierra en taludes granulares son un problema en la ingeniería civil, ya que pueden provocar flujos masivos de material que movilizan grandes volúmenes de tierra, causando daños importantes a infraestructuras, comunidades y ecosistemas. Un ejemplo es el deslizamiento ocurrido en El Salvador tras el terremoto de 2001, que causó la destrucción de viviendas y carreteras, además de pérdidas humanas y económicas considerables. Estos eventos destacan la necesidad urgente de soluciones eficaces que prevengan desastres similares y minimicen el riesgo asociado a la inestabilidad de los taludes.

El potencial de tratamiento con Sílice Coloidal radica en su sencillez y eficacia. Este material puede aplicarse de manera relativamente simple, pulverizándose sobre la superficie del talud, penetrando en los poros y fisuras del terreno para mejorar su cohesión y estabilidad. Además, su carácter inerte y su bajo impacto ambiental lo convierten en una alternativa prometedora frente a otros estabilizadores químicos más agresivos. La posibilidad de tratar grandes extensiones de terreno con una producción elevada y un impacto mínimo en el entorno natural hace que esta tecnología sea especialmente atractiva para proyectos que buscan maximizar la seguridad y sostenibilidad.

El Sílice Coloidal es un material compuesto por partículas de tamaño nanométrico de dióxido de silicio dispersas en agua. Este material ha sido utilizado en una variedad de industrias, desde la electrónica hasta la medicina, debido a su estabilidad y propiedades químicas. En el ámbito de la geotécnica, su capacidad para penetrar en poros y fisuras de los terrenos granulares y, al mismo tiempo, consolidar y estabilizar el suelo, lo convierte en un candidato ideal para mejorar la estabilidad de los taludes. Además, su bajo impacto ambiental en comparación con otros estabilizadores químicos es un factor clave en su selección para este estudio.

Este trabajo de fin de grado, por tanto, no solo se enfoca en demostrar la efectividad del Sílice Coloidal como estabilizador de taludes, sino también en resaltar los beneficios que este material ofrece desde una perspectiva económica y ecológica. La combinación de estas dos vertientes – rentabilidad y sostenibilidad ambiental – representa una de las mayores motivaciones para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se espera que los resultados obtenidos puedan ser aplicables en una amplia gama de contextos, contribuyendo al avance en la

gestión de infraestructuras seguras y sostenibles.

Además, se la reconoce como ambientalmente inerte y altamente penetrante.

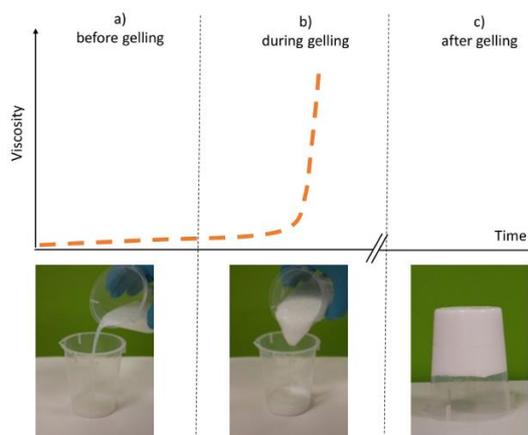


Fig. 1. Gelificación del CS: a) CS antes de gelificar, b) CS cerca de su momento de gelificación, c) CS gelificado. (Wong, 2018)

En esta investigación, nos centramos en observar el comportamiento de una muestra de arena tratada con este gel, con el objetivo de mejorar su comportamiento volumétrico, y estudiar los efectos de diferentes cantidades de sales en la preparación, además de variar el tiempo de curado, con el fin de encontrar resultados óptimos para su aplicación en la mejora del terreno.

Las partículas de sílice gelifican debido a la presencia de un acelerador, como una solución salina. Este proceso de gelificación puede ser controlado y ajustado para que ocurra de inmediato o tras varias horas, dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación. Un acelerador comúnmente utilizado es la solución de NaCl, aunque también se pueden emplear otras sales como KCl y CaCl₂. La concentración de estas soluciones y las condiciones bajo las cuales se mezclan determinan el tiempo y la efectividad de la gelificación. La gelificación de las partículas de sílice implica una serie de interacciones mecánicas y químicas que permiten que las partículas formen una estructura de gel estable. Estas interacciones incluyen la deshidratación superficial o el puenteo interparticular, influenciados por la naturaleza de los cationes presentes en la solución. Además, la temperatura y la presión aplicadas durante el proceso de grouting (inyección) también afectan significativamente la gelificación, ya que un incremento de temperatura puede variar el tiempo de gelificación, lo cual debe ser considerado en el diseño del proceso para asegurar una penetración óptima del gel en el suelo..

El incremento en la resistencia mecánica, junto con la marcada reducción en la conductividad hidráulica, posiciona a la lechada de CS y las mezclas de suelo con CS como una opción prometedora para diversas aplicaciones de estabilización del suelo. Es por eso por lo que en este trabajo investigaremos en muestras de un suelo arenoso el comportamiento volumétrico utilizando un edómetro con diferentes escalones de carga, observando su mejoría utilizando diferentes muestras de gel de sílice coloidal, variando en estas la cantidad y el tipo de diferentes sales, manteniendo constante la cantidad de ludox, estudiando así el comportamiento de nuestras probetas.

3 ESTADO DE LA TÉCNICA

“Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes”

- Isaac Newton -

La sílice, químicamente conocida como dióxido de silicio (SiO_2), es uno de los compuestos más abundantes en la corteza terrestre. Está presente en una variedad de formas, como arena, cuarzo y cristobalita, y se encuentra tanto en estado natural como en diversas aplicaciones industriales. La sílice es un material duro y químicamente inerte que se utiliza en la producción de vidrio, cerámicas, cemento y componentes electrónicos, entre otros. Su versatilidad y abundancia hacen que sea un recurso clave en muchas industrias. Sin embargo, una de sus formas más interesantes desde el punto de vista de la ingeniería civil es la sílice coloidal, que se utiliza principalmente como estabilizador de suelos y en procesos de inyección.

3.1 La Sílice Coloidal

La sílice coloidal es una dispersión de partículas de sílice extremadamente finas (nanopartículas) suspendidas en un líquido, generalmente agua. Estas partículas suelen tener un tamaño de entre 1 y 100 nanómetros. A diferencia de las partículas más grandes, la sílice coloidal permanece estable en solución debido a las fuerzas de repulsión entre las partículas que evitan que se agreguen y sedimenten. Se obtiene generalmente mediante procesos químicos controlados. Uno de los métodos más comunes implica la neutralización de una solución alcalina de silicato de sodio con un ácido, lo que da lugar a la formación de las partículas de sílice. Posteriormente, estas partículas se dispersan en agua, formando una solución coloidal estable. En algunos casos, las propiedades de la solución de sílice coloidal, como la viscosidad y el tiempo de gelificación, se pueden ajustar agregando electrolitos, como sales, para alterar las interacciones entre las partículas y controlar su comportamiento.

La gelificación de la sílice coloidal ocurre cuando las nanopartículas dispersas en la solución comienzan a unirse, formando una red tridimensional que atrapa el líquido en su interior. Este proceso convierte la solución coloidal, que tiene una consistencia líquida, en un material similar a un gel, que es más sólido, pero aún contiene un alto porcentaje de agua. La transformación de una solución coloidal en un gel se utiliza en aplicaciones como la estabilización de suelos, ya que el gel de sílice tiene la capacidad de rellenar los poros del suelo y mejorar su cohesión y resistencia.

Proceso de Gelificación (Pedrotti, 2018)

El proceso de gelificación de la sílice coloidal está influenciado por varias variables claves:

-Concentración de la sílice coloidal: A mayor concentración de sílice en la solución, más rápido será el proceso de gelificación, ya que hay más partículas disponibles para interactuar y formar una red.

-Tipo y concentración de sales (electrolitos): La adición de sales como cloruro de sodio (NaCl) o cloruro de calcio (CaCl₂) puede acelerar el proceso de gelificación. Estas sales reducen las fuerzas de repulsión entre las partículas de sílice, lo que facilita que se aglutinen y formen el gel. De hecho, en este trabajo se exploran diferentes concentraciones de sales para optimizar el proceso de gelificación.

