

Effect of the Soil Nano Stabilisation 360 Additive on the Bearing Capacity of Cohesive Soils in Road Subgrades

Wilin Ney Gonzales Idrogo¹; Emerson Yair Medina Sanchez²; Miguel Angel Mosqueira Moreno Dr.³

¹Universidad Privada del Norte (UPN) Cajamarca, Perú. N00186298@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN) Cajamarca, Perú. N00194901@upn.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN) Cajamarca, Perú. miguel.mosqueira@upn.pe

Abstract– *This study evaluates the effect of the Soil Nano Stabilisation 360 (SNS 360) additive on the bearing capacity of cohesive soils used in road subgrades in the Pucará–Pampa Grande section, Chota, Cajamarca (Peru). An experimental methodology was applied using soil samples collected from seven test pits, from which three representative samples were selected based on their geotechnical properties. Two additive dosages (0.025% NLF + 0.5% NPF and 0.045% NLF + 1.5% NPF) were evaluated through Modified Proctor and California Bearing Ratio (CBR) tests. Results indicate that the application of SNS 360 increased the maximum dry density up to 1.951 g/cm³ and reduced the optimum moisture content to 12.27%, improving compaction efficiency. Furthermore, the CBR values increased significantly, ranging from 2.5 to 6.34 times compared to natural soil conditions, reaching values of up to 37.40%. A descriptive statistical analysis, including mean and standard deviation, confirmed the consistency and reliability of the experimental results. These findings demonstrate that SNS 360 is an effective alternative for improving the mechanical behavior of low-strength cohesive soils, contributing to more efficient and sustainable road infrastructure design.*

Keywords: Soil Nano Stabilisation 360, cohesive soils, CBR, road infrastructure projects, bearing capacity.

Efecto del aditivo Soil Nano Stabilisation 360 sobre la capacidad de soporte de suelos cohesivos en subrasantes viales

Wilin Ney Gonzales Idrogo¹; Emerson Yair Medina Sanchez²; Miguel Angel Mosqueira Moreno Dr.³

¹Universidad Privada del Norte (UPN) Cajamarca, Perú. N00186298@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN) Cajamarca, Perú. N00194901@upn.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN) Cajamarca, Perú. miguel.mosqueira@upn.pe

Resumen– La presente investigación evalúa el efecto del aditivo Soil Nano Stabilisation 360 (SNS 360) en la capacidad portante de suelos cohesivos utilizados como subrasante vial en el tramo Pucará–Pampa Grande, ubicado en Chota, Cajamarca (Perú). Se empleó una metodología experimental basada en la recolección de muestras de siete calicatas, de las cuales se seleccionaron tres representativas según sus características geotécnicas. Se evaluaron dos dosificaciones del aditivo (0.025% NLF + 0.5% NPF y 0.045% NLF + 1.5% NPF) mediante ensayos de Proctor Modificado y California Bearing Ratio (CBR). Los resultados evidenciaron un incremento en la densidad seca máxima hasta 1.951 g/cm³ y una reducción del contenido óptimo de humedad hasta 12.27%, lo que mejora la eficiencia de compactación. Asimismo, los valores de CBR aumentaron significativamente entre 2.5 y 6.34 veces respecto al suelo natural, alcanzando valores de hasta 37.40%. El análisis estadístico descriptivo, basado en el cálculo de la media y la desviación estándar, permitió confirmar la consistencia y confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos. Los resultados demuestran que el SNS 360 constituye una alternativa eficaz para mejorar el comportamiento mecánico de suelos cohesivos de baja resistencia, contribuyendo a un diseño más eficiente y sostenible de infraestructuras viales.

Palabras Claves: Soil Nano Stabilisation 360, suelos cohesivos, CBR, proyectos viales, capacidad portante.

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo se basa en la tesis titulada “Influencia del aditivo Soil Nano Stabilisation 360 en la capacidad portante de suelos cohesivos de la subrasante del tramo Pucara – Pampa Grande, Chota, Cajamarca, 2024”, disponible en el repositorio de la Universidad Privada del Norte, sede Cajamarca [1].

La calidad del suelo en proyectos de construcción es un factor fundamental para garantizar la estabilidad y seguridad de los proyectos viales. El suelo, al ser utilizado como material de cimentación o como subrasante, debe poseer propiedades físico – mecánicas adecuadas para soportar las cargas de tráfico y las condiciones ambientales. La mala calidad del suelo puede generar una disminución de la capacidad portante, lo que afecta directamente la durabilidad y seguridad de las infraestructuras [2], [3].

A nivel mundial, los suelos cohesivos, como las arcillas y los limos, representan un desafío en la ingeniería civil debido

a sus propiedades de alta plasticidad y su comportamiento volumétrico en respuesta a cambios de humedad. Estos suelos experimentan una disminución en su cohesión cuando están sujetos a variaciones en el contenido de humedad, lo que reduce su capacidad de carga y afecta su rendimiento estructural. Este tipo de suelos es común en muchas regiones del mundo, particularmente en áreas con suelos expansivos, como en diversas zonas de América Latina y Asia [4], [5].

En este contexto, el uso de aditivos químicos para estabilizar y mejorar las propiedades mecánicas de los suelos en una práctica común. Un aditivo innovador es el Soil Nano Stabilisation 360 (SNS 360), Un producto basado en nanotecnología que mejora significativamente la resistencia y estabilidad de los suelos cohesivos, aumentando su capacidad portante y reduciendo la expansión y contracción bajo variaciones de humedad [6]. Este aditivo se presenta como una alternativa eficiente y sostenible para mejorar la calidad de los suelos en proyectos de infraestructura vial.

