



ESTABILIDAD AL AGUA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON UN COMPUESTO EXPERIMENTAL

Universidad Del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática - 3747

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Director

Ph.D. Armando Orobio Quiñones

Codirector

Carlos Alberto Manrique Londoño

Por

José David Soto Giraldo

Santiago Salazar Flórez

2026



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarnos la fortaleza, la sabiduría y la claridad necesarias a lo largo de todo el camino. Por acompañarnos en cada paso, darnos serenidad en los momentos difíciles y permitir nuestro desarrollo académico y personal.

A nuestras familias, por su amor incondicional, su apoyo constante y la motivación que siempre nos ha impulsado a seguir adelante.

A nuestro director y codirector de tesis, por su orientación, sus enseñanzas, observaciones y acompañamiento para el desarrollo de este proyecto y para nuestra formación profesional.

A nuestros compañeros, por estar presentes durante este camino, por el compañerismo y el apoyo mutuo. Gracias por compartir esfuerzos, preocupaciones y también victorias.

A la Universidad del Valle, por formarnos como ingenieros civiles y por todos los espacios académicos, investigativos y humanos que hicieron posible el crecimiento profesional y personal.

A los integrantes del laboratorio de suelos por su apoyo y disposición en todas las actividades requeridas en este trabajo.



Resumen

La tesis titulada "Estabilidad al Agua de un Suelo Estabilizado con un Compuesto Experimental" se centró en abordar la problemática de las carreteras terciarias cuando hay presencia de agua; mediante la evaluación detallada de la estabilidad al agua de un suelo fino estabilizado con un compuesto químico experimental, con el propósito de ofrecer resultados y conclusiones valiosas para mejorar la eficacia de los estabilizantes no tradicionales en estas aplicaciones.

El objetivo principal de la investigación fue evaluar la estabilidad al agua de un suelo representativo de Santiago de Cali, estabilizado con un compuesto químico experimental. Se buscó entender cómo este estabilizante afecta la resistencia del suelo en vías terciarias, teniendo en cuenta la interacción con el agua y su capacidad para soportar las condiciones ambientales y el tránsito vehicular.

Para lograr este objetivo, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión inconfiada en muestras de suelo fino saturado con diferentes dosificaciones del estabilizante experimental. Esto permitió analizar y concluir sobre los efectos de las distintas dosificaciones analizadas con relación a la estabilidad al agua del suelo.



Abstract

The thesis titled "Water Stability Behavior of a Stabilized Soil with an Experimental Compound" focused on addressing the issue of tertiary roads in the presence of water. It involved a detailed evaluation of the water stability of fine soil stabilized with an experimental chemical compound. The purpose was to provide valuable results and conclusions to enhance the efficacy of non-traditional stabilizers in these applications.

The main objective of the research was to evaluate the water stability of a representative soil from Santiago de Cali, stabilized with an experimental chemical compound. The objective was to understand how this stabilizer affected soil resistance in tertiary roads, taking into account the interaction with water and its capacity to withstand environmental conditions and vehicular traffic.

To achieve this objective, unconfined compressive strength tests were carried out on saturated fine soil samples with different dosages of the experimental stabilizer. This approach allowed the analysis and formulation of conclusions regarding the effects of the different dosages evaluated in relation to the water stability of the soil.



Tabla de Contenido

1. Introducción	11
2. Planteamiento del Problema	13
2.1. Descripción	13
2.2. Formulación	17
2.3. Objetivos	17
2.3.1. Objetivo General	17
2.3.2. Objetivos Específicos.....	17
2.4. Justificación	17
3. Marco de Referencia	20
3.1. Definiciones y Marco Conceptual	20
3.1.1. Suelos	20
3.1.2. Clasificación de suelos.....	20
3.1.3. Granulometría	21
3.1.4. Clasificación AASHTO	21
3.1.5. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo	22
3.1.5.1. Suelo grueso.....	22
3.1.5.2. Suelo Fino	23
3.1.6. Estabilización de Suelo	24
3.1.7. Estabilización de suelos con Cemento	24
3.1.8. Estabilización Química de suelos	25
3.1.9. Silicato de Sodio	26
3.1.10. Permeabilidad	27
3.1.11. Estabilidad al agua	27



3.1.12.	Ensayo de compresión inconfiada	28
3.2.	Antecedentes	29
3.3.	Estado del Arte.....	36
4.	Metodología	40
4.1.	Fases y Productos.....	40
4.2.	Muestra de suelo natural	40
4.2.1.	Selección del material	40
4.2.2.	Propiedades físicas y mecánicas del suelo natural.....	42
4.2.3.	Distribución granulométrica	42
4.2.4.	Límites de consistencia	43
4.2.4.1.	Determinación del límite líquido de los suelos	43
4.2.4.2.	Determinación del límite plástico del suelo.....	43
4.2.5.	Relaciones humedad - peso unitario seco en los suelos.....	44
4.2.6.	Clasificación del tipo de suelo.	44
4.3.	Materiales del estabilizante no tradicional.....	45
4.3.1.	Silicato de sodio.....	45
4.3.2.	3.3.2 Cemento	45
4.3.3.	3.3.3 Hidróxido de sodio.....	45
4.4.	Determinación de dosificaciones	45
4.5.	Fabricación de las probetas remoldeadas.....	46
4.6.	Ensayo de compresión inconfiada	47
5.	Resultados y Análisis de Resultado	48
5.1.	Localización del material	48
5.2.	Características del suelo en estado natural.....	49



