

Subgrade stabilization between the Ancos and El Porvenir highways, incorporating lime and cement in the district of Santa Rosa, Ancash

Edwar Jesus Paredes Bautista¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20207148@utp.edu.pe

Abstract– This study focuses on improving the subgrade stability of the highway between Ancos and El Porvenir, in the district of Santa Rosa, Ancash, by incorporating a lime and cement mixture to increase soil cohesion during the rainy season. The problem arises from the deterioration of the soil during wet seasons, which compromises the safe transit of people and vehicles. The main objective is to analyze the impact of stabilization on soil cohesion and bearing capacity, evaluating variations in the consistency limits and the California Bearing Rate (CBR). The methodology follows a quantitative and experimental approach, with laboratory tests using different percentages of lime and cement to measure changes in soil plasticity, density, and strength. Two representative soil types were selected: one sandy clayey soil and the other highly plastic. The results show that the addition of lime and cement reduces plasticity and significantly improves the CBR, especially in sandy clayey soils. However, in highly plastic soils, effectiveness is more limited, suggesting the need for complementary treatments to achieve significant improvements.

Keywords– Soil stabilization, lime, cement, CBR, subgrade, clayey soils.

Estabilización en subrasante entre carretera Ancos y El Porvenir incorporando cal y cemento en el distrito de Santa Rosa, Ancash, Perú

Edwar Jesus Paredes Bautista¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20207148@utp.edu.pe

Resumen– Este estudio se enfoca en mejorar la estabilidad de la subrasante de la carretera entre Ancos y El Porvenir, en el distrito de Santa Rosa, Ancash, mediante la incorporación de una mezcla de cal y cemento para aumentar la cohesión del suelo durante la temporada de lluvias. La problemática surge del deterioro del terreno en épocas húmedas, lo que compromete el tránsito seguro de personas y vehículos. El objetivo principal es analizar el impacto de la estabilización en la cohesión y capacidad de soporte del suelo, evaluando las variaciones en los límites de consistencia y el Índice de Soporte de California (CBR). La metodología sigue un enfoque cuantitativo y experimental, con pruebas de laboratorio utilizando diferentes porcentajes de cal y cemento para medir los cambios en la plasticidad, densidad y resistencia del suelo. Se seleccionaron dos tipos de suelos representativos: uno arcilloso-arenoso y otro altamente plástico. Los resultados muestran que la adición de cal y cemento reduce la plasticidad y mejora significativamente el CBR, especialmente en suelos arcilloso-arenosos. Sin embargo, en suelos altamente plásticos, la efectividad es más limitada, lo que sugiere la necesidad de tratamientos complementarios para lograr mejoras significativas.

Palabras clave-- Estabilización de suelos, cal, cemento, CBR, subrasante, suelos arcillosos.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos es fundamental en la ingeniería civil, especialmente en regiones expuestas a condiciones climáticas extremas que comprometen la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales. En el distrito de Santa Rosa, región de Ancash, la carretera que conecta las localidades de Ancos y El Porvenir sufre serios problemas durante la temporada de lluvias, cuando la saturación del suelo provoca una pérdida significativa de cohesión. Esta situación dificulta el tránsito de personas y vehículos, aumentando el riesgo de accidentes y afectando la conectividad de la zona. Ante esta problemática, la presente investigación propone el uso de estabilizantes como cal y cemento para mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante de esta vía, buscando incrementar su resistencia frente a las condiciones adversas. A través de un enfoque experimental, se analiza el efecto de estos materiales en indicadores clave como la plasticidad, la densidad seca máxima y el Índice de Soporte de California (CBR). Este enfoque tiene como objetivo no solo garantizar la transitabilidad en épocas de lluvia, sino también proporcionar soluciones sostenibles para la infraestructura vial de la región.

Este estudio buscó antecedentes de prácticas previamente realizadas. Manaviparast et al. [1] mencionan que la reutilización de residuos industriales, como las cenizas de cáscara de arroz y los lodos de cal, se ha convertido en una alternativa viable para la estabilización de suelos con presencia de arcillas. Por su parte, en [2] se describen estrategias que emplean estabilizadores concurrentes, como la cal, el cemento y las cenizas volantes, los cuales continúan siendo ampliamente utilizados para mejorar la resistencia de suelos expansivos, especialmente en obras de pavimentación. Sin embargo, Kumar et al. [3] destacan que, más allá de lograr una mejora inicial del terreno, resulta fundamental observar y analizar el comportamiento de los suelos estabilizados a lo largo del tiempo, particularmente frente a variaciones de humedad, dado que de ello depende la verdadera durabilidad de las obras. Tamiru et al. [4] subrayan que, en regiones donde predominan los suelos expansivos, este aspecto adquiere aún mayor relevancia, ya que la humedad puede provocar la hinchazón del suelo durante la temporada de lluvias, disminuyendo su cohesión y originando agrietamientos durante las épocas de sequía, afectando seriamente la estabilidad de las construcciones. Por otro lado, Shaji & Divya [5] y Abbood et al. [6] indican que las arcillas blandas presentan desafíos significativos debido a su baja resistencia y alta compresibilidad, factores que pueden provocar asentamientos desiguales y fallas estructurales. En estos casos, la adición de estabilizadores como el cemento y la cal contribuye a mejorar la capacidad del suelo para soportar cargas, reduciendo así los riesgos para la infraestructura.

