

ARTÍCULO ORIGINAL**Efecto del hidróxido de calcio y nanosílice en propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos**

The effect of calcium hydroxide and nanosilica on the physical and mechanical properties of clay soils

Jorge Trigoso 

RESUMEN

Los suelos arcillosos presentan baja capacidad portante, alta sensibilidad al agua y limitada resistencia mecánica, condiciones que restringen su uso en infraestructura vial. En este contexto, el hidróxido de calcio y la nanosílice representan alternativas de estabilización química por su capacidad de modificar la matriz arcillosa y favorecer la formación de compuestos cementantes. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del hidróxido de calcio y la nanosílice en las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos de Lambayeque. Se realizaron tres calicatas en el sector Pampa El Toro, distrito de Tumán, provincia de Chiclayo, seleccionándose el suelo más desfavorable para los ensayos. Se elaboraron mezclas con 3.00%, 5.00% y 9.00% de hidróxido de calcio, así como combinaciones de 9.00% de hidróxido de calcio con 2.00%, 5.00% y 7.00% de nanosílice. Las muestras fueron evaluadas mediante Proctor modificado, CBR y compresión no confinada. La mezcla 9CH:5NS presentó el mejor desempeño, con CBR de 17.70% y 21.50% al 95% y 100% de compactación, respectivamente, y una resistencia de 13.50 kg/cm² a 28 días. El análisis estadístico confirmó mejoras significativas, evidenciando su viabilidad como alternativa para estabilización de subrasantes en condiciones arcillosas locales con potencial aplicación en proyectos viales regionales sostenibles.

Palabras clave: Estabilización, hidróxido de calcio, nanosílice, suelos arcillosos

ABSTRACT

Clay soils have low bearing capacity, high sensitivity to water and limited mechanical strength, conditions which restrict their use in road infrastructure. In this context, calcium hydroxide and nanosilica represent alternatives for chemical stabilisation due to their ability to modify the clay matrix and promote the formation of cementitious compounds. The aim of this study was to evaluate the effect of calcium hydroxide and nanosilica on the physical and mechanical properties of clay soils from Lambayeque. Three test pits were excavated in the Pampa El Toro area, Tumán district, Chiclayo province, and the least favourable soil was selected for the tests. Mixtures were prepared containing 3.00%, 5.00% and 9.00% calcium hydroxide, as well as combinations of 9.00% calcium hydroxide with 2.00%, 5.00% and 7.00% nanosilica. The samples were evaluated using the modified Proctor test, CBR and unconfined compression tests. The 9CH:5NS mixture performed best, with CBR values of 17.70% and 21.50% at 95% and 100% compaction, respectively, and a strength of 13.50 kg/cm² at 28 days. The statistical analysis confirmed significant improvements, demonstrating its viability as an alternative for sub-base stabilisation in local clayey conditions, with potential application in sustainable regional road projects.

Keywords: Stabilisation, calcium hydroxide, nanosilica, clay soils

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Cesar Vallejo de Chiclayo, Perú. Email: jtrigosoec@ucvvirtual.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La ingeniería geotécnica continuó avanzando en respuesta a las crecientes demandas de la infraestructura moderna, debido a que los proyectos aumentaron en escala y complejidad; por ello, la mejora de los suelos naturales se volvió esencial para garantizar estabilidad estructural, durabilidad y capacidad de carga (Diab et al., 2026). Asimismo, la arcilla presentó dificultades por su capacidad de retener agua, su comportamiento cohesivo y sus limitaciones en resistencia mecánica, permeabilidad, compresibilidad, tenacidad y plasticidad (Safi & Singh, 2022). En infraestructura vial, el tratamiento adecuado del suelo permitió prevenir erosión, asentamiento e inestabilidad; además, prolongó la vida útil de las carreteras y redujo los costos de mantenimiento (Khajeh et al., 2023). Por ello, la mejora del suelo buscó incrementar la resistencia al corte y la capacidad de soporte; asimismo, permitió minimizar la compresibilidad, los asentamientos y la susceptibilidad al lavado de partículas finas (Roshan et al., 2022).

La estabilización de suelos se presentó como una respuesta técnica orientada a mejorar el comportamiento de los materiales arcillosos. Los aditivos como el hidróxido de calcio (CH) o también llamado cal, por sus efectos puzolánicos, reaccionaron con los minerales arcillosos y produjeron mejoras en la resistencia del suelo y en la estabilidad volumétrica (Poyraz, 2026). En esa línea, el CH se consideró como un material relevante para mejorar el comportamiento del suelo, debido a sus características que lo hacen favorable como estabilizante (Utkarsh & Jain, 2024). Ahora bien, Babanas y Courcelles (2025), detallaron que, el ambiente alcalino ($\text{pH} \geq 12,4$), mantenido por la CH, disuelve la sílice y la alúmina de los bordes de las partículas de arcilla, lo que desencadena reacciones puzolánicas que producen compuestos cementantes como el silicato de calcio hidratado y el aluminato de calcio hidratado. Por otro lado, Diniz et al. (2024), informaron que, el CH presentó un 0.70% de humedad y una masa específica de 0.40 g/cm^3 , lo que mostró un producto ligero y de reactividad importante. En el análisis granulométrico, no retuvo material en el tamiz N.º 28 y solo retuvo 0.21% en el tamiz N.º 200, confirmando una fineza muy alta; en conjunto, estos resultados describieron un CH de buena pureza y adecuada calidad para su uso en aplicaciones de estabilización.

Asimismo, la nanosílice (NS) adquirió relevancia dentro del mejoramiento de suelos porque su composición química estuvo conformada principalmente por SiO_2 en un 99,35 %, lo que explicó su interés en procesos asociados a materiales cálcicos (Praveen Kumar & Dey, 2023). Cao et al. (2023), indicaron que este material presentó un diámetro medio de grano de 20 nm, pureza igual o superior a 99.8%, área específica de $200 \text{ m}^2/\text{g}$, densidad aparente de 0.05 gr/cm^3 , color blanco y forma de polvo granular esférico. De manera complementaria, Farjad et

al. (2025), reportaron una composición con 99.90% de SiO_2 , además de proporciones menores de Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O y K_2O . Estas características permitieron comprender que su elevada pureza, finura y composición rica en sílice pudieron favorecer su interacción dentro de matrices estabilizadas. En este contexto, el desarrollo de materiales alternativos se ha convertido en una prioridad para responder a las exigencias de la economía circular y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con producción responsable e innovación en infraestructura (Bonilla Bances et al., 2026).