5.2.1.	Distribución Granulométrica	49
5.2.2.	Límites de consistencia y clasificación del suelo	51
5.2.3.	Relaciones de humedad y peso unitario.....	53
5.3.	Dosificaciones.....	54
5.3.1.	Dosificaciones preliminares (Etapa I de ensayos)	54
5.3.2.	Dosificaciones Preparatorias (Etapa II de ensayos).....	58
5.3.3.	Dosificaciones finales. (Etapa III de ensayos).....	61
5.3.4.	Mejor dosificación (Etapa IV de ensayos).....	68
5.4.	Índice de resistencia al agua	69
5.5.	Tipos de fallas en las probetas	70
5.6.	Comparación de resultados con estudios previos	71
6.	Propuesta para futuras investigaciones	73
6.1.	Máquina para evaluar muestras estabilizadas bajo carga dinámica.....	73
7.	Conclusiones	76
8.	Recomendaciones	78



Lista de tablas

Tabla 1 <i>Clasificación de suelos por el sistema AASHTO.</i>	21
Tabla 2 <i>Sistema unificado de clasificación de suelos.</i>	23
Tabla 3 <i>Cantidad de probetas para el ensayo por dosificación.</i>	30
Tabla 4 <i>Índice de resistencia al agua</i>	31
Tabla 5. <i>Metodología empleada</i>	40
Tabla 6. <i>Ensayos y normas empleados en la investigación</i>	42
Tabla 7 <i>Análisis de dosificaciones preliminares.</i>	56
Tabla 8 <i>Análisis de la resistencia a la compresión de diferentes dosificaciones (diseño experimental)</i>	59
Tabla 9 <i>Análisis de la resistencia a la compresión de dosificaciones finales a 7 días.</i>	62
Tabla 10 <i>Análisis de la resistencia a la compresión de dosificaciones finales a 28 días.</i>	63
Tabla 11 <i>Análisis de la resistencia a la compresión de dosificaciones finales a 28 días.</i>	68



Lista de figuras

Figura 1. <i>Estado de la red vial no pavimentada en Colombia (I semestre de 2025)</i>	13
Figura 2. <i>Tabulado del estado de la red vial para el año 2023.</i>	18
Figura 3. <i>Rangos de variación en el costo estimado de la estabilización</i>	19
Figura 4. <i>Gráfica de Plasticidad. Fuente: Libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Das, B. (2015)</i>	24
Figura 5 <i>Resistencia a la compresión inconfiada en probetas de suelo posterior a 7 y 28 días de curado</i>	31
Figura 6. <i>Resultados de la curva de compactación para diferentes concentraciones de NaOH.</i> 35	
Figura 7 <i>Microzonificación sísmica de Cali.</i>	41
Figura 8 <i>Zona de extracción de la muestra de suelo natural, Santiago de Cali, Valle del Cauca.</i>	48
Figura 9 <i>Material extraído in situ.</i>	49
Figura 10. <i>Tamices empleados para el análisis granulométrico.</i>	50
Figura 11. <i>Porcentajes de muestra obtenidos en ensayo granulométrico</i>	50
Figura 12 <i>Curva Granulométrica</i>	51
Figura 13 <i>Suelo en la cazuela de Casagrande, b. Muestra de suelo.</i>	51
Figura 14 <i>Determinación del límite plástico, b. Muestra de suelo al finalizar el ensayo.</i>	52
Figura 15 <i>Clasificación según la gráfica de la Carta de plasticidad de Casagrande.</i>	52
Figura 16 <i>Criterios de clasificación según la AASHTO</i>	53
Figura 17 <i>Realización del Ensayo normal de compactación</i>	54
Figura 18 <i>a. Probetas con las distintas dosificaciones, b. Probetas en prueba de inmersión con su clasificación por dosificación, c. Dosificaciones que cumplieron los criterios de la prueba.</i>	55



Figura 19 Resistencia a la compresión inconfínada de probetas finales a 7 días de curado.	60
Figura 20 Resistencia a la compresión inconfínada de probetas finales a 7 días de curado.	60
Figura 21 Porcentaje de humedad de los testigos de la etapa II de ensayos.	61
Figura 22 Resistencia a la compresión inconfínada de probetas finales a 7 días de curado.	64
Figura 23 Resistencia a la compresión inconfínada de probetas finales a 28 días de curado.	65
Figura 24 Resistencia a la compresión inconfínada de probetas finales a 7 y 28 días de curado.	66
Figura 25 Porcentaje de humedad de los testigos de la etapa III de ensayos	67
Figura 26 Resistencia a la compresión inconfínada de la mejor dosificación tras 28 días de curado.	69
Figura 27 Tipología de fallas en el ensayo de resistencia a la compresión inconfínada de muestras de suelo estabilizadas con productos químicos no tradicionales INV E 632-22	71
Figura 28 Planos estructurales de la máquina para el diseño preliminar	74



1. Introducción

Un suelo se considera estable cuando posee la resistencia suficiente para no sufrir grandes deformaciones, además debe de conservar estas propiedades a través del tiempo y no tener excesiva pérdida de resistencia por acción de las condiciones climáticas y tránsito de vehículos.