El estudio se desarrolla en tres progresivas específicas de la carretera: 0+060, 3+760 y 5+380, donde se inspeccionan las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Posteriormente, se integra una mezcla de cal y cemento en proporción 2:1, en porcentajes del 8%, 9% y 10%, para evaluar la mejora de la estabilidad del suelo mediante ensayos de límites de consistencia, Proctor y CBR. Los resultados muestran que la adición de estabilizantes reduce la plasticidad y mejora la capacidad portante del suelo, especialmente en suelos arcilloso-arenosos. Sin embargo, en suelos altamente plásticos, la efectividad de la estabilización es limitada, lo que sugiere la necesidad de tratamientos complementarios. Este trabajo no solo busca resolver una problemática técnica, sino también contribuir al desarrollo sostenible de la región mediante la mejora de la infraestructura vial, facilitando el tránsito seguro y

reduciendo los riesgos asociados a las lluvias. Los hallazgos permitirán establecer parámetros de referencia para proyectos futuros en condiciones similares, garantizando soluciones prácticas y duraderas.

II. METODOLOGIA

La metodología empleada en este estudio es de tipo cuantitativa, basada en la recolección y análisis de datos obtenidos a través de ensayos de laboratorio y observaciones de campo, siguiendo normativas nacionales e internacionales. Este enfoque permite evaluar de manera objetiva los efectos de la estabilización del suelo mediante la adición de cal y cemento, asegurando la precisión y confiabilidad de los resultados.

De esta manera, se identificaron las progresivas representativas de la carretera entre Ancos y El Porvenir, ubicada en el distrito de Santa Rosa, Áncash. Se realizaron calicatas en tres puntos clave para extraer muestras de suelo, las cuales fueron sometidas a diversos ensayos de laboratorio. Estos ensayos permitieron caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, como granulometría, límites de consistencia, densidad seca máxima y capacidad portante, tanto en su estado natural como después de la estabilización.

Los procedimientos realizados incluyeron:

1) *Perfil Estratigráfico*: Se perforaron calicatas a cielo abierto para observar las características generales del suelo y recolectar muestras representativas para los ensayos posteriores [7].

2) *Prueba de Contenido de Humedad*: Se determinó el porcentaje de agua presente en las muestras de suelo en su estado natural, información esencial para evaluar su capacidad de compactación [8].

3) *Prueba de Análisis Granulométrico*: Este ensayo identificó la distribución de tamaños de partículas en el suelo, clasificándolo en arena, limo y arcilla, lo que permitió entender su estructura inicial [9].

4) *Evaluación de Límites de Consistencia*: Se determinaron el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice plástico (IP) del suelo, lo que permitió analizar su plasticidad y comportamiento frente a deformaciones [10].

5) *Ensayo Proctor Modificado*: Se evaluaron la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima del suelo bajo condiciones controladas de compactación, estableciendo las condiciones ideales para la estabilización [11].

6) *Índice de Soporte de California (CBR)*: Se midió la capacidad portante del suelo antes y después de la estabilización con cal y cemento, proporcionando datos clave para evaluar su resistencia frente a las cargas vehiculares [12].