Diversos estudios han mostrado que el uso del CH y NS mejora las propiedades físicas y mecánicas del suelo, tal como lo muestran, Novianto y Rochman (2023), quienes evaluaron el uso de cal en proporciones de 5.00%, 10.00%, 15.00% y 20.00% respecto al peso seco del suelo, determinando que la adición de 5.00% incrementó la máxima densidad seca (MDS) de 1.697 g/cm^3 a 1.775 g/cm^3 , lo que evidenció una mejora en el comportamiento de compactación. Asimismo, Sudjianto et al. (2025), analizaron el efecto del CH en proporciones de 0.00%, 5.00%, 10.00%, 15.00% y 20.00%, reportando que el suelo natural presentó una MDS de 1.180 g/cm^3 y un óptimo contenido de humedad (OCH) de 26.50%, mientras que con 20.00% de cal alcanzó una MDS de 1.315 g/cm^3 y un OCH de 25.67%.

Por otro lado, Tang et al. (2023), evaluaron contenidos de cal hidratada de 3.00%, 6.00% y 9.00%, observando que con 9.00% de cal el OCH aumentó de 9.20% a 10.90%, mientras que la MDS disminuyó de 2.13 g/cm^3 a 2.07 g/cm^3 . Además, el índice de capacidad portante (CBR) presentó un incremento de 215.00%, confirmando la eficiencia del CH para mejorar la capacidad portante del suelo. Del mismo modo, Waleed y Alshawmar (2025), evaluaron el efecto de la sílice en proporciones entre 3.00% y 12.00%, evidenciando que los estabilizadores disminuyeron la MDS, aumentaron el OCH y mejoraron la resistencia a la compresión no confinada (UCS) en 77.00% con 12.00% de sílice después de 28 días de curado.

En el contexto peruano, Chicaña (2022), analizó el comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado con 1.00% y 2.00% de NS, demostrando que la adición de 2.00% incrementó ocho veces la UCS y quince veces el CBR al 95.00% de la MDS, en comparación con el suelo natural. Estos hallazgos confirman la viabilidad técnica del CH y la NS como estabilizantes para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos.

En ese sentido, la presente investigación propone evaluar el efecto del hidróxido de calcio y la nanosílice en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos de Lambayeque, con el objetivo de determinar su influencia en la máxima densidad seca, el óptimo contenido de humedad, el índice de capacidad portante y la resistencia a la compresión no

confinada. De esta manera, se busca aportar evidencia científica que respalde el uso de estos estabilizantes como alternativa técnica para mejorar el comportamiento geotécnico de suelos arcillosos, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes en obras de infraestructura vial y geotecnia aplicada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Suelo

Se excavaron tres calicatas a cielo abierto en el sector Pampa El Toro, distrito de Tuman, provincia de Chiclayo, región Lambayeque, Perú, ubicadas geográficamente en las coordenadas 6°44'25.5"S y 79°41'48.0"W. Las muestras alteradas se extrajeron a una profundidad constante de 1.50 m. Tras la caracterización geotécnica completa en el laboratorio, se aplicó un criterio de selección riguroso enfocado en identificar el perfil de suelo más crítico y desfavorable para fines de pavimentación. La muestra de la Calicata C-02 fue seleccionada como el suelo patrón para la fase experimental debido a que registró el mayor Índice de Plasticidad ($IP=20\%$), el mayor contenido de finos que pasan el tamiz N° 200 (76.4%), la menor Densidad Máxima Seca ($MDS=1.856\text{g/cm}^3$) y las propiedades de soporte más deficientes ($CBR=3.0\%$ al 95% de la MDS). Las propiedades iniciales de las tres calicatas se detallan en la Tabla 1

Tabla 1
Características físicas y mecánicas del suelo natural

Prueba	Características	Normativa	Resultados		
			C-1	C-2	C-3
Profundidad (m)	1.50 m				
Distribución del tamaño de grano	Grava mayor a 4.75 mm (%)	ASTM D422 [40]	0.9	0.2	0.2
	Arena 0.075–4.75 mm (%)	ASTM D422 [40]	49.3	23.3	32.1
	Fino menor 0.075 mm (%)	ASTM D422 [40]	49.8	76.4	67.6
Tipo de suelo	Clasificación (SUCS)	ASTM D2487 [41]	SM	CL	CL
	Clasificación (AASHTO)		A-4	A-6	A-6
Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	ASTM D4318 [42]	32	40	38
	Límite plástico (%)		24	20	24
Pruebas de compactación	Densidad máxima seca (gr/cm^3)	ASTM D1557 [43]	1.941	1.856	1.891
	Contenido de humedad óptimo (%)	ASTM D1557 [43]	12.74	13.39	13.44

Prueba de resistencia				
Índice de soporte de California al 95% MDS (%)		11.5	3.0	5.2
	ASTM D1883 [44]			
Índice de soporte de California al 100% MDS (%)		13.5	4.8	6.3
UCS a los 7 días		-	7.80	-
UCS a los 14 días	ASTM D2166 [45]	-	8.90	-
UCS a los 28 días		-	9.74	-

Nota. Datos obtenidos de ensayos de laboratorio

Nanosílice

La nanosílice utilizada fue el producto GAIA Nanosílice, tal como se muestra en la Figura 1, suministrado por la empresa ULMEN S.A. – Aditivos para Concreto, ubicada en Villa El Salvador, Lima, Perú. Este aditivo se presentó como suspensión coloidal y fue seleccionado por su potencial reactivo en presencia de materiales cálcicos. El producto fue almacenado en recipientes herméticos, a temperatura controlada y protegido de la luz directa. Además, la nanosílice fue sometida a análisis químico de caracterización, de acuerdo con la norma ASTM E1621-16, con el fin de identificar su composición elemental y validar su adecuación técnica en el proceso de estabilización.