El uso del aditivo como el SNS 360 también es relevante en zonas urbanas, especialmente en áreas donde el suelo tiene características de baja capacidad portante debido a su composición arcillosa o a su alteración por la actividad constructiva. Las propiedades de estabilización del SNS 360 podrían aplicarse proyectos urbanos, como la construcción de pavimentos y edificaciones, ofreciendo una solución efectiva para la mejora de calidad del suelo. Así, evitarían problemas de deformaciones o fallas estructurales causadas por los suelos inadecuados para la construcción de infraestructura pesadas [1], [7].

Los suelos con aditivos han sido ampliamente estudiados en diversas regiones. En la república de Irac, Mosa et al. [8] evaluaron el uso de polvo de horno de cemento (CKD) para mejorar suelos pobres, mostrando mejoras significativas en la resistencia del suelo. En Venezuela, Villalobos et. al. [9] investigaron el uso de aditivos como consolid 444 y Con – Aid para suelos arcillosos, logrando mejoras en la capacidad portante. Aunque estas investigaciones son útiles, el uso de tecnologías basadas en nanotecnologías, como el SNS 360, representa una innovación prometedora que podría

revolucionar la estabilización de suelos en proyectos viales. este estudio busca expandir el conocimiento sobre el SNS 360 y su eficacia en la mejora de suelos cohesivos, proporcionando resultados comparativos que ayudarán a validar su aplicación en diferentes contextos geotécnicos.

La capacidad portante del suelo constituye un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica y vial, ya que define la aptitud de la subrasante para resistir las cargas transmitidas por el tránsito vehicular sin que se produzcan fallas por corte ni deformaciones excesivas. La adecuada evaluación de esta propiedad, a partir de ensayos de campo y laboratorio, permite caracterizar el comportamiento mecánico del suelo y resulta esencial para el diseño seguro y eficiente de pavimentos y estructuras viales, contribuyendo a la estabilidad y durabilidad de la infraestructura [10].

En ciudades andinas como Cajamarca-Perú, las condiciones geotécnicas son variables, con suelos heterogéneos y fluctuaciones de humedad, lo que puede generar daños estructurales si no se consideran adecuadamente. Un ejemplo de este problema en Cajamarca es la Avenida Universitaria – Los Patos, pues a meses de ser pavimentada, presentó deterioro prematuro, lo que indica posibles deficiencias en la evaluación de la subrasante y la capacidad portante en su diseño. Estas fallas afectan el desempeño estructural, siendo necesaria la intervención en mantenimientos y reparación de la estructura, además de afectar la movilidad urbana y la seguridad vial. Por lo tanto, estudiar la capacidad portante del suelo y su estabilización con aditivos en las vías es clave no solo desde el punto de vista técnico, sino también para promover la sostenibilidad ambiental y social de las infraestructuras urbanas.

En la región de Cajamarca, la baja capacidad portante de los suelos, asociada a la presencia de materiales finos, comportamiento predominantemente arcilloso y elevada sensibilidad a la humedad, condiciona negativamente la durabilidad y el desempeño estructural de los pavimentos urbanos y periurbanos. Estas características provocan deformaciones, pérdida de soporte y fallas prematuras, principalmente durante la temporada de lluvias. Como consecuencia, se recurre a medidas correctivas convencionales, tales como el reemplazo de material inadecuado o el incremento del espesor de las capas del pavimento, lo que conlleva un aumento significativo de los costos de construcción y mantenimiento, así como un mayor consumo de recursos y energía [11].

Diversos estudios geotécnicos evidencian que los valores de California Bearing Ratio (CBR) en estado natural son reducidos, lo que motiva el empleo de aditivos tradicionales como cal o cemento para mejorar la capacidad portante del suelo. Sin embargo, estas soluciones incrementan la huella de carbono y generan impactos ambientales adicionales derivados

de la extracción, transporte y disposición de materiales, además de afectar la movilidad urbana y el bienestar de la población debido a intervenciones frecuentes. En este contexto, resulta necesario evaluar alternativas de estabilización de suelos que permitan mejorar el desempeño mecánico de las subrasantes de manera eficiente y sostenible, integrando criterios técnicos, ambientales y sociales, con el propósito de contribuir al desarrollo de infraestructura vial durable, económicamente viable y socialmente responsable [11].

La investigación busca determinar la dosificación óptima del SNS 360 y su impacto en la capacidad portante de suelos deficientes, lo que contribuirá al desarrollo de métodos más eficientes y sostenibles en la ingeniería de suelos, los resultados aportarán bases técnicas para la implementación de esta tecnología en proyectos de infraestructura vial [1].

A. Definiciones esenciales

Para comprender el proceso de la investigación, es necesario clarificar los conceptos fundamentales relacionados con la preparación de las muestras de suelo tratadas con el aditivo SNS 360 y los materiales empleados.