A partir de los resultados obtenidos, se elaboraron análisis comparativos para evaluar la efectividad de las proporciones de cal y cemento utilizadas (8%, 9% y 10% en una relación 2:1). Estos análisis permitieron identificar la mejora en la capacidad portante del suelo y su impacto en la transitabilidad de la carretera. Las conclusiones derivadas de estos resultados ofrecen una base sólida para implementar soluciones de estabilización en la región, contribuyendo a la mejora de la infraestructura vial y la seguridad de los usuarios.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras extraídas de las calicatas representativas de la zona de estudio

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE CALICATAS

CALICATA	CLASIFICACIÓN (SUCS)	CLASIFICACIÓN (AASHTO)	CONTENIDO DE HUMEDAD %	CONTENIDO DE GRAVA %
01	SC	A-6 (5)	3.5	24.2
02	SC	A-6 (6)	4.1	24.9
03	CH	A-7-5 (20)	15	0

En la Tabla I se resumen las características iniciales de las muestras extraídas de las tres calicatas. De acuerdo con el sistema SUCS, las muestras de las calicatas 01 y 02 fueron clasificadas como SC (arcillas limosas y arenosas), mientras que la calicata 03 se clasificó como CH (arcilla de alta plasticidad). Según el sistema AASHTO, las calicatas 01 y 02 corresponden a la clasificación A-6, mientras que la calicata 03 pertenece a la categoría A-7-5, lo que evidencia su baja calidad como material de subrasante.

En términos granulométricos, las calicatas 01 y 02 presentan proporciones moderadas de grava (24.2%-24.9%) y arena (28%-29.8%), mientras que los finos constituyen aproximadamente el 46%. Por otro lado, la calicata 03 está compuesta casi en su totalidad por finos (99.4%) y muestra un contenido de humedad considerablemente mayor (15%) en comparación con las calicatas 01 y 02, que presentan contenidos de 3.5% y 4.1%, respectivamente.

TABLA II
RESULTADOS C-01. LÍMITES DE CONSISTENCIA E ÍNDICE PLÁSTICO

CALICATA	MUESTRA	LÍMITES DE CONSISTENCIA		ÍNDICE PLÁSTICO
		LIQUIDO	PLASTICO	
01	TERRENO NATURAL	38	21	17

En la Tabla II, se muestran los resultados obtenidos para los límites de consistencia, donde se registró un límite líquido de 38%, un límite plástico de 21% y un índice plástico de 17%, lo que confirma la clasificación del suelo como cohesivo y moderadamente plástico. Dado que las calicatas 01 y 02 presentan la misma clasificación según el sistema SUCS, los ensayos adicionales con la incorporación de cal y cemento se llevaron a cabo únicamente en la calicata 02, seleccionada como representación de esta categoría de suelo. En la Tabla II se resumen también los resultados del análisis de límites de consistencia para el terreno natural de la calicata 01.

TABLA III
RESULTADOS C-02. LÍMITES DE CONSISTENCIA E ÍNDICE PLÁSTICO CON % ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	LÍMITES DE CONSISTENCIA		ÍNDICE PLÁSTICO
		LÍQUIDO	PLÁSTICO	
02	TERRENO NATURAL	35	18	17
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	32	20	12
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	29	21	8
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	27	22	5

En la Tabla III se presentan los resultados de los límites de consistencia y el índice plástico del suelo natural, así como tras la estabilización con diferentes proporciones de cal y cemento en la calicata 02. En el terreno natural, los límites de consistencia registraron un límite líquido de 35%, un límite plástico de 18% y un índice plástico de 17%, lo que indica una plasticidad moderada.

- Con 8% de cal y 4% de cemento: El índice plástico se redujo a 12, con un límite líquido de 32% y un límite plástico de 20%.
- Con 9% de cal y 4.5% de cemento: El índice plástico disminuyó a 8, con límites de consistencia de 29% (líquido) y 21% (plástico).
- Con 10% de cal y 5% de cemento: Se obtuvo el menor índice plástico (5), con un límite líquido de 27% y un límite plástico de 22%.

Estos resultados evidencian que el incremento en las proporciones de cal y cemento mejora notablemente las propiedades del suelo, reduciendo su plasticidad. Esta reducción implica un comportamiento más estable y favorable para su uso como material de subrasante, ya que disminuye la susceptibilidad del suelo a deformarse bajo cargas.

TABLA IV
RESULTADOS C-03. LÍMITES DE CONSISTENCIA E ÍNDICE PLÁSTICO CON % ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	LÍMITES DE CONSISTENCIA		ÍNDICE PLÁSTICO
		LÍQUIDO	PLÁSTICO	
03	TERRENO NATURAL	65	30	35
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	54	33	21
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	52	35	17
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	49	37	12

En la Tabla IV se presentan los resultados de los límites de consistencia y el índice plástico del suelo en estado natural y tras la estabilización con diferentes proporciones de cal y cemento en la calicata 03. El suelo natural mostró un límite líquido de 65%, un límite plástico de 30% y un índice plástico de 35, lo que confirma su alta plasticidad y comportamiento poco favorable para su uso como material de subrasante.