Figura 1
Nanosílice utilizado en la investigación



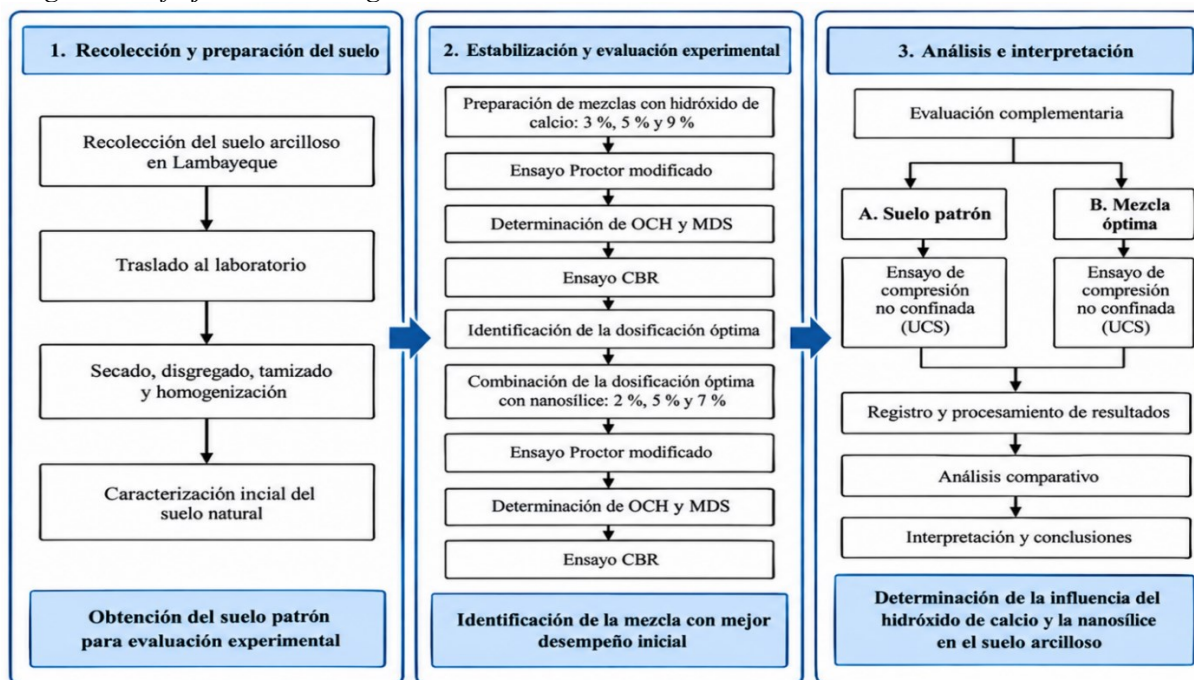
Hidróxido de calcio

El hidróxido de calcio utilizado fue adquirido de un proveedor comercial certificado y empleado como estabilizante químico del suelo arcilloso. Su incorporación se consideró debido a su capacidad para generar un medio alcalino favorable para las reacciones de estabilización, especialmente en presencia de materiales silíceos.

EL hidróxido de Calcio (CH): Suministrado en forma de polvo fino blanco e inodoro, con una densidad de 2.24g/mL y una finura donde el 98% de las partículas son menores a 90 micras. Su carácter fuertemente alcalino ($pH=12.4$) asegura la disolución de los compuestos silíceos del suelo arcilloso.

Métodos

La metodología empleada en esta investigación se desarrolló en tres fases, tal como se muestra en la Figura 2. La primera fase correspondió a la recolección y preparación del suelo arcilloso, la cual incluyó la extracción del material en Lambayeque, su traslado al laboratorio, secado, disgregado, tamizado y homogenización, con la finalidad de obtener el suelo patrón para la evaluación experimental. En la segunda fase se realizó la estabilización y evaluación experimental del suelo. Para ello, se prepararon mezclas con hidróxido de calcio en proporciones de 3.00%, 5.00% y 9.00% respecto al peso seco del suelo. Posteriormente, se ejecutaron los ensayos físicos y mecánicos, y a partir de estos resultados, se identificó la dosificación con mejor desempeño inicial, la cual fue combinada con nanosílice en proporciones de 2.00%, 5.00% y 7.00%.

Figura 2*Diagrama de flujo de la investigación*

Diseño Experimental y Distribución de la Muestra

La investigación adoptó un diseño experimental y enfoque cuantitativo. Para asegurar la validez de las tendencias físicas y mecánicas evaluadas, se preparó un total de 46 unidades experimentales (especímenes). Estas muestras se dividieron en 7 grupos de tratamiento específicos, elaborando 3 réplicas exactas para cada ensayo de propiedades mecánicas y durabilidad, tal como se describe en la nomenclatura de la Tabla 2.

Tabla 2*Nomenclatura, descripción de las mezclas y distribución de las unidades experimentales*

Grupo	Nomenclatura	Descripción del Tratamiento	Proctor Modif. (Ensayos)	Réplicas CBR (Especímenes)	Réplicas UCS (Especímenes)	Durabilidad Humedad-Secado
G0	US	Suelo Arcilloso Natural (Control)	1	3	3	6
G1	3CH	Suelo + 3.00% Hidróxido de Calcio	1	3	-	-
G2	5CH	Suelo + 5.00% Hidróxido de Calcio	1	3	-	-
G3	9CH	Suelo + 9.00% Hidróxido de Calcio (Dosis Óptima)	1	3	-	-

G4	9CH:2NS	Suelo + 9% Cal + 2.00% Nanosilice Líquida	1	3	-	-
G5	9CH:5NS	Suelo + 9% Cal + 5.00% Nanosilice (Mezcla Óptima)	1	3	3	6
G6	9CH:7NS	Suelo + 9% Cal + 7.00% Nanosilice Líquida	1	3	-	-
SUBTOTAL			7	21	6	12
TOTAL			46 unidades Experimentales			

Finalmente, en la tercera fase se efectuó el análisis e interpretación de resultados. Esta etapa incluyó una evaluación complementaria mediante el ensayo de UCS, considerando el suelo patrón y la mezcla óptima. Los resultados fueron registrados, procesados y comparados, con la finalidad de determinar la influencia del hidróxido de calcio y la nanosílice en las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso.

Ensayo Proctor modificado

Según ASTM D1557 [43], el ensayo Proctor modificado se realizó con la finalidad de determinar la MDS y el OCH del suelo natural y de las mezclas estabilizadas. Estos parámetros permitieron evaluar la influencia del cemento, hidróxido de calcio y nanosílice en el comportamiento de compactación del suelo arcilloso.

Ensayo CBR

Según la Norma ASTM D1883 [44], el CBR se determinó en muestras compactadas al 95% y 100% de la máxima densidad seca. Este ensayo permitió evaluar la resistencia del suelo natural y estabilizado frente a esfuerzos de penetración, considerando su posible aplicación como material de subrasante en obras de infraestructura vial.