-pH de la solución: El pH influye directamente en la estabilidad de las partículas coloidales. En ambientes muy ácidos o muy alcalinos, la carga superficial de las partículas de sílice puede variar, alterando la estabilidad de la suspensión y el comportamiento de la gelificación.

-Temperatura: La temperatura también juega un papel importante. En general, un aumento de la temperatura puede acelerar el proceso de gelificación, ya que aumenta la energía cinética de las partículas, facilitando su interacción. Sin embargo, la temperatura demasiado alta puede desestabilizar la solución.

-Tiempo de curado: El tiempo de curado, o el tiempo que se permite a la solución gelificar, es crucial. Durante este tiempo, el gel se vuelve más sólido y estable. Como se observa en este trabajo, un mayor tiempo de curado (por ejemplo, de 7 a 14 días) puede mejorar las propiedades mecánicas del suelo tratado.

En conjunto, estos factores determinan no solo la velocidad a la que ocurre la gelificación, sino también las propiedades finales del gel, como su resistencia, deformabilidad y su capacidad para estabilizar suelos granulares.

Para la preparación de las muestras de arena y sílice coloidal, se ha seguido un enfoque diferente al utilizado en experimentos previos, como los de Wong en 2018. En los estudios de Wong, la metodología consistía en mezclar de manera homogénea la arena con el gel de sílice coloidal, logrando una distribución uniforme del estabilizante en toda la muestra. Este enfoque permitía una integración total del gel con el suelo, garantizando una evaluación directa de las propiedades mecánicas del compuesto suelo-gel. Sin embargo, en el presente estudio se ha optado por un método distinto que simula más fielmente las condiciones de campo.

En este caso, en lugar de realizar una mezcla perfecta entre la arena y el gel de sílice coloidal, se ha impregnado únicamente la cara superior de la muestra con una solución de sílice coloidal combinada con diferentes concentraciones de sales, como NaCl y CaCl₂. Este procedimiento pretende replicar lo que sucedería en un entorno real, como en un talud, donde la mezcla estabilizante se vertería sobre la superficie del terreno, dejando que esta infiltre el suelo gradualmente. La impregnación superficial se ajusta más a los métodos empleados en estabilización de suelos a gran escala, donde la mezcla homogénea no siempre es viable debido a las limitaciones logísticas y económicas.

Este tipo de ensayo representa un enfoque novedoso, ya que no se han encontrado estudios previos que utilicen una metodología similar para evaluar el comportamiento de la sílice coloidal aplicada superficialmente en suelos granulares. Tradicionalmente, la investigación en el campo de la estabilización de suelos con sílice coloidal se ha centrado en la inyección directa de la solución estabilizadora dentro del suelo, garantizando una dispersión interna uniforme. Sin embargo, en situaciones reales, especialmente en la mejora de taludes o superficies erosionables, la aplicación superficial es una técnica mucho más factible y común. Por lo tanto, la importancia de este estudio está en su capacidad para simular estas condiciones reales y explorar cómo la sílice coloidal y las sales interactúan con el terreno cuando se aplican de manera externa.

3.2 Líneas previas de investigación

El estudio realizado por Wong et al. (2018) investigó la interacción mecánica entre suelos y gel de sílice coloidal (CS) para su uso en la mejora de terrenos y la creación de barreras hidráulicas. El trabajo se centró en dos sistemas diferentes: arena inyectada con CS y mezclas de arcilla caolín con CS. Los objetivos principales fueron evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación drenado de estos sistemas y comprender las interacciones a nivel microscópico entre las partículas de suelo y el CS. Los resultados de este estudio proporcionan información valiosa sobre cómo la sílice coloidal puede mejorar tanto las propiedades mecánicas como las hidráulicas del suelo, lo que lo convierte en un referente importante para este trabajo.

El estudio utilizó muestras de arena de Leighton Buzzard, en las que la inyección de CS se realizó vertiendo la solución de sílice coloidal sobre la arena, simulando así el proceso de inyección en suelos in situ. Para la preparación de muestras de arcilla caolín, el caolín se mezcló manualmente con la sílice coloidal, creando una suspensión homogénea que posteriormente se sometió a pruebas de compresión simple y corte directo.

Las pruebas mecánicas incluyeron ensayos de compresión simple y corte directo bajo condiciones saturadas. Estos ensayos permitieron evaluar tanto la rigidez como la deformabilidad de los suelos tratados, en comparación con las muestras no tratadas.

Resultados obtenidos

- Arena inyectada con CS:** Los resultados mostraron una mejora significativa en la rigidez y una reducción en la deformabilidad de la arena tratada con CS en comparación con la arena no tratada. Además, se observó una disminución drástica en la conductividad hidráulica, alcanzando valores típicos de suelos arcillosos ($\sim 10^{-10}$ m/s). Esto indica que la inyección de CS no solo mejora la resistencia mecánica del suelo, sino que también lo convierte en una barrera eficaz contra el flujo de agua.

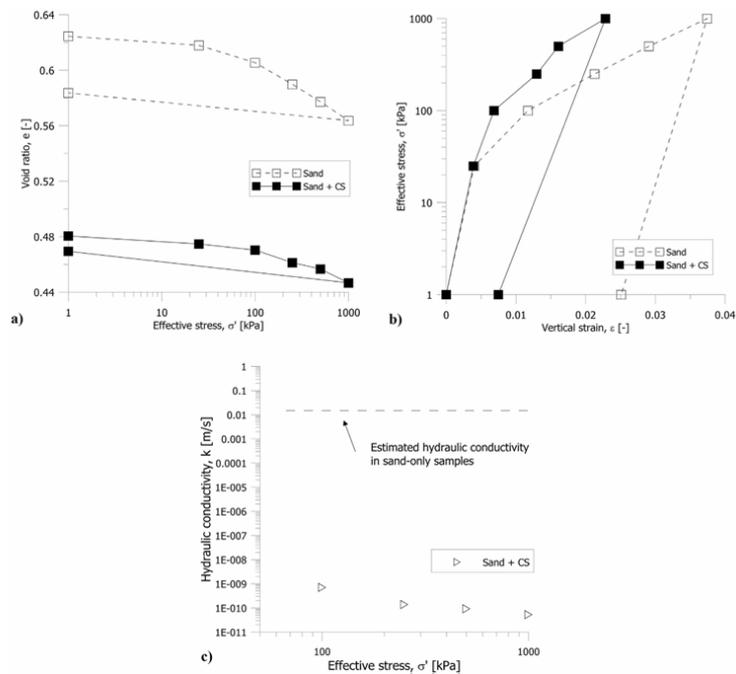


Fig. 2. Ensayos de compresión simple en muestras de arena y arena con CS: (a) índice de poros respecto a tensión efectiva, (b) tensión efectiva respecto deformación vertical y (c) conductividad hidráulica respecto a tensión efectiva. (Wong, 2018)

- **Arcilla mezclada con CS:** Se registró una menor deformabilidad y un aumento en la resistencia al corte para la arcilla mezclada con CS, especialmente en condiciones de baja carga vertical (~100 kPa). Sin embargo, a medida que aumentaba la carga, la compresibilidad del material tendía a igualarse con la de la arcilla sin tratar, lo que sugiere que el CS actúa principalmente en las primeras etapas de carga. Además, aunque se observó un aumento en la resistencia al corte, la cohesión drenada no se vio significativamente afectada.

Este estudio proporciona varios aspectos clave que complementan y refuerzan la investigación realizada en este trabajo sobre el uso de la sílice coloidal para la mejora de terrenos granulares:

1. **Métodos de aplicación de la sílice coloidal:** A diferencia de la inyección homogénea realizada por Wong et al. (2018) en este trabajo se emplea una aplicación superficial de la mezcla de sílice coloidal, simulando su vertido sobre la superficie de un talud. Aunque los métodos son diferentes, los resultados sobre la mejora de la rigidez y la reducción de la deformabilidad del suelo tratados con CS son útiles para contrastar los hallazgos de este trabajo.
2. **Influencia del tiempo de curado:** En el estudio de Wong et al. (2018), se observó que el tiempo de curado afecta considerablemente la rigidez del suelo tratado con CS, con muestras que mostraban mayor rigidez después de tiempos de curado más prolongados. En este trabajo también se varía el tiempo de curado, aunque solo para el ensayo inundado, para evaluar su efecto en la estabilización del suelo, lo que permite comparar directamente estos resultados y obtener conclusiones sobre la aplicación más eficiente del CS.