Tras la estabilización, se observó una mejora considerable en las propiedades del suelo:

- Con 8% de cal y 4% de cemento: El límite líquido se redujo a 54% y el límite plástico aumentó a 33%, lo que disminuyó el índice plástico a 21.
- Con 9% de cal y 4.5% de cemento: El índice plástico se redujo a 17, con límites de consistencia de 52% (líquido) y 35% (plástico).
- Con 10% de cal y 5% de cemento: Se obtuvo el menor índice plástico (12), con límites de consistencia de 49% (líquido) y 37% (plástico).

Estos resultados demuestran que la adición de cal y cemento reduce la plasticidad del suelo, mejorando sus propiedades iniciales y convirtiéndolo en un material más estable para su uso en subrasante. No obstante, la plasticidad del suelo estabilizado en esta calicata sigue siendo relativamente alta en comparación con la calicata 02, lo que sugiere la posible necesidad de mayores proporciones de estabilizantes o combinaciones adicionales para alcanzar condiciones más óptimas.

TABLA V
RESUMEN EN C-02 DE VALORES DE PROCTOR MODIFICADO CON ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	PROCTOR	
		MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	HUMEDAD ÓPTIMA %
02	TERRENO NATURAL	2.094	10.3
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	1.995	11.3
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	1.976	11.7
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	1.952	12.1

En la Tabla V se presentan los resultados del ensayo Proctor Modificado realizado en la calicata 02. En estado natural, el suelo mostró una densidad seca máxima de 2.094 g/cm³ y un contenido de humedad óptima de 10.3%. Con la estabilización mediante la adición de cal y cemento, se observó una disminución progresiva en la densidad seca máxima, junto con un aumento en la humedad óptima:

- 8% de cal y 4% de cemento: Densidad seca de 1.995 g/cm³ y humedad óptima de 11.3%.
- 9% de cal y 4.5% de cemento: Densidad seca de 1.976 g/cm³ y humedad óptima de 11.7%.
- 10% de cal y 5% de cemento: Densidad seca de 1.952 g/cm³ y humedad óptima de 12.1%.

Estos resultados indican que la estabilización con cal y cemento incrementa la humedad necesaria para lograr la compactación óptima, mientras reduce ligeramente la densidad seca máxima. Este comportamiento evidencia un equilibrio entre la cohesión y la capacidad portante del suelo tratado, mejorando sus propiedades para su uso como subrasante.

TABLA VI
RESUMEN EN C-03 DE VALORES DE PROCTOR MODIFICADO CON ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	PROCTOR	
		MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	HUMEDAD ÓPTIMA %
03	TERRENO NATURAL	1.821	18.6
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	1.787	19.4
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	1.763	19.76
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	1.734	19.9

En la Tabla VI se presentan los resultados del ensayo Proctor Modificado para la calicata 03. En su estado natural, el suelo mostró una densidad seca máxima de 1.821 g/cm³ y un contenido de humedad óptima de 18.6%, característico de suelos arcillosos de alta plasticidad. Con la adición de cal y cemento, se observaron las siguientes tendencias:

- 8% de cal y 4% de cemento: Densidad seca de 1.787 g/cm³ y humedad óptima de 19.4%.
- 9% de cal y 4.5% de cemento: Densidad seca de 1.763 g/cm³ y humedad óptima de 19.76%.
- 10% de cal y 5% de cemento: Densidad seca de 1.734 g/cm³ y humedad óptima de 19.9%.

Estos resultados evidencian que la estabilización con cal y cemento incrementa la humedad necesaria para lograr la compactación óptima, mientras reduce ligeramente la densidad seca máxima. Este comportamiento refleja una mejora en las propiedades cohesivas del suelo, aunque implica la necesidad de mayor humedad para alcanzar una compactación eficiente.

TABLA VII
RESUMEN EN C-02 DE VALORES DE EXPANSIÓN CON ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	56 golpes		25 golpes		10 golpes	
		mm	%	mm	%	mm	%
02	TERRENO NATURAL	6.883	5.42	6.502	5.12	3.988	3.14
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	2.946	2.32	2.692	2.12	2.489	1.96
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	2.794	2.2	2.591	2.04	2.388	1.88
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	2.21	1.74	1.905	1.5	1.6	1.26

En la Tabla VII se presentan los valores de expansión del suelo de la calicata 02 bajo condiciones naturales y tras la estabilización con cal y cemento, evaluados a diferentes niveles de compactación (56, 25 y 10 golpes).

En su estado natural, el suelo mostró altos valores de expansión, alcanzando 6.883 mm (5.42%) con 56 golpes, 6.502 mm (5.12%) con 25 golpes y 3.988 mm (3.14%) con 10 golpes, lo que evidencia un comportamiento expansivo desfavorable.