- Capacidad portante o capacidad de soporte: La capacidad de carga de un material es la carga máxima que puede soportar sin causar asentamientos excesivos. Para evaluarla se utiliza comúnmente el índice CBR, el cual permite definir el perfil del suelo y establecer un plan de ensayos, considerando condiciones como el 95 % de la densidad seca máxima y una penetración de 2,54 mm [12].
- Estabilización de suelo: La consolidación de terrenos como el proceso de mejorar una o varias propiedades del suelo para que cumpla una función específica. Esto se logra optimizando sus características físicas mediante técnicas mecánicas y la adición de sustancias químicas. Se aplica principalmente a suelos de baja calidad, utilizando materiales como cemento, cal o asfalto, con el fin de aumentar su resistencia y durabilidad. Independientemente del método empleado, la consolidación siempre incluye una etapa de compactación [5].
- Suelo: Se forman a partir de la desintegración y transformación de rocas y desechos con el paso del tiempo, mediante procesos físicos y biológicos. Como estos procesos dependen del clima, la vegetación y otros factores ambientales, existen distintos tipos de suelos con características variadas [13].
- Subrasante: La subrasante es el terreno de fundación bajo la base granular, que puede estabilizarse para mejorar su desempeño. Su función principal es soportar las cargas del pavimento y garantizar su estabilidad, por lo que debe tener propiedades adecuadas para resistir el tránsito y evitar deformaciones que afecten la integridad del pavimento [14].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación desarrollada corresponde a un estudio de tipo aplicado y de naturaleza experimental, cuyo propósito es analizar la incidencia del aditivo SNS 360 en la capacidad portante o capacidad de soporte de la subrasante a través de ensayos CBR realizados en laboratorio. Se emplea un enfoque cuantitativo, debido al uso de procedimientos numéricos y estadísticos para el procesamiento de los datos y la validación de la hipótesis formulada.

El nivel de investigación es correlacional, ya que se pretende identificar la relación existente entre la aplicación del sistema SNS 360 integrado por los aditivos (NLF y NSF), y el comportamiento mecánico de la subrasante. De igual manera, el diseño experimental consistió en la manipulación de la variable independiente (aplicación del aditivo) con el fin de evaluar su efecto sobre la variable dependiente (CBR), siguiendo el método hipotético-deductivo, el cual permite contrastar la hipótesis mediante los resultados experimentales obtenidos.

El estudio fue realizado en el año 2024 en la provincia de Chota, ubicada en el departamento de Cajamarca.

A. Población y Muestra.

Para la selección de la población de estudio, considerando que se desea analizar la subrasante del tramo Pucara - Pampa se aplicaron los criterios establecidos en el Manual de Carreteras para la realización de esta investigación, que indica el número de muestras a recolectar según la clase de carretera, el tramo en estudio corresponde a un tipo de carretera de Bajo Volumen de Tránsito, por ende la cifra mínima de calicatas corresponde a 1fcalicata por km; siendo el tramo de 6.60 km, se consideró como la población a 07 calicatas de exploración ubicadas a lo largo del tramo Pucara - Pampa Grande. Las calicatas se identificaron con la nomenclatura C-01, C-02...C-7 con una profundidad 1.50m

La muestra fue elegida de manera no probabilística, considerando 3 calicatas elegidas al azar, se seleccionó a C1, C4 y C6, de las cuales se extrajo el suelo para su estudio.

B. Materiales

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio se emplearon los siguientes materiales:

- Suelo
- Agua
- Agua destilada
- Aditivo Soil Nano Stabilisation 360 (SNS 360)

C. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En este estudio se empleó la técnica de observación directa para analizar los efectos del aditivo Soil Nano Stabilisation 360, complementándose con la recolección de información mediante análisis documental, a partir de la revisión y selección de tesis, artículos y revistas científicas nacionales e internacionales relacionados con este aditivo.

D. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearán fichas resumen para comparar los resultados del suelo en estado natural con los tratados con el aditivo Soil Nano Stabilisation 360, considerando sus distintas formulaciones. El análisis de los ensayos de laboratorio se realizó con Microsoft Excel 2024, usando plantillas específicas para cada prueba.

En esta investigación, los datos se analizarán utilizando formatos específicos para cada ensayo realizado. Posteriormente, la información obtenida en laboratorio será procesada en Microsoft Excel 2024, empleando hojas de cálculo, tablas y gráficos. Esto permitirá evaluar y comparar las muestras tratadas con SNS 360 en distintos porcentajes, con el objetivo de identificar la dosificación que proporcione los mejores resultados.

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE SEGÚN EL VALOR DEL CBR EN
PAVIMENTOS VIALES

Categorías de subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante inadecuada	CBR <3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	De CBR ≥ 30%

Nota: Clasificación de capacidad portante del suelo. Ref. [5]

E. Procedimientos.

La metodología se desarrolló de manera estructurada, desde la planificación hasta la ejecución de siete ensayos de laboratorio seleccionados por su pertinencia. Se recopiló y analizó información técnica basada en normativa vigente y fuentes especializadas (MTC 2014, ASTM, NTP), y los resultados para garantizar su validez y replicabilidad.

1. Reducción De Muestras De Campo (MTC E 103, ASTM C 702) – Método B.
2. Conservación Y Transporte De Muestras (MTC E 104, ASTM D4220, NTP 339.151)
3. Obtención En Laboratorio De Muestras Representativas (MTC E 105, NTP 339.089)

4. Contenido De Humedad (MTC E108u/ NTP 339.127o/ASTM D2216)
5. Ensayo De Límites De Atterberg (MTC E111 / ASTM D4318 / NTP 339.130)
 - Limite Líquido
 - Limite Plástico
6. Análisis De Granulometría Mediante Tamizado Por Lavado (ASTMhD422 - 63)
7. Peso Específico Relativo de Sólidos (MTC E113k/ ASTMpD854 / NTPk339.131)
8. Proctor Modificado (ASTM D 1557/MTC E 115/NTP 339.141)
9. California Bearing Ratio – CBR (MTC E 132/ASTM D 1883/ ASTM D 4429)

Para el procesamiento de los datos, se aplicó un análisis estadístico descriptivo, considerando el cálculo del promedio y la desviación estándar de los valores obtenidos en los ensayos de CBR, con el fin de evaluar la variabilidad y consistencia de los resultados experimentales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados.