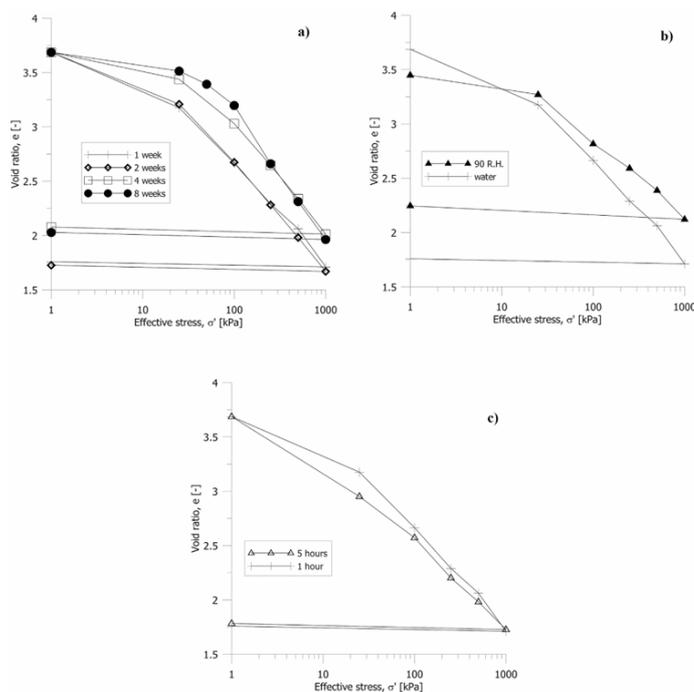


Fig. 3. Ensayos de compresión simple en muestras de CS: a) ensayos a muestras con diferente tiempo de curado, b) ensayos a muestras con diferentes humedades mientras curan y c) muestras con diferente tiempo de gelificación. (Wong, 2018)

El artículo “Silica Sol as Grouting Material: A Physio-Chemical Analysis” de Sögaard et al. (2018) analiza el uso de nanopartículas de sílice coloidal como material de inyección para la estabilización de suelos y estructuras subterráneas. Se examinan los mecanismos químicos que permiten la gelificación de la sílice coloidal mediante el uso de sales, como NaCl y CaCl₂, y cómo factores como el tamaño de las partículas, el pH y la temperatura influyen en este proceso.

Procesos Químicos de Gelificación:

La gelificación de la sílice coloidal se produce cuando las nanopartículas comienzan a aglutinarse en presencia de aceleradores, principalmente sales como NaCl y CaCl₂. Estas sales actúan neutralizando las cargas superficiales de las partículas de sílice, reduciendo así la repulsión electrostática y permitiendo que las partículas se acerquen lo suficiente para formar una red tridimensional, transformando la solución en un gel. Este proceso está regido por la teoría DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek), que describe el equilibrio entre fuerzas de repulsión electrostática y fuerzas de atracción de van der Waals. Cuando las fuerzas de atracción superan a las repulsivas, las partículas se agregan formando un gel cohesivo.

Metodología:

El artículo detalla estudios experimentales sobre la estabilidad de las soluciones de sílice y los efectos de los aceleradores bajo diferentes condiciones. Se evalúan las cinéticas de gelificación mediante variaciones en las concentraciones de sales y ajustes en el pH y la temperatura. Se comprueba que el aumento de temperatura acelera la gelificación al promover la formación de enlaces siloxano entre las partículas, fortaleciendo la estructura del gel.

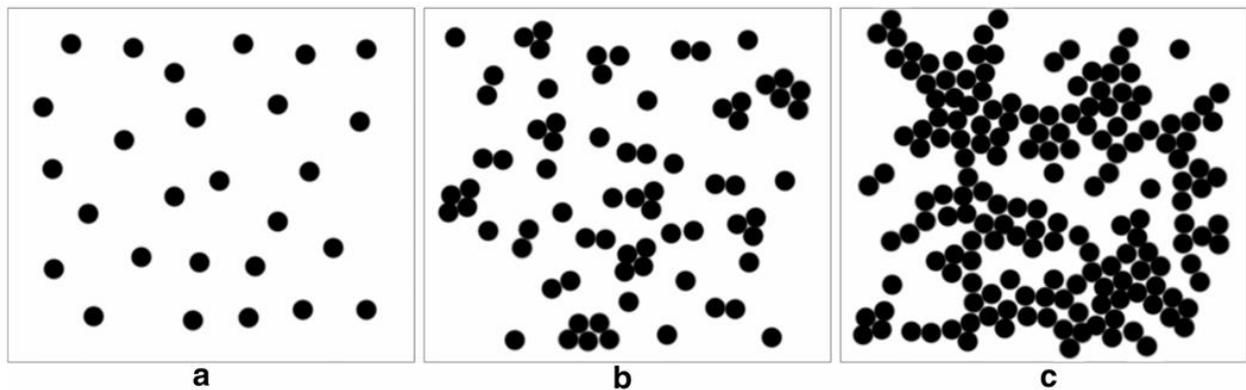


Fig. 4. Muestra el desarrollo de las partículas a medida que aumenta la viscosidad, donde (a) representa el sol de sílice antes de la introducción del acelerador, donde solo están presentes partículas individuales, (b) representa la formación de pequeños agregados poco después de la introducción del acelerador, y (c) representa la formación de una red de gel cuando se alcanza el punto de gelificación. Se puede decir que la viscosidad es (a) < (b) < (c). (Søgaard, 2018)

Resultados:

- Se identificó que tanto NaCl como CaCl₂ son efectivos para inducir la gelificación de la sílice coloidal. CaCl₂, en particular, permite una gelificación más rápida y a menores concentraciones en comparación con NaCl.
- El proceso de gelificación es más eficiente en condiciones de pH moderado y temperaturas elevadas, lo que facilita el control del tiempo de gelificación y mejora la resistencia del gel.
- Los geles formados con sales presentan propiedades mecánicas robustas, lo que los hace adecuados para aplicaciones geotécnicas como la estabilización de suelos y la prevención de filtraciones de agua.

Este estudio es especialmente relevante para la investigación actual ya que:

- **Uso de Sales como Aceleradores:** Confirma la efectividad del uso de sales como NaCl y CaCl₂ para controlar y optimizar la gelificación del Ludox, alineándose con el enfoque de este trabajo sobre la combinación de sílice coloidal y sales para mejorar la estabilidad de suelos arenosos.
- **Efecto del pH y la Temperatura:** Destaca la importancia de ajustar el pH y la temperatura para optimizar la gelificación, lo que puede aplicarse para mejorar la penetración y consolidación del Ludox en aplicaciones superficiales sobre suelos.

- **Control del Tiempo de Gelificación:** Los resultados refuerzan la idea de que el control del tiempo de gelificación es crucial para aplicaciones prácticas, lo cual es directamente aplicable en la validación de los tiempos de curado de 7 y 14 días que se evalúan en este trabajo.

En conclusión, este artículo proporciona un marco teórico sobre los procesos químicos y las variables que afectan la gelificación de la sílice coloidal, ofreciendo conocimientos que mejoran la comprensión y optimización del uso de Ludox y sales para la estabilización de suelos en proyectos de ingeniería civil.

4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

"La investigación es crear nuevo conocimiento"

- Neil Armstrong -

Los ensayos han sido realizados en los laboratorios del departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla

Para la realización de los ensayos experimentales se ha utilizado un edómetro de la empresa Mecánica Científica, utilizando anillos de 50mm de diámetro para los ensayos principales y anillos de 70mm para los ensayos secundarios.

Como materia prima de los ensayos se ha utilizado Ludox TM-50 Coloidal Silica (disolución de partículas de Sílice Coloidal al 50% en peso) y dos disoluciones, una de NaCl (2M) y otra de CaCl₂ (2M) utilizadas como activador para acelerar la gelificación del ludox.

La arena que se ha utilizado en este ensayo tiene una humedad óptima de compactación de 10%, y una densidad seca máxima de 1.68g/cm³. La curva granulométrica de la arena se muestra en la siguiente foto.