Con la estabilización, se observó una reducción significativa en los valores de expansión:

- 8% de cal y 4% de cemento: Expansión de 2.946 mm (2.32%) con 56 golpes, 2.692 mm (2.12%) con 25 golpes y 2.489 mm (1.96%) con 10 golpes.
- 9% de cal y 4.5% de cemento: Expansión de 2.794 mm (2.2%), 2.591 mm (2.04%) y 2.388 mm (1.88%) para 56, 25 y 10 golpes, respectivamente.
- 10% de cal y 5% de cemento: Se alcanzaron los menores valores de expansión, con 2.21 mm (1.74%) para 56 golpes, 1.905 mm (1.5%) para 25 golpes y 1.6 mm (1.26%) para 10 golpes.

Estos resultados demuestran que el tratamiento con cal y cemento reduce de forma significativa la expansión del suelo, siendo más efectivo con mayores proporciones de estabilizantes. Esta mejora en la estabilidad volumétrica del

suelo lo hace más adecuado para su uso como subrasante en infraestructura vial.

TABLA VIII
RESUMEN EN C-03 DE VALORES DE EXPANSIÓN CON ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	56		25		10	
		mm	%	mm	%	mm	%
03	TERRENO NATURAL	15.773	12.42	15.291	14.04	14.453	11.38
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	6.833	5.38	6.68	5.26	6.02	4.74
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	6.299	4.96	5.639	4.44	5.029	3.96
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	5.906	4.65	4.953	3.9	4.445	3.5

En la Tabla VIII se presentan los valores de expansión del suelo de la calicata 03, tanto en su estado natural como tras la estabilización con cal y cemento, evaluados a diferentes niveles de compactación (56, 25 y 10 golpes). En el terreno natural, el suelo mostró altos valores de expansión, registrando 15.773 mm (12.42%) con 56 golpes, 15.291 mm (14.04%) con 25 golpes y 14.453 mm (11.38%) con 10 golpes, lo que evidencia un comportamiento altamente expansivo.

Con la estabilización, se observó una notable reducción en los valores de expansión:

- 8% de cal y 4% de cemento: Expansión de 6.833 mm (5.38%) con 56 golpes, 6.68 mm (5.26%) con 25 golpes y 6.02 mm (4.74%) con 10 golpes.
- 9% de cal y 4.5% de cemento: Expansión de 6.299 mm (4.96%), 5.639 mm (4.44%) y 5.029 mm (3.96%) para 56, 25 y 10 golpes, respectivamente.
- 10% de cal y 5% de cemento: Se obtuvieron los menores valores de expansión, con 5.906 mm (4.65%) para 56 golpes, 4.953 mm (3.9%) para 25 golpes y 4.445 mm (3.5%) para 10 golpes.

Estos resultados demuestran que la estabilización con cal y cemento reduce significativamente la expansión en suelos altamente plásticos como los de la calicata 03, mejorando su estabilidad volumétrica y haciéndolos más adecuados para su uso en infraestructura vial.

TABLA IX
RESUMEN EN C-02 DE VALORES CBR CON ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	CBR (M.D.S) 0.1"		CBR (M.D.S) 0.2"	
		100%	95%	100%	95%
02	TERRENO NATURAL	2.28	1.28	2.88	1.49
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	36.47	29.51	40.14	32.02
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	44.76	32.85	46.91	34.33
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	44.75	36.94	48.71	40.21

En la Tabla IX se presentan los valores del CBR para la calicata 02 en su estado natural y tras la estabilización con cal y cemento. En el terreno natural, el CBR mostró valores bajos, con un máximo de 2.88 al 100% de la densidad seca (M.D.S.)

y 0.2" de penetración, lo que refleja una limitada capacidad portante del suelo.

Con la estabilización, se registraron incrementos significativos en el CBR:

- 8% de cal y 4% de cemento: CBR máximo de 40.14 al 100% M.D.S.
- 9% de cal y 4.5% de cemento: CBR máximo de 46.91 al 100% M.D.S.
- 10% de cal y 5% de cemento: CBR máximo de 48.71 al 100% M.D.S.

Estos resultados confirman que la estabilización con cal y cemento mejora notablemente la capacidad portante del suelo, siendo más efectiva a mayores proporciones de estabilizantes, lo que hace que el suelo tratado sea más adecuado para su uso en obras de infraestructura.