La Tabla II muestra la caracterización física del suelo, determinada mediante ensayos de laboratorio aplicados a las diferentes calicatas consideradas en la investigación.

TABLA II
CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUELO

Calicata	W (%)	Finos (%)	IP (%)	SUSC	AASHTO
C-01	26.66	92.07	11.00	ML	A-6(11)
C-02	28.55	81.91	13.00	CL	A-6(10)
C-03	34.79	95.75	15.00	CL	A-6(16)
C-04	26.23	64.05	9.00	ML	A-4(5)
C-05	33.48	87.98	15.00	CL	A-6(14)
C-06	17.53	51.64	7.00	CL	A-4(1)
C-07	27.19	91.28	12.00	ML	A-6(13)

Nota: Los valores de W (%), Finos (%), IP (%), SUSC y AASHTO corresponden a los resultados de los ensayos de laboratorio según las normativas correspondientes Ref. [1].

TABLA III
CALICATAS SELECCIONADAS PARA EVALUACIÓN MECÁNICA

Calicata	W (%)	Finos (%)	IP (%)	AASHTO
C-01	26.66	92.07	11.00	A-6(11)
C-04	26.23	64.05	9.00	A-4(5)
C-06	17.53	51.64	7.00	A-4(1)

Nota: Los valores de las calicatas seleccionadas.24” Ref. [1].

Según la TABLA II evidencian una variabilidad moderada en las propiedades físicas entre las calicatas analizadas, particularmente en la distribución granulométrica,

el índice de plasticidad. El contenido de finos supera el 50% en todas las calicatas, lo que permite clasificar al material como suelo predominantemente cohesivo, condición consistente con la naturaleza del terreno estudiado, las cuales influyen en su respuesta mecánica.

De acuerdo con la Tabla III, la selección de las calicatas para la evaluación mecánica se realizó considerando la variabilidad de sus propiedades físicas. La calicata C-01 representa la condición mas desfavorable, mientras que en la calicata C-04 y C-06 corresponde a condiciones intermedia y menos critica, respectivamente. Esta selección permitió evaluar de manera representativa el comportamiento mecánico de suelo.

La tabla IV presenta los parámetros de compactación del suelo obtenidos mediante el ensayo Proctor modificado, correspondiente a la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad de las calicatas seleccionadas, en su condición natural y con adición del aditivo SNS 360, permitiendo evaluar su efecto sobre el comportamiento del material.

TABLA IV
CALICATAS SELECCIONADAS PARA EVALUACIÓN MECÁNICA

Descripción	γ_d máx (g/cm ³)	W ópt (%)
C-01 (suelo natural)	1.509	26.44
C-04 (suelo natural)	1.755	20.30
C-06 (suelo natural)	1.923	13.45
C-01 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	1.510	25.30
C-04 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	1.762	20.20
C-06 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	1.936	13.15
C-01 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	1.519	24.52
C-04 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	1.770	19.06
C-06 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	1.951	12.27

Nota: Los valores de γ_d máx y w ópt corresponden a los resultados del ensayo Proctor Modificado Ref. [5].

La figura 1 resalta la variación del contenido de humedad (w ópt) obtenido del ensayo Proctor modificado para las calicatas seleccionadas, en condición natural y con adición del aditivo SNS 360, permitiendo evaluar el efecto del tratamiento sobre la demanda de agua durante el proceso de compactación.

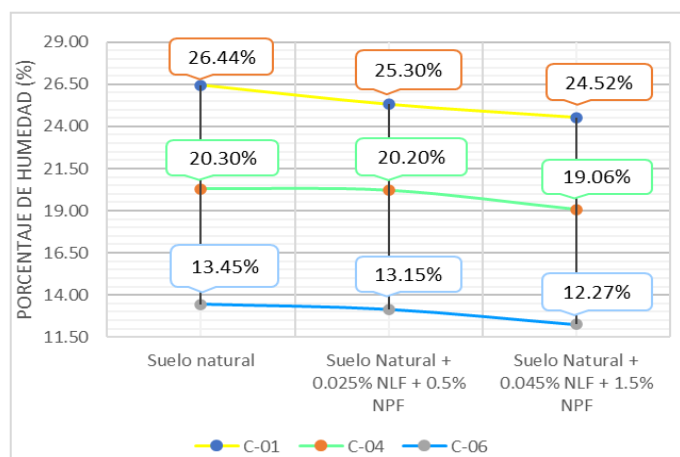


Fig.1 Gráfica de la variación del contenido óptimo de humedad (w_{opt}) del suelo natural y tratado con SNS 360. Ref. [1].

La figura 2 muestra la variación de la densidad seca máxima ($\gamma_d \text{ máx}$) del suelo, obtenidos del ensayo Proctor, para las calicatas seleccionadas en condición natural y tratadas con el aditivo SNS 360, permitiendo evaluar su efecto sobre el comportamiento de términos de densificación.