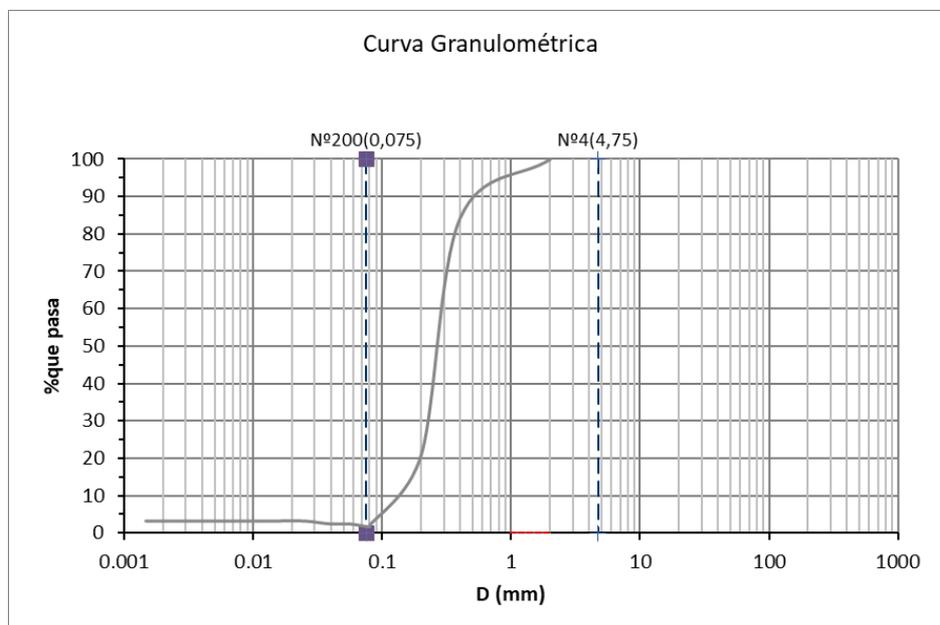


Fig. 5. Curva granulométrica de la arena utilizada.

Para la preparación de las muestras para los anillos de 50mm, se ha comenzado partiendo por una muestra de arena completamente seca, a la cual se le ha agregado agua hasta alcanzar su humedad óptima (10%) según el ensayo del Proctor, en este caso un 10%, para posteriormente compactar esa mezcla a un 80% de su densidad máxima seca (1.68g/cm^3) según el ensayo del Proctor. Obteniendo así, una pastilla formada por 51.31g de arena seca y 5.13g de agua, obteniendo así una densidad de (1.34g/cm^3 , un 80% de su densidad óptima (1.68g/cm^3), a esta pastilla le llamo pastilla de suelo húmedo. Una vez compactada la muestra, se le vierte con una pipeta a la muestra el gel, dicho gel está compuesto por Ludox y una determinada cantidad de solución de NaCl (2M) y CaCl_2 (2M) que varía desde el 0% en peso de la pastilla de suelo húmedo y el 4%, se utiliza una relación 5:1 para las cantidades suelo húmedo y ludox, de manera que el gel se compone por 11.29g de ludox más el agregado extra de solución de sales. Estas muestras se mantienen curando envueltas para no perder humedad durante 72h.



Fig. 6. Muestras ensayadas, donde en A) se observa la muestra a ensayar tras aplicarle la mezcla de Ludox y NaCl, en B) se observa la muestra tras el proceso de secado en el horno y en C) se observa la muestra tras retirarle el anillo, donde se aprecia que el resultante es homogéneo.

Para los anillos de 50mm se preparan las siguientes muestras:

Muestra
Pastilla de suelo húmedo
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 0.5%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 1%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 1.5%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 2%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 4%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + CaCl_2 0.25%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + CaCl_2 0.125%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + CaCl_2 0.0625%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + CaCl_2 0.01%)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + CaCl_2 0.03125%)

Tabla 1. Lista de muestras preparadas y ensayadas en el edómetro con anillos de diámetro 50mm.

Para la preparación de las muestras para los anillos de 70mm, se ha comenzado partiendo por una muestra de arena completamente seca, a la cual se le ha agregado agua hasta alcanzar su humedad óptima según el ensayo del Proctor, en este caso un 10%, para posteriormente compactar esa mezcla a un 80% de su densidad óptima según el ensayo del Proctor Normal. Obteniendo así, una pastilla formada por 103.13g de arena seca y 10.31g

de agua, obteniendo así una densidad de 1.34g/cm^3 , un 80% de su densidad óptima (1.68g/cm^3), a esta pastilla le llamo pastilla de suelo húmedo. Una vez compactada la muestra, se le vierte con una pipeta a la muestra el gel, dicho gel está compuesto por Ludox y una cantidad de solución de NaCl (2M) al 4% en peso con respecto a la pastilla húmeda, se utiliza una relación 5:1 para las cantidades suelo húmedo y ludox, de manera que el gel se compone por 22.69g de ludox más 4.54g de NaCl (2M). A diferencia del ensayo anterior, en el cual varía la cantidad de sal encargada de acelerar la gelificación del Ludox, en este ensayo esa cantidad se mantiene fija, y lo que varía es el tiempo de duración del curado de dicho gel, estas muestras se mantienen curando 7 y 14 días respectivamente, con el fin de observar los efectos de un mayor tiempo de curado. Para los anillos de 70mm se preparan las siguientes muestras:

Muestra
Pastilla de suelo húmedo
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 4%) (Curado durante 7 días)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox + NaCl 4%) (Curado durante 14 días)

Tabla 2. Lista de muestras preparadas y ensayadas en el edómetro con anillos de diámetro 70mm.

Se han realizado dos tipos de ensayos edométricos con diferentes objetivos:

1. Ensayos sin inundación de la muestra:

- Se utilizan anillos de 50 mm de diámetro.
- Su objetivo es determinar la cantidad óptima de solución salina necesaria para agregar al *Ludox*.
- Se realizan con un tiempo de curado de 72 horas.

2. Ensayos con inundación de la muestra:

- Se emplean anillos de 70 mm de diámetro.
- Su propósito es evaluar el posible efecto de colapso en muestras saturadas.
- Se varían los tiempos de curado para analizar su influencia en la estabilidad de la muestra.

Para mejorar la comprensión de estos ensayos, se recomienda incluir una tabla resumen con las características de cada uno, indicando variables como el diámetro del anillo, la presencia o ausencia de inundación, el tiempo de curado y el objetivo específico de cada ensayo.

Ensayo Edométrico No Inundado (Anillo 50mm)	Ensayo Edométrico Inundado (Anillo 70mm)
Pastilla de suelo húmedo	Pastilla de suelo húmedo
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox)	Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 4%)(Curado durante 7 días)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 0.5%)	Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 4%)(Curado durante 14 días)
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 1%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 1.5%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 2%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 4%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+CaCl 0.25%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+CaCl 0.125%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+CaCl 0.0625%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+CaCl 0.1%)	
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+CaCl 0.03125%)	

Tabla 3. Lista de ensayos realizados.

En los ensayos edométricos, se cargará la muestra de manera que se le aplicarán 5 escalones de carga, de 10kPa, 50kPa, 100kPa, 500kPa y 1000kPa

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

"La medición es el primer paso que conduce al control y, finalmente, a la mejora"

- H. James Harrington -

En este apartado se presentan y analizan en profundidad los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados en el marco de este trabajo de fin de grado. La metodología experimental seguida se ha detallado en secciones anteriores y ha sido diseñada con el objetivo principal de evaluar la efectividad de las técnicas implementadas para la mejora del terreno mediante el uso de sílice coloidal Ludox y activadores salinos.

Se han realizado mediciones y pruebas que han permitido recopilar datos fundamentales para identificar tendencias, comportamientos y mejoras potenciales en el tratamiento de suelos arenosos. Estas pruebas se enfocan en variables clave como la variación de índice de poros, módulo edométrico y el índice de compresibilidad de las muestras tratadas bajo diferentes condiciones de carga. También, se ha prestado atención a la capacidad de infiltración de las soluciones de Ludox en el terreno, ya que este factor es importante en la efectividad del tratamiento.