TABLA X
RESUMEN EN C-03 DE VALORES CBR CON ADICIONES DE CAL Y CEMENTO

CALICATA	MUESTRA	CBR (M.D.S) 0.1"		CBR (M.D.S) 0.2"	
		100%	95%	100%	95%
03	TERRENO NATURAL	1.6	1.1	1.94	1.33
	Cal-Cemento "8 y 4 %"	11.68	8.97	11.93	9.17
	Cal-Cemento "9 y 4.5 %"	13.91	8.18	16.16	9.66
	Cal-Cemento "10 y 5 %"	19.92	13.7	25.04	16.47

En la Tabla X se presentan los valores de CBR para la calicata 03, evaluados en el estado natural y con diferentes proporciones de cal y cemento. En el terreno natural, los valores fueron bajos, alcanzando un máximo de 1.94 al 100% de la densidad seca (M.D.S.) y 0.2" de penetración, lo que evidencia una limitada capacidad portante del suelo.

Con la estabilización, se lograron mejoras significativas:

- 8% de cal y 4% de cemento: CBR máximo de 11.93 al 100% M.D.S.
- 9% de cal y 4.5% de cemento: CBR máximo de 16.16 al 100% M.D.S.
- 10% de cal y 5% de cemento: CBR máximo de 25.04 al 100% M.D.S.

Estos resultados muestran que la adición de cal y cemento incrementa sustancialmente la capacidad portante del suelo, siendo más efectiva con mayores proporciones de estabilizantes. La proporción de 10% de cal y 5% de cemento alcanzó los mejores valores, mejorando considerablemente la

estabilidad y resistencia del suelo tratado, haciéndolo más adecuado para fines de infraestructura vial.

IV. DISCUSIÓN

La estabilización de suelos mediante la adición de cal y cemento ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades mecánicas de suelos problemáticos, particularmente en la subrasante de la vía entre Ancos y El Porvenir. Esta técnica ha sido ampliamente documentada y respaldada por diversos estudios que coinciden en su capacidad para incrementar la resistencia, reducir la variabilidad volumétrica y optimizar el desempeño estructural de los suelos.

Por ejemplo, Carballo Rojas et al. [13] evaluaron la inclusión de fibras de PET recicladas en bases tratadas con cemento, evidenciando que es posible reducir el contenido de este aglutinante sin comprometer la resistencia mecánica, lo que representa una estrategia aplicable en la optimización de materiales en nuestros procesos constructivos. En la misma línea, Eisa et al. [14] analizaron la mejora de suelos débiles mediante aditivos como CKD y cal, obteniendo un incremento sustancial en la resistencia mecánica, en concordancia con el aumento en la capacidad portante observado en nuestro estudio. Por su parte, Hara et al. [15] alertaron sobre los efectos negativos del agua de mar en suelos estabilizados con cemento, subrayando la importancia de considerar la durabilidad a largo plazo en entornos húmedos, especialmente en zonas costeras o con alta salinidad. Este aspecto también fue abordado por Bakr [21], quien identificó una disminución en la resistencia estructural en presencia de sales, lo cual refuerza la necesidad de diseñar soluciones adaptadas a las condiciones ambientales del terreno.

Bakaiyang et al. [16] reportaron que la combinación de cal y cemento reduce significativamente la variabilidad volumétrica del suelo y mejora su capacidad de carga, hallazgos consistentes con el incremento del CBR registrado en nuestras pruebas. De forma complementaria, Lindh y Lemenkova [17] concluyeron que dicha combinación de aglutinantes optimiza la resistencia del suelo, lo cual se reflejó en nuestros resultados del ensayo Proctor modificado. En contextos locales, Mamani Gonzalo et al. [18] aplicaron con éxito una mezcla de ceniza de quinua y cal para estabilizar suelos arcillosos en la Vía del Lago Sagrado, proponiendo una alternativa sostenible y regionalmente accesible que podría ser explorada en futuras investigaciones. De igual forma, Meddah et al. [19] evidenciaron mejoras en la resistencia y ductilidad del suelo al incorporar cal, arena y fibras de polipropileno, con resultados que guardan similitud con la reducción de la densidad seca máxima observada en nuestras muestras tratadas. Con un enfoque en la sostenibilidad, Mohammed et al. [20] evaluaron la arcilla calcinada como material estabilizante, destacando su potencial para reducir las emisiones de CO₂, lo que aporta valor en el desarrollo de soluciones medioambientalmente responsables. En la misma

línea, Pastor et al. [23] demostraron que el uso de residuos de la industria de la piedra, junto con cal o cemento, mejora tanto la resistencia a la compresión como la microestructura del suelo, lo que se ve reflejado en nuestros ensayos de resistencia mecánica.