Ensayo de compresión no confinada

Según la Norma ASTM D2166 [45], la UCS se evaluó en el suelo natural y en la mezcla estabilizada de mejor desempeño. Las probetas fueron ensayadas a diferentes edades de curado, con el objetivo de analizar la evolución de la resistencia mecánica generada por la acción de los estabilizantes en la matriz arcillosa.

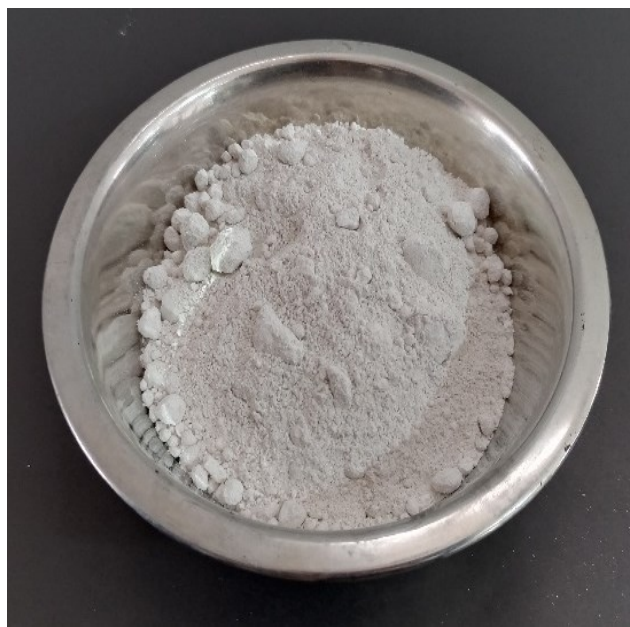
RESULTADOS

Propiedades físicas del hidróxido de calcio

El hidróxido de calcio empleado en este estudio como se muestra en la Figura 3 se caracterizó por presentar un aspecto de polvo blanco, seco e inodoro, con una alta finura, ya que el 98% de las partículas fueron menores a 90 micras, lo que favorece su dispersión en la matriz del suelo. Su densidad fue de 2.24 g/mL y la densidad a granel de 340 kg/m³, valores que indican una baja compactación del material en estado suelto. Asimismo, mostró una solubilidad de 1.6 g/L a 10 °C, comportamiento típico de este compuesto. En cuanto a su estabilidad térmica, la temperatura de descomposición fue de 580 °C, proceso en el cual se forma óxido de calcio y agua. Además, el pH de su solución saturada a 25 °C fue de 12.4, confirmando su carácter altamente alcalino.

Figura 3

Hidróxido de calcio utilizado en la investigación



Propiedades físicas y químicas del nanosílice

La nanosílice utilizada en la investigación como se muestra en la Figura 4 presentó una apariencia líquida, de color café claro, con una densidad de 1.03 ± 0.02 g/mL, características que evidencian su presentación como aditivo disperso y de fácil incorporación en la mezcla suelo-estabilizante. Esta condición favorece su distribución homogénea dentro de la matriz arcillosa, permitiendo una mejor interacción con las partículas del suelo y con los demás componentes empleados en el proceso de estabilización.

Figura 4

Nanosilice líquida (GAIA) en suspensión coloidal utilizada en la experimentación.

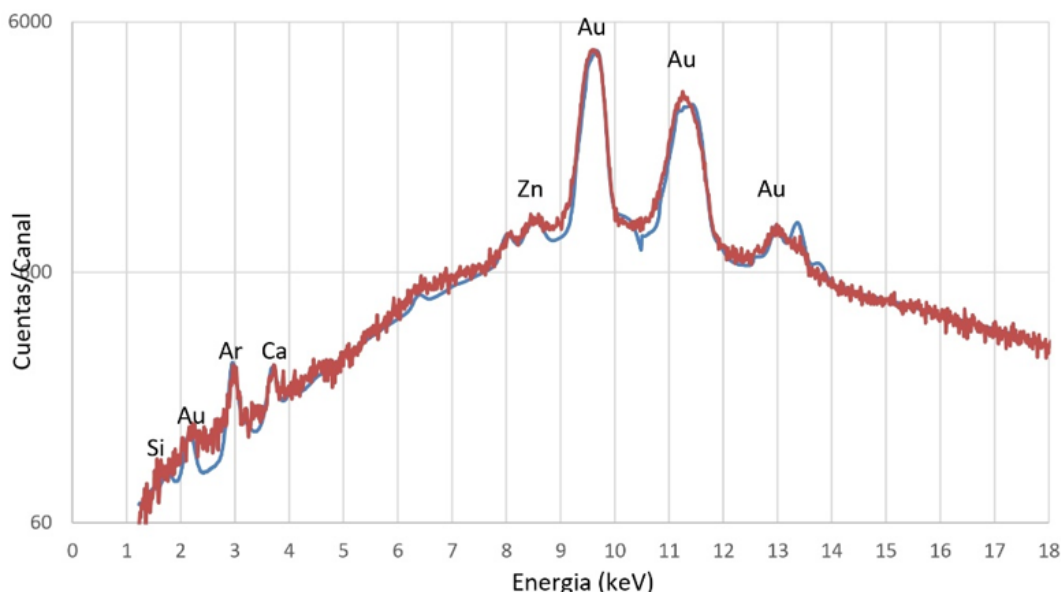


Nota: La imagen del aditivo líquido de consistencia coloidal y color café claro corresponde a la Nanosilice empleada para interactuar homogéneamente con la matriz del suelo.

El espectro de la Figura 4 evidenció la presencia predominante de silicio (Si), elemento característico de la nanosílice. Asimismo, se identificaron señales asociadas a calcio (Ca), zinc (Zn), argón (Ar) y oro (Au). La presencia de Au se atribuye al recubrimiento metálico utilizado durante la preparación de la muestra para el análisis instrumental, mientras que las señales adicionales pueden estar relacionadas con trazas del material analizado o con el procedimiento de medición. En conjunto, estos resultados confirman la naturaleza sílicea del aditivo empleado y respaldan su incorporación como material estabilizante en suelos arcillosos.