Los ensayos demostraron que la infiltración de la solución de Ludox variaba significativamente en función de la concentración de los activadores empleados. Se observó que en determinadas concentraciones (como 4% de NaCl y 0.25% de CaCl₂) la infiltración era prácticamente nula debido a una rápida gelificación. Sin embargo, en el resto de las configuraciones experimentales, la infiltración alcanzó el 100%, permitiendo una buena distribución del tratamiento dentro del suelo.

El análisis de los datos recopilados permitió observar que la rigidez y la compresibilidad del terreno tratado en algunos casos aumentó de manera significativa en comparación con el suelo no tratado, lo que indica que el tratamiento con Ludox y activadores salinos contribuyó a una mayor estabilidad del terreno. Este efecto es particularmente beneficioso en aplicaciones donde se requiere mejorar la capacidad portante del suelo, como en cimentaciones y estructuras de infraestructura.

En conclusión, los ensayos realizados confirman la eficacia del uso de sílice coloidal Ludox combinado con activadores salinos para la mejora de suelos arenosos. Se ha demostrado que este tratamiento no solo mejora la rigidez y reduce la compresibilidad del terreno, sino que también modula la infiltración y disminuye el índice de hinchamiento, lo que lo convierte en una opción viable para la estabilización de suelos en diferentes aplicaciones de ingeniería civil.

A continuación, se presentan los resultados organizados en función de las variables estudiadas y los métodos aplicados, proporcionando una visión detallada del impacto de los tratamientos en el comportamiento del suelo y estableciendo una base para futuras investigaciones en este ámbito.

5.1 Ensayo no inundado con muestras de diámetro 50mm

En este apartado se presentan y se analizan los resultados de los ensayos realizados en pastillas de arena de 50 mm de diámetro tratadas con geles de Ludox activados con soluciones salinas de NaCl (2M) y CaCl₂ (2M). Los ensayos edométricos no inundados se llevaron a cabo bajo una serie de escalones de carga de 10 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 500 kPa y 1000 kPa, lo que ha permitido evaluar la respuesta del suelo tratado frente a diferentes niveles de compresión.

El análisis se centra en identificar cómo las diferentes concentraciones de sales influyen en la rigidez, la compresibilidad y el comportamiento general del suelo bajo carga. Los resultados obtenidos proporcionan una visión de la efectividad de cada tratamiento, permitiendo comparar el rendimiento de las muestras tratadas con las condiciones de referencia no tratadas.

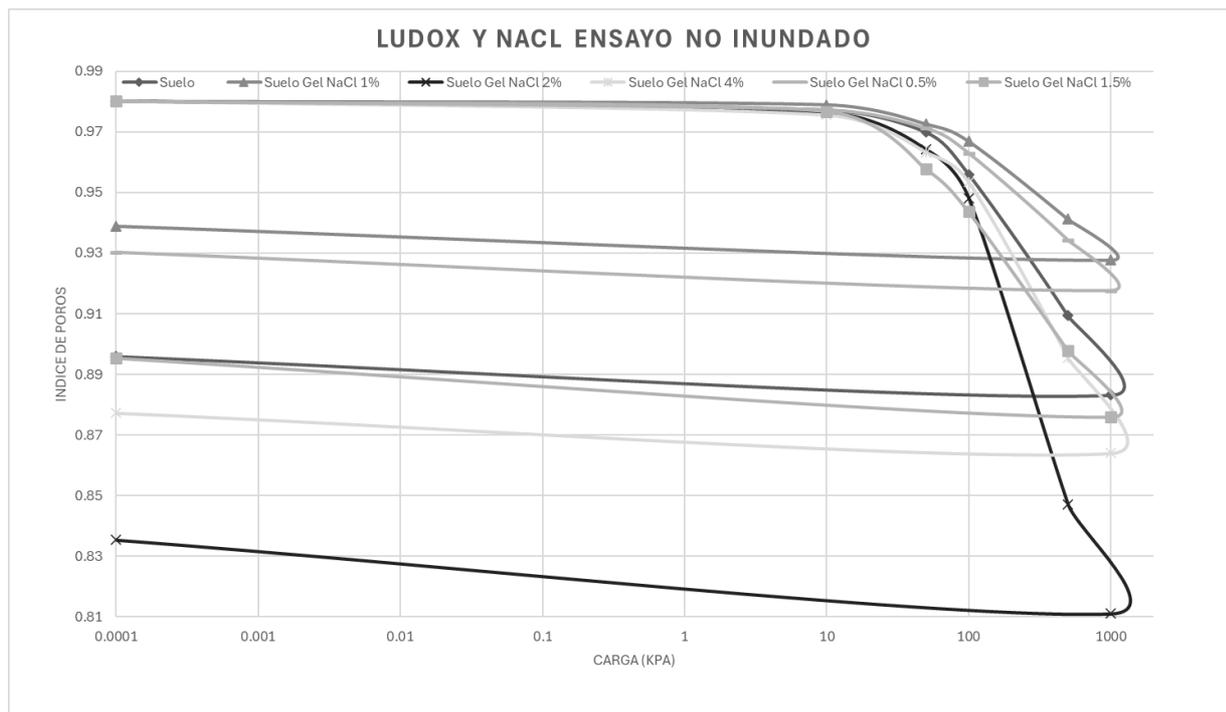


Fig. 7. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox y diferentes concentraciones de NaCl.

Como se observa en la Figura 7, el tratamiento de muestras de suelo con Ludox y NaCl mejora significativamente la rigidez del terreno, especialmente en aquellas muestras con concentraciones de solución salina de NaCl del 0.5% y 1% en peso. Estas concentraciones óptimas permiten obtener un incremento del índice de poros mucho menor en cada escalón de carga en comparación con las muestras no tratadas, lo que se traduce en una mayor estabilidad y menor deformación del suelo bajo compresión. Sin embargo, al aumentar la concentración de NaCl por encima del 1%, se observa un empeoramiento del comportamiento mecánico de las muestras, siendo incluso inferior al de los suelos sin tratar.

Ensayo Edométrico No Inundado (Anillo 50mm)	Índice de Compresión	Módulo Edométrico (MPa)
Pastilla de suelo húmedo	0.072769678	16.985138
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 0.5%)	0.045366019	25.23659306
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 1%)	0.039143758	29.09090909
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 1.5%)	0.067732521	15.87301587
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 2%)	0.137069825	7.380073801
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 4%)	0.089350456	12.8

Tabla 4. Índice de compresión y módulo edométrico en muestras con NaCl.

En las siguientes gráficas podemos observar la variación del índice de compresión de la arena estudiada y su módulo edométrico con respecto a la variación del porcentaje de NaCl.

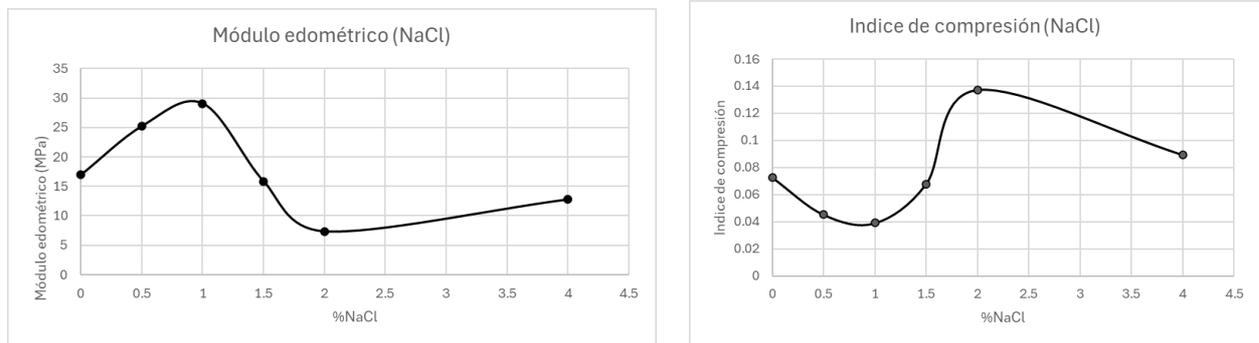


Fig. 8. Índice de compresión y módulo edométrico en función del %NaCl

En relación con el índice de compresión y módulo edométrico, las muestras con contenidos de sal de 0.5% y 1% presentan los mejores resultados, mostrando una reducción notable en la compresibilidad del suelo. No obstante, en las muestras con un 2% de NaCl, el índice de compresión aumenta considerablemente, lo que indica una pérdida de eficiencia del tratamiento. En cuanto al índice de entumecimiento, todas las muestras presentan valores similares, excepto en la muestra con un 2% de NaCl, que muestra un índice de hinchamiento más elevado que el resto, indicando un comportamiento adverso a altas concentraciones de sal.