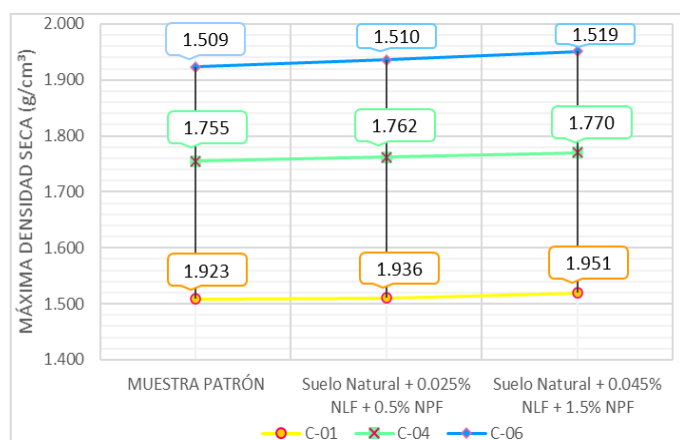


Fig. 2 Gráfica de la variación de la densidad seca máxima ($\gamma_{d \text{ máx}}$) del suelo natural y tratado con SNS 360. Ref. [1].

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla III y en las figuras 1 y 2, se puede observar lo siguiente:

- El tratamiento con SNS 360 mostró un incremento en la densidad de las muestras tratadas. Con 0.025% NLF + 0.5% NPF, la calicata C-01 aumentó 0.013 g/cm³, la C-04 0.007 g/cm³ y la C-06 0.013 g/cm³. Al utilizar la dosificación de 0.045% NLF + 1.5% NPF, el efecto fue más pronunciado, con incrementos de 0.028 g/cm³ en C-01, 0.015 g/cm³ en C-04, y 0.01 g/cm³ en C-06. Estos resultados evidencian una mejora en la capacidad de compactación de los suelos, particularmente en suelos más débiles, optimizando la estabilidad estructural y aumentando su capacidad de soporte.

- En cuanto al óptimo contenido de humedad (w_{opt}), los resultados mostraron una disminución general en las muestras tratadas con SNS 360. En la calicata C-01, la humedad óptima pasó de 26.44% en el suelo natural a 25.30% con la dosificación de 0.025% NLF + 0.5% NPF y 24.52% con 0.045% NLF + 1.5% NPF. En C-04, la humedad óptima se redujo de 20.30% a 20.20% con la primera dosificación y 19.06% con la segunda. Finalmente, en C-06, la humedad óptima pasó de 13.45% a 13.15% con la primera dosificación y 12.27% con la segunda. Estas reducciones en la humedad óptima indican que el SNS 360 mejora la estabilidad estructural del suelo, al reducir su sensibilidad a la humedad. Esto también sugiere una mayor eficiencia en la compactación y un mejor comportamiento del suelo frente a variaciones en las condiciones climáticas, lo que es crucial para la durabilidad de las infraestructuras viales.

Nuestros resultados coinciden con los hallazgos de [14], donde se observó que el tratamiento de suelos con estabilizantes como cal y cemento aumentó la densidad seca máxima y redujo la humedad óptima, mejorando la capacidad de soporte del suelo. De manera similar, en nuestra investigación, el uso de SNS 360 mostró un incremento en la densidad y una disminución de la humedad óptima, lo que indica una mejora en la capacidad de carga y estabilidad estructural del suelo, crucial para su aplicación en infraestructuras viales.

La tabla V representa los resultados del ensayo CBR realizados en las calicatas seleccionadas, en condición natural y con adición del aditivo SNS 360 en las dosificaciones evaluadas, con el fin de analizar la influencia del tratamiento de la capacidad de soporte del suelo.

TABLA V
RESULTADOS DEL ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO

Descripción	Cbr 95% $\gamma_d \text{ máx}$ (0.1")	Cbr 95% $\gamma_d \text{ máx}$ (0.2")
C-01 (suelo natural)	4.88%	4.54%
C-04 (suelo natural)	5.60%	5.55%
C-06 (suelo natural)	5.90%	5.50%
C-01 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	31.40%	26.10%
C-04 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	14.20%	13.10%
C-06 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	19.60%	22.80%
C-01 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	32.00%	27.10%
C-04 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	16.90%	16.10%
C-06 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	37.40%	33.70%

Nota: Los valores del ensayo CBR a 0.1" y 0.2". Ref. [1].

La Tabla V los valores de California Bearing Ratio (CBR) obtenidos a 0.2 pulgadas resultan, en general, menores que los correspondientes a la penetración de 0.1 pulgadas, lo cual es consistente con el comportamiento mecánico esperado del suelo ante mayores niveles de deformación. Esta relación confirma la coherencia de los resultados y evidencia una adecuada ejecución y control de calidad del ensayo, ya que la disminución progresiva del CBR con el incremento de la penetración es característica de materiales con respuesta mecánica realista.