Figura 5

Espectro de FRXDE de una muestra de nanosílice en escala semilogarítmica. Incluye el pico de Ar del aire y los picos de rayos-X de Au primarios dispersados por la muestra. La curva en azul muestra el espectro simulado



Propiedades físicas y mecánicas del suelo natural y estabilizado

En la tabla 3 se muestra la variación de la máxima densidad seca (MDS) y del óptimo contenido de humedad (OCH) de los diseños de muestra. El suelo natural presentó una MDS de 1.856 g/cm^3 y un OCH de 13.40%. Con la incorporación de hidróxido de calcio, la MDS disminuyó hasta 1.773 g/cm^3 en la mezcla 9CH, equivalente a una reducción de 4.47% respecto al suelo natural; mientras que el OCH aumentó hasta 19.40%, representando un incremento de 44.78% respecto al suelo natural. Sin embargo, con la incorporación de nanosílice, la MDS aumentó hasta 1.896 g/cm^3 en la mezcla 9CH:2NS, equivalente a un incremento de 2.16% respecto al suelo natural. Asimismo, las mezclas 9CH:5NS y 9CH:7NS alcanzaron valores de 1.889 g/cm^3 y 1.872 g/cm^3 , representando incrementos de 1.78% y 0.86% respecto al suelo natural. En cuanto al OCH, las mezclas con nanosílice presentaron valores entre 14.60% y 16.20%, equivalentes a incrementos entre 8.96% y 20.90% respecto al suelo natural.

Tabla 3

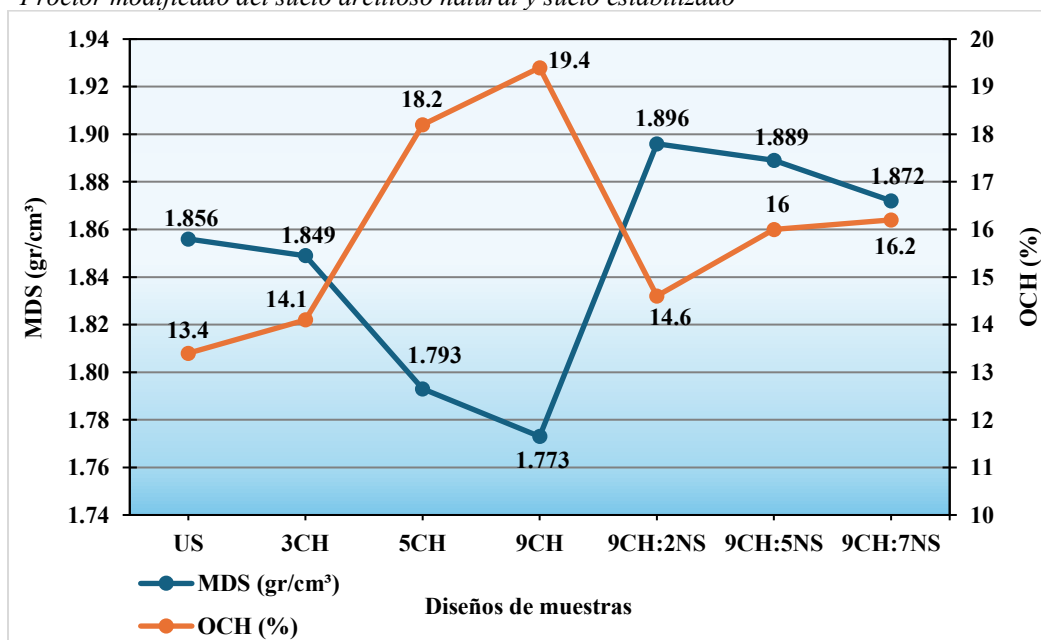
Resumen de propiedades mecánicas y ensayos normativos de la muestra estabilizada (Calicata C-02)

Tratamiento	MDS (g/cm ³)	OCH (%)	CBR al 95% MDS (%)	CBR al 100% MDS (%)	Expansión Máxima CBR (%)
US (Natural)	1.856	13.40	3.00	4.80	2.37
3CH	1.849	14.10	4.60	6.80	-
5CH	1.793	18.20	8.60	12.00	-
9CH	1.773	19.40	15.30	19.00	1.43
9CH:2NS	1.896	14.60	16.00	20.00	1.59
9CH:5NS (Óptimo)	1.889	16.00	17.70	21.50	1.38
9CH:7NS	1.872	16.20	14.40	17.00	1.60

Asimismo, se realizó un análisis estadístico ANOVA con la finalidad de establecer la existencia de diferencias significativas entre los valores de MDS y OCH. Para la MDS, se determinó que no existen diferencias significativas entre los diseños evaluados ($p=0.0621$; $F=2.6534$), mientras que para el OCH sí se evidenciaron diferencias significativas ($p=0.0021$; $F=6.3930$). La prueba de comparación de medias mostró que las mezclas 5CH y 9CH presentaron diferencias significativas respecto al suelo natural, mientras que las mezclas combinadas con nanosílice no presentaron diferencias significativas frente al US.