Otros estudios también han respaldado la eficacia de esta técnica en contextos específicos. Odar et al. [22] lograron mejoras significativas en la capacidad portante de subrasantes estabilizadas con cal en zonas de humedales, resultado coherente con nuestros valores de CBR. De igual manera, Rocha et al. [24] registraron incrementos en la resistencia mecánica en caminos forestales tratados con cal, lo que reafirma la efectividad de este estabilizante en distintos tipos de vía. Finalmente, Surita Gil et al. [25] compararon la estabilización con cemento Portland y emulsiones asfálticas en bases granulares, concluyendo que el cemento proporciona una mayor eficiencia estructural, resultado alineado con la reducción de espesores en nuestras bases estabilizadas.

En conjunto, estos antecedentes respaldan la viabilidad técnica y ambiental del tratamiento de estabilización propuesto, en consonancia con investigaciones que promueven soluciones sostenibles y eficientes para mejorar la durabilidad y el rendimiento de los suelos en infraestructura vial.

V. CONCLUSIONES

La investigación se centró en abordar el problema de inestabilidad de la subrasante en la carretera que conecta Ancos con El Porvenir, donde el suelo pierde cohesión durante la temporada de lluvias, afectando la transitabilidad y aumentando el riesgo de accidentes. Ante esta problemática, se evaluó la estabilización del suelo mediante la incorporación de cal y cemento en proporciones del 8%, 9% y 10%, logrando una mejora significativa en la capacidad portante del terreno y una reducción sustancial en su plasticidad.

Como primer paso, se identificaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo en tres progresivas representativas del tramo. En la progresiva 3+760, el suelo fue clasificado como arcilloso-arenoso, con un índice plástico del 17%, mientras que en la progresiva 5+380 se encontró un suelo altamente plástico, con un índice plástico del 35%, lo que evidenció una mayor necesidad de estabilización en esta última. Estos resultados iniciales permitieron enfocar los tratamientos según las características específicas del terreno en cada punto evaluado. Entre las combinaciones probadas, la mezcla compuesta por un 10% de cal y un 5% de cemento se mostró como la más eficaz, al lograr la mayor reducción en plasticidad y el incremento más significativo en la capacidad portante. Por ejemplo, en la progresiva 0+060, el valor de CBR aumentó de 2.28% a 48.71%, mientras que en la progresiva 5+380 pasó de 1.6% a 25.04%, lo que confirma que los suelos más plásticos requieren tratamientos más intensivos para alcanzar un rendimiento comparable al de suelos con menor plasticidad.

Además de la mejora en la resistencia, la estabilización permitió reducir de manera notable la expansión del suelo, lo cual es esencial para garantizar la estabilidad de la vía en condiciones de humedad. En la progresiva 0+060, la expansión disminuyó de 5.42% a 1.74%, mientras que en la progresiva 5+380 se redujo de 12.42% a 4.65%, confirmando que el tratamiento reduce significativamente la susceptibilidad del suelo a la humedad y su tendencia a expandirse. En conjunto, los resultados obtenidos validan que la estabilización con cal y cemento es una estrategia eficaz para mejorar las condiciones de suelos problemáticos, en particular aquellos con alta plasticidad. La técnica no solo incrementa la capacidad portante y reduce la expansión, sino que también contribuye a la seguridad y durabilidad de la infraestructura vial, especialmente durante la temporada de lluvias, al garantizar una subrasante más estable, uniforme y resistente.