No obstante, a pesar de ser inferiores a los valores registrados a 0.1", los resultados de CBR a 0.2" muestran incrementos significativos respecto a los suelos en condición natural, superando el valor mínimo de 6 % requerido para subrasantes viales según el MTC. Este comportamiento demuestra que la mejora inducida por el uso de Soil Nano Stabilisation 360 no solo se manifiesta en la penetración estándar de diseño, sino que se mantiene ante mayores solicitaciones, evidenciando una mejora efectiva de la capacidad portante y un desempeño estructural más estable del suelo tratado, como se detalla lo siguiente:

Como se detalla a continuación:

- Para el suelo C-01, el CBR aumentó de 4.88% a 31.40% con 0.025% NLF y 0.5% NPF (mejora de 543.88%) y a 32.00% con 0.045% NLF y 1.5% NPF (mejora de 555.73%).
- En el suelo C-04, el CBR pasó de 5.60% a 14.20% con 0.025% NLF y 0.5% NPF (mejora de 154.28%) y a 16.90% con 0.045% NLF y 1.5% NPF (mejora de 201.78%).
- La calicata C-06 mostró un aumento del 232.20% al pasar de 5.90% a 19.60% con 0.025% NLF y 0.5% NPF, y de 532.20% al alcanzar 37.40% con 0.045% NLF y 1.5% NPF. Estos incrementos reflejan el impacto positivo del aditivo en la mejora de la capacidad de soporte.
- Para el suelo C-01, el CBR a 0.2" se incrementó de 4.54 % en condición natural a 26.10 % con la adición de 0.025 % NLF y 0.5 % NPF, lo que representa una mejora del 475.33 %, y alcanzó 27.10 % con 0.045 % NLF y 1.5 % NPF, correspondiente a un incremento del 497.36 %.
- En el caso del suelo C-04, el CBR aumentó de 5.55 % a 13.10 % con 0.025 % NLF y 0.5 % NPF, reflejando una mejora del 136.04 %, y a 16.10 % con 0.045 % NLF y 1.5 % NPF, lo que equivale a un incremento del 190.09 %.
- Finalmente, el suelo C-06 presentó un comportamiento favorable, pasando de 5.50 % en estado natural a 22.80 % con 0.025 % NLF y 0.5 % NPF, lo que representa una mejora del 314.55 %, y alcanzando 33.70 % con 0.045 % NLF y 1.5 % NPF, correspondiente a un incremento del 512.73 %. Este comportamiento indica que, para esta dosificación, el suelo mantiene o incluso incrementa su

resistencia bajo una mayor penetración, lo cual sugiere una respuesta mecánica más estable del material tratado.

Figura 3 muestra los resultados de CBR a 0.1", donde se observa claramente la mejora en la capacidad de soporte de los suelos tratados. Figura 2 presenta los incrementos porcentuales de CBR, reflejando el impacto positivo del aditivo en la estabilización de los suelos. Además, Figura 4 ilustra el incremento relativo respecto al suelo natural, destacando cómo el tratamiento mejora significativamente la resistencia de los suelos.

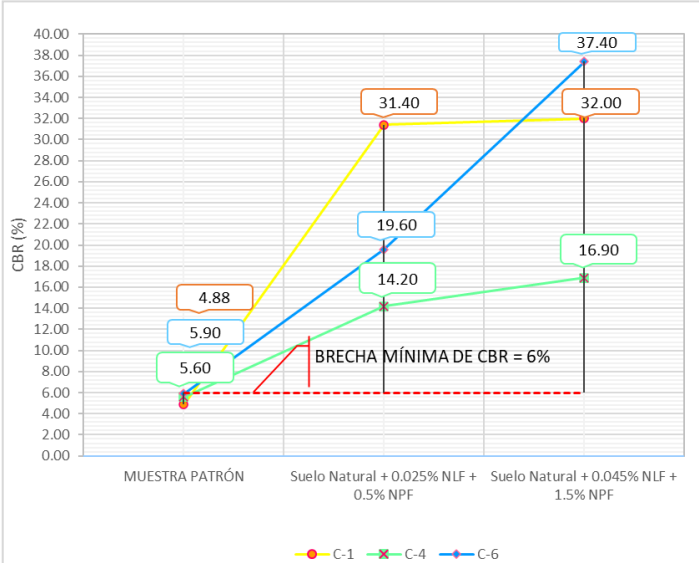


Fig. 3 CBR a 0.1" de suelos tratados con Soil Nano Stabilisation 360. Ref. [1].

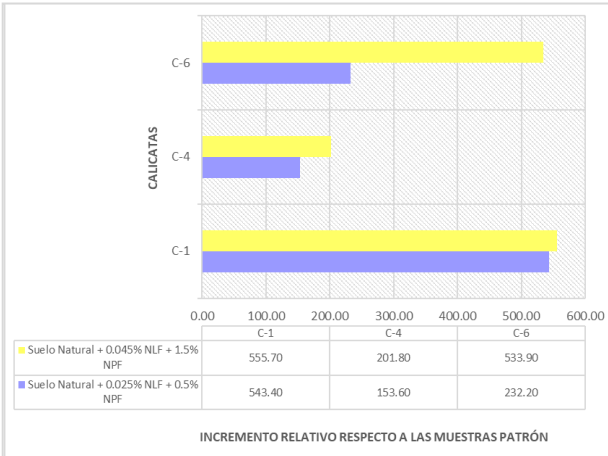


Fig. 4 Incremento relativo respecto al suelo natural. Ref. [1].

La mejora en la capacidad de soporte de los suelos tratados con Soil Nano Stabilisation 360 tiene implicaciones directas en el diseño de pavimentos. Al alcanzar valores de CBR a 0.1" tan elevados como 32.00% para C-01 y 37.40% para C-06, los suelos tratados permiten la reducción del espesor del pavimento. Un mayor CBR indica que el suelo es más capaz de soportar cargas, lo que reduce la necesidad de capas adicionales de base o subbase, resultando en ahorros de

costos en materiales y haciendo el proyecto más eficiente y sostenible.