Figura 6

Proctor modificado del suelo arcilloso natural y suelo estabilizado

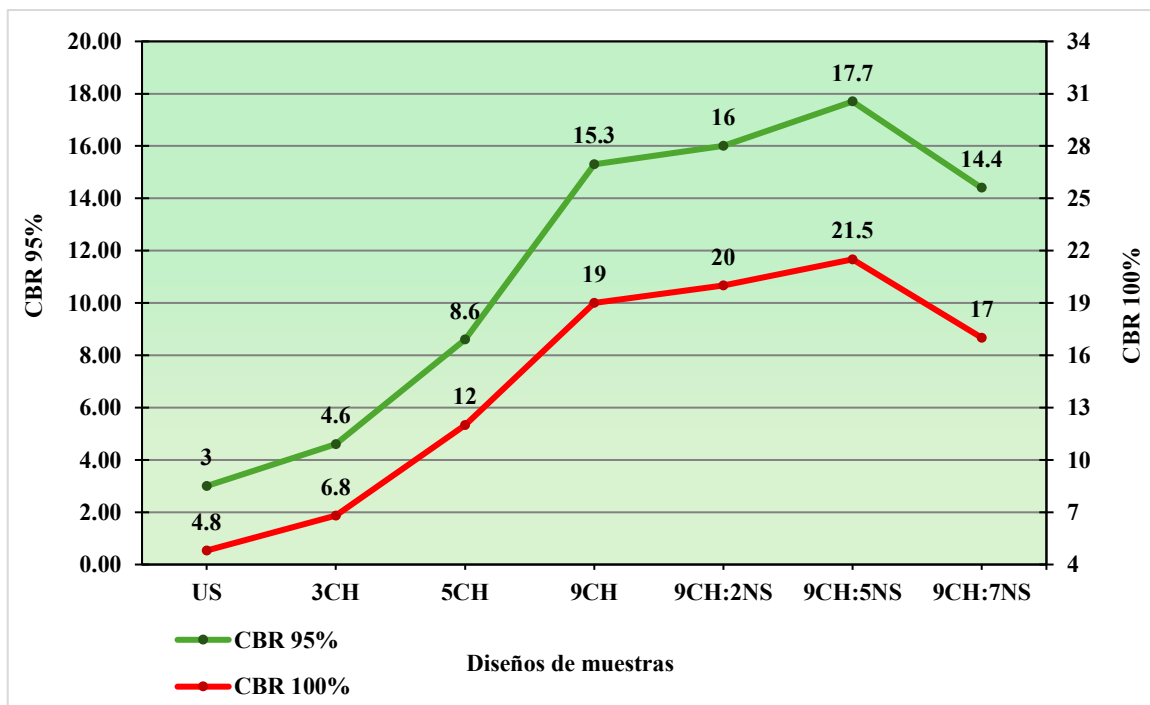


La Figura 6 muestra los valores de CBR al 95% y 100% de compactación de los diseños demuestra. El suelo natural presentó valores de 3.00% y 4.80%, respectivamente. Con la incorporación de 3CH, los valores aumentaron a 4.60% y 6.80%, equivalentes a incrementos de 53.33% y 41.67% respecto al suelo natural. Para la mezcla 5CH, el CBR alcanzó 8.60% al 95% y 12.00% al 100%, con incrementos de 186.67% y 150.00% respecto al suelo natural. Asimismo, la mezcla 9CH presentó valores de 15.30% y 19.00%, lo que representa incrementos de 410.00% y 295.83% respecto al suelo natural.

Con la incorporación de nanosílice, los mayores valores se obtuvieron en la mezcla 9CH:5NS, con 17.70% de CBR al 95% y 21.50% de CBR al 100%, equivalentes a incrementos de 490.00% y 347.92% respecto al suelo natural. Sin embargo, al aumentar la nanosílice a 7NS, los valores disminuyeron a 14.40% y 17.00%; no obstante, estos aún representaron incrementos de 380.00% y 254.17% respecto al suelo natural. El análisis ANOVA determinó diferencias significativas tanto para el CBR al 95% ($p=8.03E-11$; $F=104.8471$) como para el CBR al 100% ($p=3.89E-09$; $F=58.9683$). La comparación de medias evidenció que no hubo diferencias significativas entre US y 3CH, pero sí desde 5CH hasta las mezclas combinadas con nanosílice.

Figura 7

Índice de capacidad portante del suelo arcilloso natural y suelo estabilizado

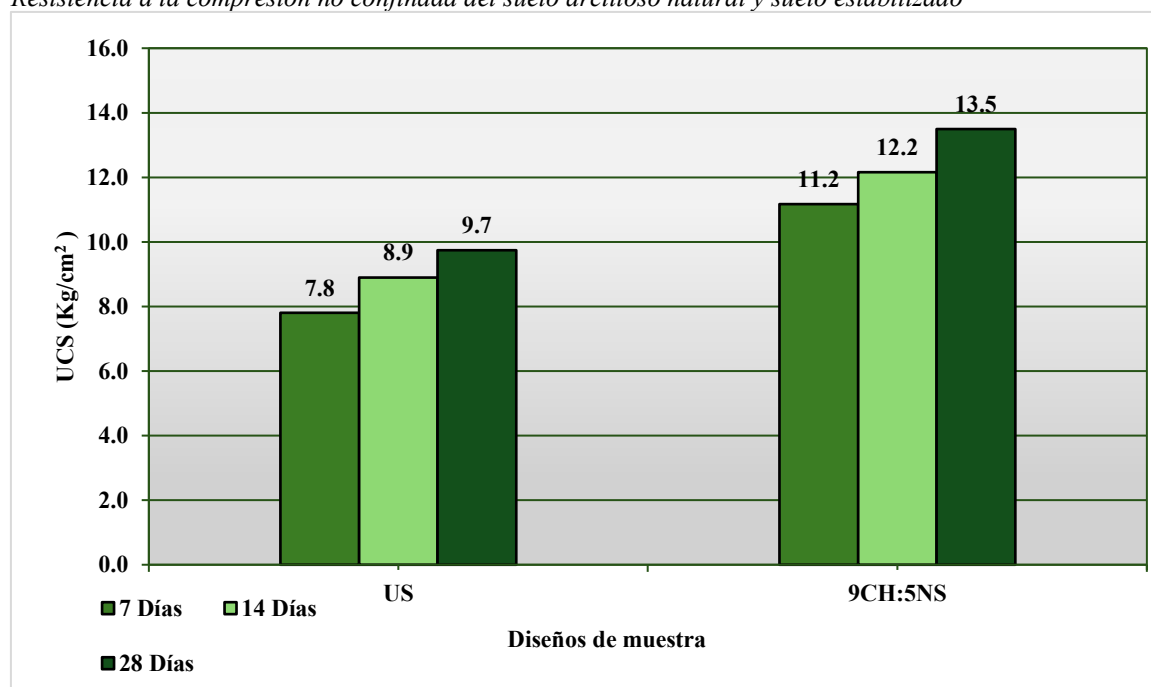


La Figura 7 muestra la resistencia a la compresión no confinada (UCS) del suelo natural y de la mezcla con mejor desempeño, correspondiente a 9CH:5NS. El suelo natural presentó valores de 7.80 kg/cm², 8.90 kg/cm² y 9.70 kg/cm² a los 7, 14 y 28 días, respectivamente. Por su parte, la mezcla 9CH:5NS alcanzó valores de 11.20 kg/cm², 12.20 kg/cm² y 13.50 kg/cm² para las mismas edades de curado. Estos resultados representan incrementos de 43.59%, 37.08% y 39.18% respecto al suelo natural, evidenciando una mejora progresiva de la resistencia mecánica del suelo arcilloso estabilizado.