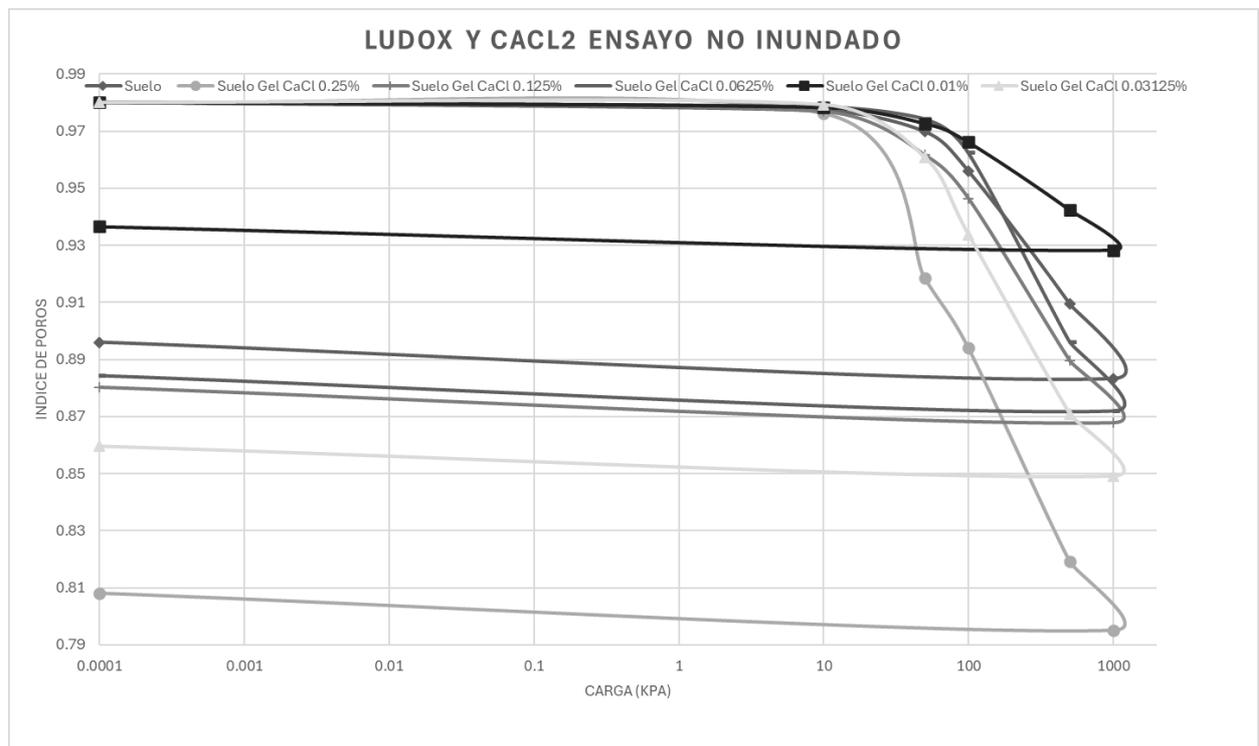


Fig. 9. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox y diferentes concentraciones de $CaCl_2$

En la Figura 9, se evidencia un aumento de la rigidez en muestras de suelo tratadas con Ludox y CaCl_2 , pero solo a concentraciones de CaCl_2 del 0.01% en peso. En concentraciones superiores, el comportamiento de las muestras tratadas es menos favorable que el de las muestras no tratadas, lo cual es un fenómeno similar al observado en los suelos tratados con NaCl , aunque con concentraciones de sales significativamente más bajas. Esto se debe a que el CaCl_2 posee una capacidad de activación de las partículas de sílice mucho mayor que el NaCl . Por ejemplo, las muestras tratadas con un 0.01% de CaCl_2 (2M) presentan un comportamiento mecánico comparable al de las muestras tratadas con un 1% de NaCl (2M), es decir, se requiere una cantidad de CaCl_2 cien veces menor para lograr un efecto similar.

Ensayo Edométrico No Inundado (Anillo 50mm)	Índice de Compresión	Módulo Edométrico (MPa)
Pastilla de suelo húmedo	0.072769678	16.985138
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+ CaCl 0.25%)	0.098872592	9.791921665
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+ CaCl 0.125%)	0.078535724	12.7388535
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+ CaCl 0.0625%)	0.090499052	11.42857143
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+ CaCl 0.03125%)	0.084499152	11.54401154
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+ CaCl 0.01%)	0.037803235	30.07518797

Tabla 5. Índice de compresión y módulo edométrico en muestras con CaCl_2

En las siguientes gráficas podemos observar la variación del índice de compresión de la arena estudiada y su módulo edométrico con respecto a la variación del porcentaje de NaCl .

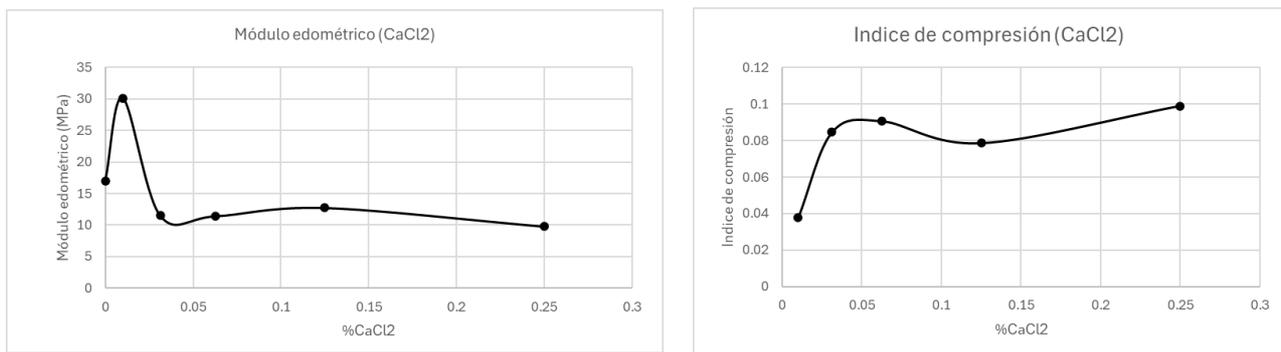


Fig. 10. Índice de compresión y módulo edométrico en función del % CaCl_2

Con respecto al índice de compresión y módulo edométrico, los suelos con un 0.01% de CaCl_2 muestran los mejores resultados, con una notable reducción en la compresibilidad. Sin embargo, en muestras con un 0.25% de CaCl_2 , el índice de compresión se incrementa, sugiriendo una pérdida de efectividad en el tratamiento a mayores concentraciones. En cuanto al índice de hinchamiento, se observa un comportamiento uniforme en la mayoría de las muestras, excepto en aquellas con un 0.25% de CaCl_2 , donde el índice de hinchamiento es considerablemente más alto, lo que indica una posible desventaja a esas concentraciones.

Tanto en los ensayos realizados con NaCl como en los de CaCl_2 se observa como el suelo actúa muy bien con una determinada cantidad de sal, pero si no es la óptima el hecho de agregar gel al terreno hace que este empeore su comportamiento, obteniendo resultados desfavorables comparados con la situación inicial del terreno antes de aplicarle alguna solución.