REFERENCES

- [1] [1] H. R. Manaviparast, N. Cristelo, E. Pereira, and T. Miranda, "Una revisión exhaustiva sobre la estabilización del suelo arcilloso mediante cenizas de cáscara de arroz y lodo de cal", *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 5, pp. 2376, May 2025.
doi: <https://doi.org/10.3390/app15052376>
- [2] Jurnal Teknologi, "Comparative efficacy of conventional stabilizers in improving engineering behavior of expansive subgrades", *J. Teknol.*, vol. 87, no. 2, pp. 319–328, Feb. 2025.
doi: <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.22547>
- [3] P. Kumar et al., "Evaluación de la durabilidad de suelos estabilizados químicamente utilizando diferentes métodos susceptibles a la humedad", *Transp. Res. Rec.*, vol. 2678, no. 11, pp. 1454–1467, Nov. 2024.
doi: <https://doi.org/10.1177/03611981241244795>
- [4] T. Mebrate, E. Assefa, S. M. Assefa, and N. Z. Jilo, "Effect of heat treatment on geotechnical and microstructural properties of expansive soils", *Quat. Sci. Adv.*, vol. 17, pp. 100262, May 2025.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100262>
- [5] S. Shaji and P. V. Divya, "Sustainable ground improvement of soft clay using eggshell lime and rice husk ash", *Constr. Build. Mater.*, vol. 441, pp. 137460, Apr. 2024.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137460>
- [6] H. H. Abbood, S. M. Mearek, A. A. Naji, and P. A. Yurievich, "Estabilización de suelos arcillo-limosos como resultado de la mezcla de materiales", *AIP Conf. Proc.*, vol. 2864, no. 1, pp. 030014, 2024.
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0186294>
- [7] ASTM International, "ASTM D2487-17 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", *ASTM Book of Standards*, vol. 1, 2017.
doi: <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- [8] ASTM International, "ASTM D2216-19 Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass", *ASTM Book of Standards*, vol. 04.08, 2019.
doi: <https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- [9] ASTM International, "ASTM D422-63(2007) Standard test method for particle-size analysis of soils", *ASTM Book of Standards*, vol. 04.08, 2007.
doi: <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E01>
- [10] ASTM International, "ASTM D4318-17e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", *ASTM Book of Standards*, vol. 04.08, 2017.
doi: <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- [11] ASTM International, "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))", *ASTM Book of Standards*, vol. 04.08, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1520/D1557-12R21>
- [12] ASTM International, "ASTM D1883-21 Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils", *ASTM Book of Standards*, vol. 04.08, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1520/D1883-21>
- [13] M. Carballo Rojas, M. D. C. Gallardo Mejía, and M. Murillo Chacón, "Análisis de una base granular estabilizada con cemento y adición de fibras de PET reciclado", *Infraestructura Vial*, vol. 25, no. 44, pp. 1–9, Sep. 2023.
doi: <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.54855>
- [14] M. S. Eisa et al., "Improvement of weak subgrade soils using different additives", *Materials*, vol. 15, pp. 4462, Jun. 2022.
doi: <https://doi.org/10.3390/ma15134462>
- [15] H. Hara, K. Ikeda, and N. Yoshimoto, "Strength reduction mechanism of cement-treated soil under seawater environment", *Soils Found.*, vol. 64, pp. 101425, Feb. 2024.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101425>
- [16] J. Lemankreo et al., "Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, pp. e00626, Dec. 2021.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00626>
- [17] P. Lindh and P. Lemenkova, "Laboratory experiments on soil stabilization to enhance strength parameters for road pavement", *Trans. Telecommun.*, vol. 24, no. 1, pp. 73–82, Feb. 2023.
doi: <https://doi.org/10.2478/ttj-2023-0008>
- [18] G. Mamani Gonzalo, "Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú", *Infraestructura Vial*, vol. 25, no. 44, pp. 1–7, Jun. 2023.
doi: <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.53569>
- [19] A. Meddah, A. E. Goufi, and L. Pantelidis, "Improving very high plastic clays with the combined effect of sand, lime, and polypropylene fibers", *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 19, pp. 9924, Oct. 2022.
doi: <https://doi.org/10.3390/app12199924>
- [20] A. A. Mohammed et al., "Calcium-based binders in concrete or soil stabilization: Challenges, problems, and calcined clay as partial replacement to produce low-carbon cement", *Materials*, vol. 16, no. 5, Feb. 2020.
doi: <https://doi.org/10.3390/ma16052020>
- [21] G. Odar, D. Chavez, and M. Silvera, "Método de estabilización con cal en subrasantes para pavimentos rígidos diseñados por AASHTO 93 en proyectos viales con presencia de bofedales", in *Proc. LACCEI Int. Multi-Conf. Eng., Educ. Technol.*, Jul. 2019.
doi: <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.60>
- [22] J. L. Pastor, J. Chai, and I. Sánchez, "Strength and microstructure of a clayey soil stabilized with natural stone industry waste and lime or cement", *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 4, pp. 2583, Feb. 2023.
doi: <https://doi.org/10.3390/app13042583>
- [23] B. R. Phanikumar and R. Ramanjaneya Raju, "Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and

cement”, *Soils and Foundations*, vol.60, no.1, pp. 129-138, February 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.007>

[24]G. S. Rocha et al., “Effect of lime on the mechanical response of a soil for use in unpaved forest roads”, *Acta Sci. Technol.*, vol.42, no.1. pp. e44764, November 2019.
<https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v42i1.44764>

[25]L. Surita Gil et al., “Aporte estructural de capa base granular estabilizada con cemento Portland tipo I versus emulsión asfáltica catiónica para vías urbanas”, *Gaceta Técnica*, vol.24, no.2, pp. 4-22, July 2023.
<https://doi.org/10.51372/gacetatecnica242.2>