Asimismo, se realizó un análisis estadístico ANOVA para determinar la existencia de diferencias significativas entre el suelo natural y la mezcla 9CH:5NS, determinándose que sí existen diferencias significativas en los valores de UCS ($p=8.15E-06$; $F=197.1071$). Estos resultados confirman que la combinación de hidróxido de calcio y nanosílice mejora significativamente la resistencia a la compresión no confinada, siendo la mezcla 9CH:5NS la de mejor desempeño mecánico entre los diseños evaluados.

Figura 8

Resistencia a la compresión no confinada del suelo arcilloso natural y suelo estabilizado



La Figura 8 muestra la resistencia a la compresión no confinada (UCS) del suelo natural y de la mezcla con mejor desempeño, correspondiente a 9CH:5NS. El suelo natural presentó valores de 7.80 kg/cm², 8.90 kg/cm² y 9.70 kg/cm² a los 7, 14 y 28 días, respectivamente. Por su parte, la mezcla 9CH:5NS alcanzó valores de 11.20 kg/cm², 12.20 kg/cm² y 13.50 kg/cm² para las mismas edades de curado. Estos resultados representan incrementos de 43.59%, 37.08% y 39.18% respecto al suelo natural, evidenciando una mejora progresiva de la resistencia mecánica del suelo arcilloso estabilizado.

y 39.18% respecto al suelo natural, evidenciando una mejora progresiva de la resistencia mecánica del suelo arcilloso estabilizado.

Asimismo, se realizó un análisis estadístico ANOVA para determinar la existencia de diferencias significativas entre el suelo natural y la mezcla 9CH:5NS, determinándose que sí existen diferencias significativas en los valores de UCS ($p=8.15E-06$; $F=197.1071$). Estos resultados confirman que la combinación de hidróxido de calcio y nanosílice mejora significativamente la resistencia a la compresión no confinada, siendo la mezcla 9CH:5NS la de mejor desempeño mecánico entre los diseños evaluados.

Ensayos de Resistencia Axial y Durabilidad Ambiental

El comportamiento mecánico a la rotura por compresión simple (UCS) y la durabilidad a largo plazo después de 5 ciclos severos de humedecimiento y secado evidenciaron un incremento sustancial en el desempeño de la mezcla óptima 9CH:5NS en comparación con el suelo natural patrón, tal como se tabula a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4

Evolución de la resistencia mecánica UCS y durabilidad por ciclos ambientales

Condición de la Muestra	UCS - 7 días (kg/cm ²)	UCS - 14 días (kg/cm ²)	UCS - 28 días (kg/cm ²)	Resistencia Media Post-Ciclos (kg/cm ²)	Expansión Final Colapso (%)
Suelo Natural (US)	7.80	8.90	9.74	3.90	24.31
Mezcla Óptima (9CH:5NS)	11.17	12.17	13.50	7.37	16.79
Variación Porcentual (%)	+43.2%	+36.7%	+38.6%	+89.7%	-30.9%

DISCUSIÓN

Los resultados experimentales demuestran que la adición combinada de hidróxido de calcio y nanosílice coloidal modifica sustancialmente el comportamiento plástico, portante y estructural del suelo arcilloso crítico de Lambayeque (Calicata C-02). Al evaluar la variación plástica, se determinó que la dosificación de 9% de CH reduce el Índice de Plasticidad de 20% a 4%, lo cual representa una caída del 80% de la susceptibilidad plástica inicial. Este fenómeno se asocia directamente con la teoría de Babanas y Courcelles (2025), quienes argumentan que un medio fuertemente alcalino ($pH \geq 12.4$), provisto por el hidróxido de calcio, promueve la disolución inmediata de la sílice y la alúmina en las partículas de arcilla, activando reacciones de cementación a largo plazo.

En lo que respecta a las características de compactación, la reducción de la MDS inicial experimentada en las fases puras de cal (1.773 g/cm³ con 9CH) concuerda con lo reportado por

Tang et al. (2023) y Chavez et al. (2024), donde el intercambio catiónico genera aglomeraciones granulares que demandan mayor contenido de agua (incremento del OCH de 13.40% a 19.40%). No obstante, la adición posterior de un 5.00% de nanosílice (9CH:5NS) produce una ganancia de densificación seca hasta los 1.889g/cm³.

Esta tendencia favorable se atribuye al tamaño nanométrico y elevada superficie específica del aditivo líquido (coloidal), el cual actúa físicamente como un material de relleno en los vacíos intersticiales, optimizando la reorganización de la matriz compactada, en concordancia con los hallazgos mecánicos de Cao et al. (2023).

La capacidad de soporte en términos de CBR evidenció una respuesta óptima y equilibrada en la subrasante estabilizada con la mezcla 9CH:5NS, alcanzando valores de **17.70% y 21.50%** al 95% y 100% de compactación, superando con creces los rangos mínimos exigidos para infraestructuras viales regionales. El incremento de la capacidad portante en más de 490% en comparación con el suelo natural patrón valida la hipótesis de Chicaña (2022), quien demostró la alta eficiencia de las partículas nanométricas de sílice para acelerar de forma puzolánica la formación de geles estables de silicato de calcio hidratado (C-S-H).

Finalmente, las pruebas complementarias de compresión axial simple (UCS) y durabilidad corroboraron el desempeño estructural superior de la mezcla óptima frente a ciclos severos de humedecimiento-secado, logrando una retención de resistencia media de 7.37 kg/cm² (un incremento del 89.74% frente al control degradado de 3.90 kg/cm²) y limitando la expansión final por colapso unidimensional a un 16.79 % en comparación con el estructivo 24.31% del suelo arcilloso natural. Este comportamiento estable ante factores climáticos cíclicos es respaldado por las teorías microestructurales de Karimiazar et al. (2023) y Dhakal et al. (2024), validando el uso de este compuesto químico como una solución de ingeniería civil sostenible y duradera en la región.

CONCLUSIONES

El hidróxido de calcio presentó características físicas favorables para su empleo como estabilizante de suelos arcillosos, debido a su alta finura, adecuada dispersión y carácter altamente alcalino. Estas condiciones permiten generar un medio químico apropiado para el desarrollo de reacciones de estabilización dentro de la matriz del suelo.

La nanosílice evidenció condiciones adecuadas para su incorporación en mezclas suelo-estabilizante, principalmente por su presentación líquida, facilidad de dispersión y naturaleza silícea. Estas características respaldan su uso como aditivo complementario en presencia de

materiales cálcicos, favoreciendo su interacción con el hidróxido de calcio y las partículas arcillosas.