Curvas edométricas para muestras tratadas con Ludox y distintas concentraciones de NaCl y CaCl₂

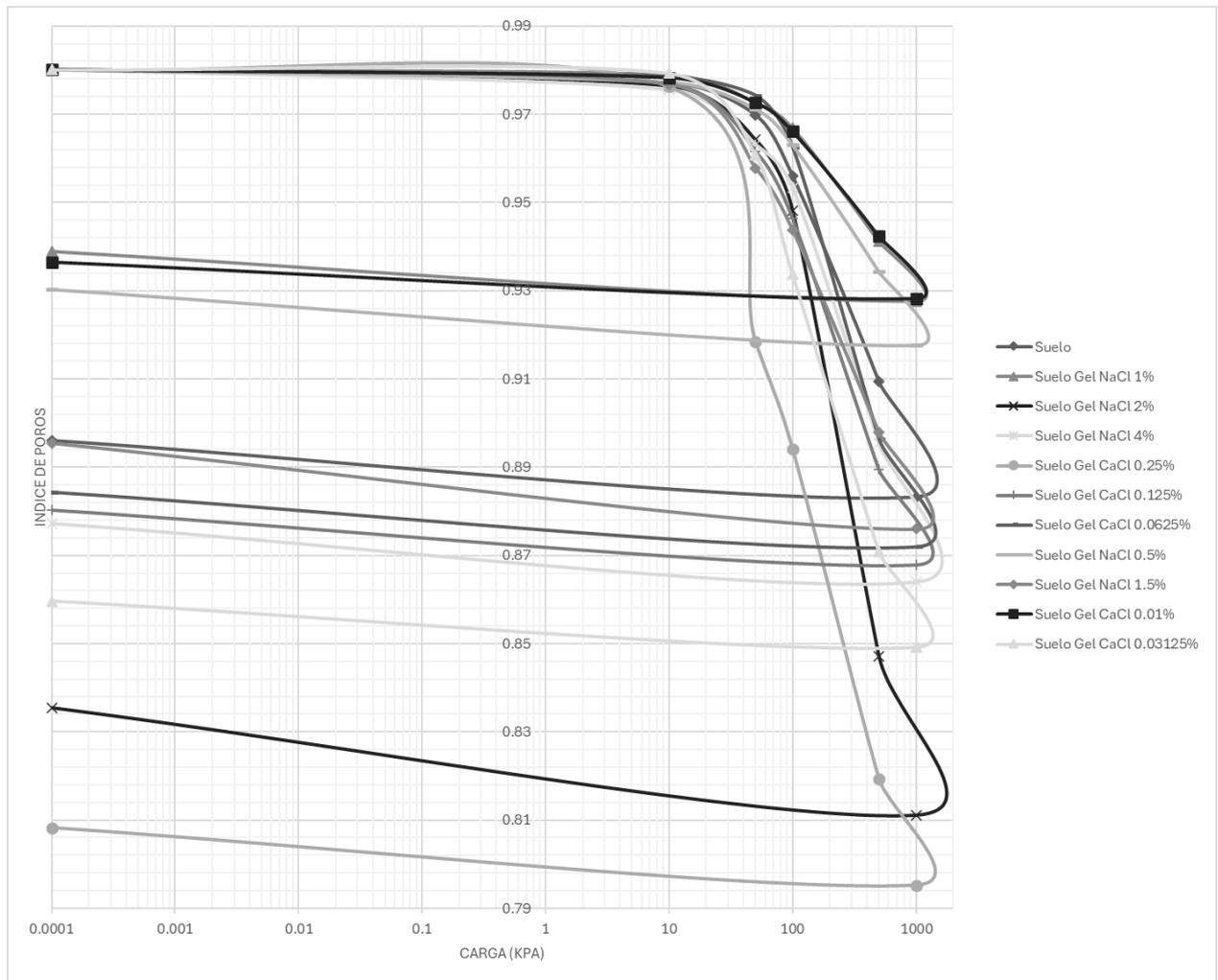


Fig. 11. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox y diferentes concentraciones de NaCl y CaCl₂

En esta figura se presentan las curvas de consolidación edométrica obtenidas para muestras de arena tratadas con Ludox y diferentes concentraciones de NaCl y CaCl₂. Se observa que el índice de poros disminuye conforme aumenta la carga aplicada, con variaciones notables entre las distintas concentraciones de sales.

Las muestras tratadas con Ludox y NaCl muestran una mayor resistencia a la disminución del índice de poros en algunos casos, especialmente en concentraciones de 1 % y 1.5 %, lo que indica una mayor compactación y rigidez. Sin embargo, a concentraciones más altas de NaCl (4 %), la reducción del índice de poros ya no muestra mejoras significativas, sugiriendo que concentraciones superiores a 1.5 % no aportan un beneficio adicional en términos de consolidación.

En cuanto a las muestras tratadas con CaCl₂, se observa una respuesta dependiente de la concentración. Las concentraciones más bajas de CaCl₂ (0.03125 % y 0.01 %) resultan en una mayor resistencia a la reducción del índice de poros, lo que sugiere que el calcio tiene un efecto más pronunciado sobre la compactación del suelo en comparación con concentraciones intermedias (0.125 % y 0.25 %), donde la compactación es menos eficiente.

En resumen, los resultados reflejan que la adición de Ludox junto con sales mejora la consolidación del suelo, siendo la concentración óptima de NaCl de 1 % y la de CaCl₂ de 0.01 %, ya que proporcionan mejores resultados. Las concentraciones más altas de NaCl y CaCl₂ tienden a mostrar menos eficacia, lo que indica que un exceso de sal puede tener efectos no deseados en la estructura del suelo.

5.2 Ensayo inundado con muestras de diámetro 70mm

En este apartado se muestran y se analizan los resultados de los ensayos realizados a la pastilla de arena de 70mm de diámetro con geles de Ludox activados con una solución salina al 4% en peso con respecto al suelo de NaCl (2M) ante un ensayo edométrico no inundado bajo escalones de carga, de 10kPa, 50kPa, 100kPa, 500kPa y 1000kPa.

Para este ensayo se ha tomado un 4% en peso de solución salina ya que esta es la cantidad máxima de sales utilizada en estos ensayos que admite el Ludox antes de gelificar de manera repentina.

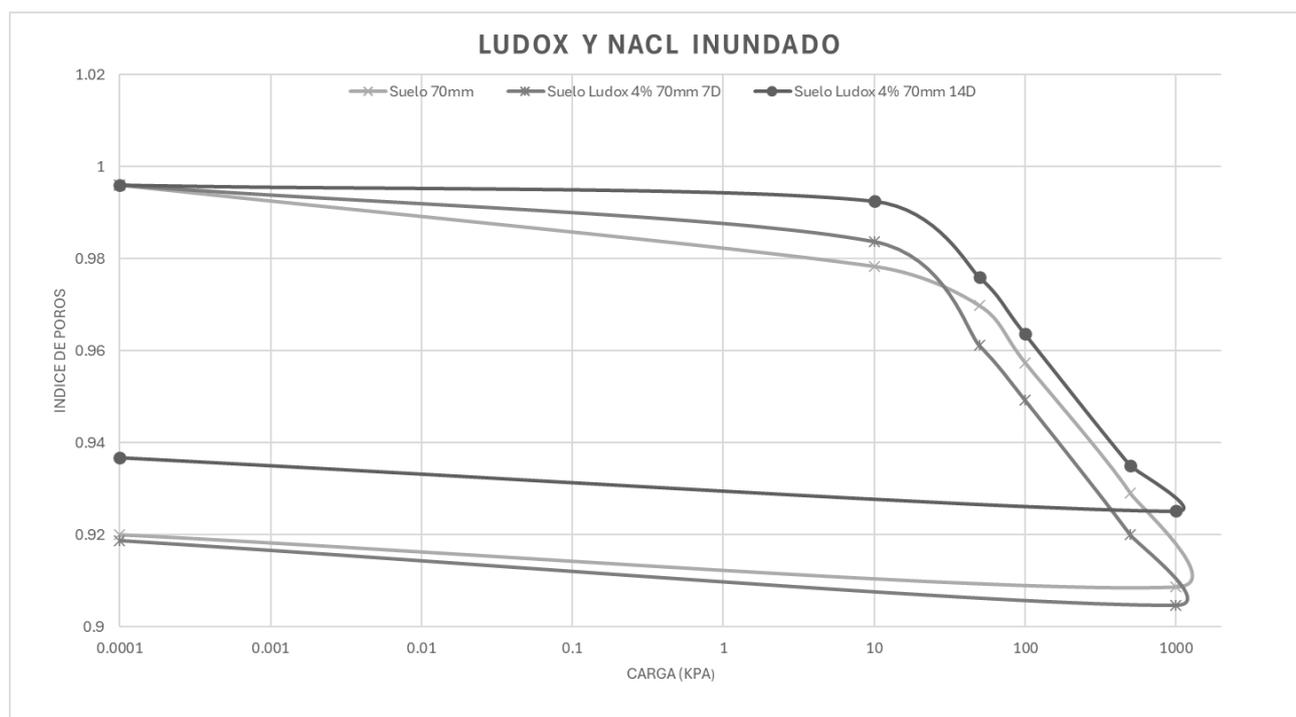


Fig. 12. Ensayo edométrico en muestra de arena con Ludox Inundado

La Figura 7 muestra los resultados de los ensayos de muestras tratadas con Ludox y NaCl al 4% en peso bajo condiciones de inundación. En la gráfica, se destaca que la muestra tratada y curada durante 7 días no presenta mejoras sustanciales en el comportamiento del suelo. Sin embargo, la muestra curada durante 14 días demuestra una mejoría notable en el índice de compresibilidad, indicando que un curado más prolongado es esencial para mejorar la respuesta mecánica del terreno.