El aditivo Soil Nano Stabilisation 360 ha demostrado ser especialmente efectivo en suelos con un alto contenido de partículas finas, como el C-06, que mostró una mejora sobresaliente en CBR (de 5.90% a 37.40% con 0.045% NLF y 1.5% NPF). Este comportamiento sugiere que los suelos más cohesivos se benefician más del tratamiento, mejorando su cohesión interna y, por lo tanto, su capacidad de carga. Los resultados confirman que el uso de este aditivo en suelos inicialmente no aptos para subrasantes viales puede transformar estos suelos en materiales adecuados para la construcción de infraestructuras viales, reduciendo costos y mejorando la eficiencia de los proyectos.

La Tabla VI presenta los resultados del ensayo CBR a 56 golpes y 96 horas de curado, con el objetivo de evaluar la expansión del suelo tratado con el aditivo Soil Nano Stabilisation 360. Este ensayo es esencial para analizar cómo el aditivo mejora la capacidad de soporte de los suelos cohesivos en condiciones de subrasantes viales. La expansión obtenida se convierte en un indicador clave de la eficacia del aditivo, contribuyendo a incrementar la estabilidad y resistencia de los suelos, lo cual es crucial para asegurar la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales.

TABLA VI
 EXPANSIÓN OBTENIDA EN EL ENSAYO CBR (56 GOLPES, 96 H)

Descripción	Expansión (%)
C-01 (suelo natural)	3.92
C-04 (suelo natural)	4.87
C-06 (suelo natural)	1.43
C-01 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	0.15
C-04 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	0.78
C-06 (suelo natural+0.025%NLF+0.5%NPF)	0.76
C-01 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	0.05
C-04 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	0.38
C-06 (suelo natural+0.045%NLF+1.5%NPF)	0.04

Nota: Los valores de expansión obtenida del ensayo CBR (56 golpes, 96 h) para suelos tratados y naturales. Ref. [1].

Según la tabla V, los resultados obtenidos en el ensayo CBR muestran que el aditivo Soil Nano Stabilisation 360 tiene un impacto positivo en la reducción de la expansión de los suelos cohesivos, mejorando significativamente su capacidad de soporte para subrasantes viales. Los suelos naturales, como el C-01 y C-04, presentaron expansiones de 3.92% y 4.87%, respectivamente, mientras que los suelos tratados con el aditivo mostraron una drástica reducción, alcanzando expansiones cercanas a 0.15% y 0.78%, respectivamente. Esto

resalta la efectividad del aditivo en estabilizar suelos, lo que puede tener implicaciones importantes en la mejora de la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales.

El tratamiento con concentraciones más altas del aditivo, como en el caso de C-01 con 0.045% NLF y 1.5% NPF, resultó en expansiones mínimas, lo que sugiere que mayores dosis del aditivo mejoran aún más las propiedades mecánicas del suelo. Estos resultados son consistentes con estudios previos que indican que los estabilizantes a nanoescala pueden mejorar la capacidad de soporte de los suelos, especialmente en condiciones que requieren alta resistencia y estabilidad, como las subrasantes viales. Esta mejora podría ser crucial para la construcción de carreteras más duraderas y con menos mantenimiento a largo plazo.

TABLA VII
 RESUMEN ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DEL CBR

Condición	Promedio Cbr 95% yd máx (0.1")	Desviación estándar Cbr 95% yd máx (0.1")	Promedio Cbr 95% yd máx (0.2")	Desviación estándar Cbr 95% yd máx (0.2")
Natural	5.46	0.52	5.20	0.57
Dosis baja	21.73	8.80	20.67	6.76
Dosis alta	28.77	10.63	25.63	8.89

Nota: Los valores del ensayo CBR a 0.1" y 0.2". Ref. [1].

El análisis estadístico de los resultados de CBR evidencia un incremento significativo en la capacidad portante de los suelos tratados en comparación con su estado natural. Los valores promedio de CBR aumentaron de 5.46% en el suelo natural hasta 28.77% con la mayor dosificación del aditivo. Si bien se observa cierta variabilidad en los resultados, reflejada en los valores de desviación estándar, la tendencia general confirma la efectividad del aditivo SNS 360 en la mejora del comportamiento mecánico del suelo. Esta variabilidad se atribuye a la heterogeneidad inherente de los suelos cohesivos.

A pesar de que los resultados de laboratorio son prometedores, es esencial realizar estudios adicionales en condiciones de campo. Factores como el tráfico real, las variaciones climáticas y la interacción con otros materiales en el entorno vial deben ser considerados. Estos estudios podrían centrarse en evaluar la durabilidad a largo plazo del aditivo en condiciones ambientales cambiantes. A pesar de las limitaciones de los ensayos de laboratorio, los hallazgos sugieren que Soil Nano Stabilisation 360 tiene un gran potencial para ser utilizado en proyectos de estabilización de suelos, contribuyendo a la mejora de las infraestructuras viales y ofreciendo soluciones más eficientes en la ingeniería civil.

La presente investigación presenta ciertas limitaciones relacionadas con la variabilidad de las propiedades físicas de las muestras, donde factores como el límite líquido, el contenido de finos y la gradación granulométrica de cada

calicata influyeron significativamente en la interacción del aditivo con la matriz del suelo. Dado que el comportamiento mecánico observado está condicionado por las características mineralógicas y plásticas específicas del tramo Pucará - Pampa Grande, los resultados obtenidos de los ensayos de Proctor Modificado y CBR deben considerarse representativos únicamente para este contexto geográfico y tipo de suelo cohesivo. Por lo tanto, se advierte que estas conclusiones no deben ser generalizadas a otros proyectos sin una validación previa, ya que la eficacia de la estabilización depende estrechamente del perfil estratigráfico y las propiedades de consistencia únicas de cada material analizado.