En cuanto al comportamiento de compactación, la combinación de hidróxido de calcio y nanosílice permitió mejorar la respuesta física del suelo estabilizado. La mezcla 9CH:5NS alcanzó una máxima densidad seca de 1.889 g/cm³ y un óptimo contenido de humedad de 16.00%, evidenciando una adecuada condición de compactación para el suelo tratado.

El índice de capacidad portante mostró una mejora significativa con la incorporación conjunta de ambos estabilizantes. La mezcla 9CH:5NS presentó el mejor desempeño, alcanzando valores de CBR de 17.70% al 95% de compactación y 21.50% al 100% de compactación, lo que confirma su eficiencia para incrementar la capacidad portante del suelo arcilloso.

La resistencia a la compresión no confinada confirmó la mejora mecánica del suelo estabilizado. La mezcla 9CH:5NS alcanzó una resistencia de 13.50 kg/cm² a los 28 días de curado, evidenciando el efecto favorable de la combinación de hidróxido de calcio y nanosílice en el desarrollo progresivo de resistencia.

Finalmente, se concluye que la dosificación 9CH:5NS constituye la alternativa de mejor desempeño para la estabilización del suelo arcilloso evaluado, debido a que mejoró las propiedades físicas y mecánicas del material. Su aplicación representa una opción técnica viable para el mejoramiento de suelos de subrasante en obras de infraestructura vial en Lambayeque.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D1557-12. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*.

<https://doi.org/10.1520/D1557-12R21>

ASTM D1883-14. (2022). *Método De Prueba Estándar Para La Relación De Carga De California (CBR) De Suelos Compactados En Laboratorio*. Normativa, . Retrieved from <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd188314>

ASTM D2166-06. (2010). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Informe Técnico. <https://doi.org/10.1520/D2166-06>

ASTM D2487-17. (2020). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>

- ASTM D422-63. (2022). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D4318. (2010). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken: PA:ASTM International.
- ASTM E1621-94(1999). (2017). *Standard Guide for X-Ray Emission Spectrometric Analysis*. Informe Técnico. <https://doi.org/10.1520/E1621-94R99>
- Babanas, H., & Courcelles, B. (2025). Enhancing Lime Dosage Determination for Lean Clay Soil Improvement: Significance of Plasticity Limit and Interpretation Approach. *Geotechnics*, 5(1), 9. <https://doi.org/10.3390/geotechnics5010009>
- Bonilla Bances, K., Chávez Cotrina, C., Chávez Álvarez, S., Martínez Garay, G., & Arriola Carrasco, G. (2026). Propuesta de un nuevo material a base de fibra de coco para la utilización en la industria de la construcción. *Revista Científica Pakamuros*, 14(1), 4-18. <https://doi.org/10.37787/0qfkfv66>
- Cao, P., Ma, Q., Zha, M., Zhang, J., & Huo, Z. (2023). Study on the Modification of Silty Soil Sites Using Nanosilica and Methylsilicate. *Materials*, 16(16), 5646. <https://doi.org/10.3390/ma16165646>
- Chicaña, M. (2022). *Efectos de nanopartículas de sílice y hierro sobre la resistencia mecánica (relación de soporte californiana y resistencia a la compresión no confinada) de un suelo arcilloso estabilizado con hidróxido de calcio a nivel subrasante*. S.l.: Universidad Nacional de San Agustín.
- Diab, A., Allam, A., Rudayni, H., Abdelfadil, K., Arman, H., Al Zoubi, W., & Abukhadra, M. (2026). Clay nanostructures in geotechnical engineering: A critical review of mechanisms, performance, and sustainable soil stabilization. *Materials Today Sustainability*, 33, 101284. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101284>
- Diniz, B., Fedrigo, W., Kleinert, T., Batista, G., Núñez, W., Correa, B., & Brito, L. (2024). Lime Stabilization of Tropical Soil for Resilient Pavements: Mechanical, Microscopic, and Mineralogical Characteristics. *Materials*, 17(19), 4720. <https://doi.org/10.3390/ma17194720>

- Farjad, P., Mehairi, A., Meshkani, F., Mowlaei, R., Khoshnazar, R., & Nassar, N. (2025). Compressive strength and microstructural development of cement paste incorporating nanosilica with different particle sizes. *CEMENT*, 19, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2025.100128>
- Khajeh, A., Jamshidi Chenari, R., Payan, M., & Molaabasi, H. (2023). Assessing the effect of lime-zeolite on geotechnical properties and microstructure of reconstituted clay used as a subgrade soil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 132, 103501. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2023.103501>
- Novianto, D., & Rochman, T. (2023). The experimental procedures of sand and lime as base soil stabilization materials on the modified proctor values for flexible pavement construction. *MethodsX*, 11, 102473. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102473>
- Poyraz, S. (2026). Mechanical properties of stabilized clay with lime, silica fume, and basalt fiber: A RSM approach. *Applied Clay Science*, 288, 108227. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2026.108227>
- Praveen Kumar, V., & Dey, S. (2023). Study on strength and durability characteristics of nano-silica based blended concrete. *Hybrid Advances*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2022.100011>
- Roshan, M., Rashid, A., Abdul Wahab, N., Tamassoki, S., Jusoh, S., Hezmi, M., . . . Azmi, M. (2022). Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review. *Transportation Geotechnics*, 37, 100834. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2022.100834>
- Safi, W., & Singh, S. (2022). Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. *Materials Today: Proceedings*, 51, 947-955. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.333>
- Sudjianto, A., Vili, A., Suraji, A., Riman, R., & Susilo, S. (2025). The effect of adding quicklime on stabilization of expansive soils. *Technology audit and production reserves*, 2(3(82)), 12-17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326784>

- Tang, K., Zeng, F., Shi, L., Zhu, L., Chen, Z., & Zhang, F. (2023). Mechanical Behavior of Hydrated-Lime–Liquid-Stabilizer-Treated Granular Lateritic Soils. *Sustainability*, *15*(6), 5601. <https://doi.org/10.3390/su15065601>
- Utkarsh, & Jain, P. (2024). Enhancing the properties of swelling soils with lime, fly ash, and expanded polystyrene -A review. *Heliyon*, *10*(12), e32908. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32908>
- Waleed, M., & Alshawmar, F. (2025). Enhancing mechanical properties of low plasticity soil through coal and silica fume stabilization. *Scientific Reports*, *15*(1), 9990. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94149-0>