Ensayo Edométrico Inundado (Anillo 70mm)	Índice de Compresión	Módulo Edométrico (MPa)
Pastilla de suelo húmedo	0.04870294	36.8852459
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 4%)(Curado durante 7 días)	0.044699342	36.36363636
Pastilla de suelo húmedo + Gel (Ludox+NaCl 4%)(Curado durante 14 días)	0.038560356	40

Tabla 6. Índice de compresión y módulo edométrico en muestras con NaCl (ensayo inundado)

Estos resultados sugieren que un tiempo de curado de 7 días no es suficiente para las muestras tratadas con Ludox y NaCl al 4% en peso, particularmente cuando el suelo estará expuesto a cargas en ambientes húmedos o por debajo del nivel freático. Además, se observa que el índice de hinchamiento se mantiene similar en los tres ensayos, lo que subraya la importancia del tiempo de curado en la eficacia del tratamiento del suelo bajo condiciones de saturación.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

"El verdadero viaje de descubrimiento no consiste en buscar nuevos paisajes, sino en mirar con nuevos ojos."

- Marcel Proust -

Conclusiones

El análisis comparativo realizado en este estudio ha permitido identificar con precisión los efectos del tratamiento con sílice coloidal Ludox y activadores salinos en la mejora del comportamiento mecánico de los suelos arenosos. A partir de los resultados obtenidos, se han establecido conclusiones fundamentales que proporcionan una visión detallada sobre la efectividad del tratamiento y sus implicaciones en aplicaciones de ingeniería civil.

En primer lugar, se ha constatado que el tratamiento mejora significativamente la rigidez y estabilidad del suelo, reduciendo su compresibilidad y aumentando su capacidad portante. Esto es especialmente relevante en contextos donde se requiere una mayor resistencia estructural, como en cimentaciones o infraestructuras de carga. Las muestras tratadas con concentraciones óptimas de activadores han demostrado un refuerzo más sólido, lo que sugiere que la dosificación adecuada de estos compuestos es un factor clave en la optimización del tratamiento.

Otro hallazgo importante es la variabilidad en la infiltración del tratamiento según la concentración de activadores. Se ha observado que, si bien concentraciones bajas favorecen una distribución homogénea del Ludox dentro del suelo, concentraciones excesivamente altas pueden generar una gelificación instantánea que limita la penetración y distribución uniforme del tratamiento. Este aspecto subraya la necesidad de establecer rangos óptimos de concentración para garantizar una mejora eficaz sin comprometer la aplicabilidad del método.

En términos prácticos, los resultados obtenidos sugieren que el uso de sílice coloidal Ludox combinado con activadores salinos podría representar una alternativa eficiente y sostenible frente a otros métodos tradicionales de estabilización de suelos. La posibilidad de ajustar las concentraciones según las necesidades específicas del terreno y las condiciones ambientales amplía el rango de aplicación del tratamiento, haciendo que pueda adaptarse a distintos escenarios constructivos.

En conclusión, este estudio ha demostrado la efectividad del tratamiento en la mejora de suelos arenosos, proporcionando un marco de referencia para futuras investigaciones que busquen optimizar aún más su aplicación. Se recomienda continuar explorando la influencia de otros factores como el tiempo de curado, la humedad relativa y la interacción con otros materiales, con el fin de maximizar los beneficios de esta tecnología en el ámbito de la ingeniería geotécnica y estructural.

Líneas de Trabajo Futuro

Para futuras investigaciones, es recomendable ampliar el estudio a otros tipos de suelos, como arcillas y suelos limosos, para evaluar la efectividad del Ludox en diferentes contextos geotécnicos y determinar si los beneficios observados en suelos arenosos se replican en otros tipos de terrenos. También es relevante investigar la combinación de Ludox con otras sales y aditivos, como sulfatos o fosfatos, para optimizar aún más las propiedades mecánicas del suelo tratado y mejorar la eficiencia del proceso de gelificación, lo que puede resultar en un mayor control de la estabilidad y la resistencia a largo plazo.

Una línea de trabajo clave es realizar pruebas a mayor escala y en condiciones de campo que permitan validar los resultados obtenidos en el laboratorio, que aseguren la aplicabilidad práctica de la sílice coloidal en proyectos de ingeniería civil. Estos ensayos a gran escala también permitirían monitorizar el comportamiento a largo plazo de los suelos tratados, evaluando su durabilidad, resistencia a la erosión y comportamiento bajo condiciones de carga cíclica, como las provocadas por terremotos o tráfico pesado.

Además, un aspecto que requiere atención es el estudio de la infiltración del Ludox en el terreno desde que se vierte por su superficie. Este proceso no solo influye en la distribución y la penetración del gel dentro del suelo, sino que también afecta directamente a la efectividad de la estabilización superficial de taludes y otras estructuras geotécnicas.

El estudio de la infiltración debe considerar varias variables, como la viscosidad del Ludox, la granulometría y permeabilidad del suelo, y las condiciones de humedad inicial del terreno. Se debería analizar cómo la solución de sílice coloidal se desplaza vertical y lateralmente en el suelo, la velocidad a la que penetra, y la profundidad a la que puede alcanzar antes de gelificar. Este conocimiento permitirá desarrollar modelos predictivos de la infiltración y distribuir correctamente las cantidades de Ludox necesarias para asegurar una cobertura adecuada y eficiente del área tratada.

Asimismo, es importante investigar cómo las condiciones ambientales, como la temperatura y la presencia de agua subterránea, afectan el proceso de gelificación y la infiltración del Ludox. Experimentos de campo que simulen la aplicación en pendientes y taludes reales podrían proporcionar información sobre la capacidad del Ludox para formar barreras estables y cohesionadas en la superficie del suelo, lo cual es crucial para aplicaciones de estabilización de taludes y control de erosión.

Finalmente, se recomienda explorar el impacto de la variabilidad en la concentración de sales y la proporción de Ludox utilizado en la infiltración, lo que puede influir significativamente en la eficiencia del proceso. Comprender cómo estos factores afectan la capacidad de la sílice coloidal para penetrar y estabilizar el suelo permitirá afinar los protocolos de aplicación y maximizar los beneficios de su uso en ingeniería geotécnica. Estos estudios ayudarán a desarrollar soluciones más sostenibles y efectivas para la estabilización de suelos en diferentes escenarios de construcción y mantenimiento de infraestructuras.

REFERENCIAS

- Wong, C., Pedrotti, M., Gráinne El Mountassir and Rebecca J. Lunn. (2018). A study on the mechanical interaction between soil and colloidal silica gel for ground improvement. C. Wong et al. *Engineering Geology* 243 (2018) 84-100. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.011>
- Sögaard, C., Funehag, J. and Abbas, Z. (2018). Silica sol as grouting material: a physio-chemical analysis. *Nano Convergence*. Sögaard et al. *Nano Convergence*. <https://doi.org/10.1186/s40580-018-0138-1>
- Pedrotti, M.T.A., 2018. Effective stresses for unsaturated states stemming from an experimental investigation into the microstructure of unsaturated clay. *Geomechanics for Energy and Environment*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gete.2018.03.003>.
- Norma UNE-EN ISO 17892-5:2019, Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 5: Ensayo edométrico de carga incremental. (ISO 17892-5:2017).