IV. CONCLUSIONES

El empleo del aditivo Soil Nano Stabilisation 360 permitió una reducción significativa de la expansión de los suelos cohesivos, disminuyendo los valores registrados en condición natural (1.43% a 4.8 %) hasta rangos comprendidos entre 0.04 % y 0.78 % en los suelos tratados, lo que evidencia una respuesta volumétrica estable frente a la acción del agua.

La dosificación de 0.045 % NLF y 1.5 % NPF presentó el desempeño más favorable, aumentado el CBR en 6.34 veces más que el suelo sin adición. Alcanzo valores de 37.40 % a 0.1 pulgadas y 33.70 % a 0.2 pulgadas, superando ampliamente el requisito mínimo del 6 % establecido por la normativa del MTC para subrasantes viales.

Los suelos del área de estudio, caracterizados por un contenido de finos superior al 50 % y clasificaciones A-4 y A-6 según AASHTO, mostraron un comportamiento mecánico limitado en estado natural; sin embargo, el tratamiento aplicado permitió incrementar la densidad seca máxima hasta 1.951 g/cm³ y reducir el contenido óptimo de humedad hasta 12.27 %, favoreciendo una compactación más eficiente y una menor dependencia del contenido de agua.

Los resultados del ensayo CBR a 0.1" y 0.2" mostraron una relación mecánica coherente, donde los valores asociados a mayor penetración resultaron ligeramente inferiores, confirmando la adecuada ejecución del ensayo y la consistencia del comportamiento del suelo tratado. En particular, la calicata C-06 presentó una elevación del CBR de 5.90 % a 37.40 %, equivalente a un aumento aproximado de 6.3 veces respecto al suelo natural, reflejando un incremento efectivo de la capacidad portante.

Desde el enfoque del diseño de pavimentos, los valores alcanzados de capacidad portante permiten optimizar el espesor estructural de las capas del pavimento, lo que se traduce en un uso más eficiente de materiales, reducción de costos de construcción y mantenimiento, y una alternativa técnicamente viable frente a métodos convencionales de estabilización de suelos en contextos similares.

REFERENCIAS

- [1] W. N. Gonzales Idrogo y E. Y. Menida Sánchez, "Influencia del aditivo Soil Nano Stabilisation 360 en la capacidad portante de suelos cohesivos de la subrasante del tramo Pucará – Pampa Grande, Chota, Cajamarca, 2024, Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2024", Cajamarca, 2024, pp. 1-20.
- [2] K. G. Aquino Chumbile, R. J. Patiño Padilla, J. F. Portal Espino y J. S. Yeckle Damian, "Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en Ciencias con mención en Ingeniería Civil", Lima, 2021.
- [3] A. . E. Espinoza Chuquino y J. J. Velásquez Pérez, «"Estabilización de suelos arcillosos adicioando Ceniza de Caña de Azúcar en el tramo de Pinar - Marian, Distrito de Independencia 2018",» Huaraz, 2019.
- [4] R. Ccansaya Maldonado y A. J. Tello Vargas, "Análisis comparativo entre los métodos de estabilización por sustitución y por adición de cal de obra, para el mejoramiento de una subrasante arcillosa en la carretera canta - huayllay km 57-59", Lima, 2022.
- [5] "Ministerio de Transporte y Comunicaciones", 2014.
- [6] "Manual de Estabilización de Suelos SNS 360", 2024.
- [7] M. Sosa, A. Caldo, F. Halles y G. Tenoux, «"Guía para la evaluación y selección de aditivos estabilizadores de materiales granulares y suelos en caminos de bajo tránsito: Caso Paraguay",» Asunción, Paraguay, 2019.
- [8] A. M. Mosa, A. H. Taher y L. A. Al-Jaber, «"Improvement of Poor Subgrade Soils Using Cement Kiln Dust",» Case Studies in Construction Materials, vol. 7, p. 138–143, 2017.
- [9] J. J. Guevara Camus, J. Villalobos Banda y L. Choque Flores, «"Estudio comparativo de los aditivos químicos Consolid 444 y Con-Aid para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos",» Gaceta Técnica, vol. 24, nº 2, pp. 92-104, 2023.
- [10] B. M. Das, "Principles of Geotechnical Engineering", Boston: Cengage Learning, 2016.
- [11] F. J. Estrada Arana y J. F. Pintado Estrada, «"Capacidad Portante (CBR) del Suelo del Sector 9 de Cajamarca, Incorporando 2%, 4% y 6% de Cal Hidratada, 4%, 6% y 8% de Cemento Portland Tipo I y 4%, 8% y 12% de Cloruro de Sodio",» Cajamarca, 2019.
- [12] R. J. J. Quispe Huaman y L. Rodríguez Huaman, "Mejoramiento del suelo arenoso y limoso con Cloruro de Sodio y Cal para sub rasante con pruebas de CBR-Cusco 2020", Lima, 2020.
- [13] A. J. Gómez Avila y E. E. Silva Navarro, "Influencia del aceite sulfonado y cemento Portland tipo I en la estabilización de la vía Huaylillas – Buldibuya en la provincia de Pataz, 2020", Trujillo, 2020.
- [14] V. R. Montoro Budinich, «"Análisis comparativo de estabilización química tradicional y no tradicional empleadas para suelos con fines de pavimentación Trujillo 2022",» Trujillo, 2023.