Un suelo natural puede tener la composición granulométrica, la plasticidad y el grado de humedad adecuado, para que, siendo únicamente compactado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como cimentación de una vía o camino. No obstante, si no se logra un adecuado equilibrio entre el rozamiento inter-partículas y su adhesión, no se tendrá la estabilidad esperada. Por tanto, la estabilización de un suelo es un proceso que permite mejorar la calidad del suelo natural para obtener unas características físicas, químicas y mecánicas estables en relación con las condiciones medioambientales de servicio.

La infraestructura vial en Colombia demanda materiales de calidad, pues existen diversos retos en distintos tipos de suelos, es por eso que surgen soluciones a estas problemáticas por medio de la implementación de la estabilización de suelos, y para esto, se utilizan diferentes agentes estabilizantes, como lo pueden ser el asfalto, cemento, cal y estabilizantes no tradicionales (Alarcón, 2010).

El mejoramiento de los suelos por medio de la adición de compuestos estabilizantes ha generado un gran impulso en el campo de la investigación, pues con estos procesos de estabilización puede alterarse una o más propiedades del suelo, como: controlar la expansión,



incrementar la resistencia, reducir la plasticidad, disminuir la permeabilidad, prevenir la erosión, entre otras propiedades.

Si bien se han desarrollado varios estudios e investigaciones sobre los estabilizantes; aún se evidencian problemas en las obras, específicamente en obras de carreteras terciarias, donde los estabilizantes juegan un papel fundamental en la conformación de éstas.

Es por esto que para esta investigación nos enfocamos en algunos de los problemas presentados en las carreteras terciarias en las cuales se han empleado estabilizantes no tradicionales para mejorar la resistencia de los suelos y convertirlos en materiales apropiados para la construcción de carreteras, capaces de soportar los efectos del tránsito y del ambiente con una buena durabilidad (Rivera, 2020).

Teniendo en cuenta los problemas a enfocarse y el contexto de ellos; en el presente Trabajo de investigación se realizaron los ensayos y sus respectivos análisis para conocer el comportamiento de la estabilidad al agua de un suelo característico de la ciudad de Santiago de Cali con un estabilizante, con el fin de evaluar la resistencia de los suelos en vías terciarias a la acción destructiva del agua.

Para ello se desarrollaron varios ensayos de resistencia a la compresión confinada de muestras de suelo fino saturado con adición de un estabilizante experimental con diferentes dosificaciones para poder comparar sus comportamientos y concluir sobre esto. Este estabilizante empleado, es un estabilizante no tradicional de silicato de sodio que fue anteriormente estudiado en la tesis de Cerón y Cuellar (Escuela de ingeniería civil y geomática, Universidad del Valle, 2023).



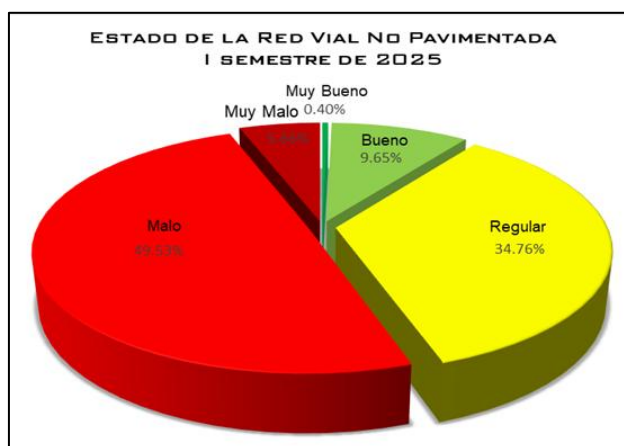
2. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción

A lo largo del tiempo se han solucionado los problemas de estabilización que se deben a las condiciones desfavorables en la subrasante, especialmente en las zonas donde se encuentra suelo fino como arcillas o limos, aplicando distintos tipos de estabilizantes tradicionales como lo son el cemento, la cal, escorias, cenizas volantes y otra cantidad de productos comerciales que ayudan a mejorar las características del suelo, sin embargo, en algunos proyectos muchas veces es inviable utilizar este tipo de productos debido a su alto costo, por lo que recurren a estabilizantes no tradicionales. A pesar de su ventaja económica, los estabilizantes no tradicionales, son materiales de los cuales no se conoce totalmente sus propiedades y hace falta mayor investigación para poder definir su comportamiento en servicio.

Figura 1.

Estado de la red vial no pavimentada en Colombia (I semestre de 2025)



Nota. Tomado de INVIAS, 2025



En Colombia, el estado de las vías no pavimentadas no es precisamente alentador. Según INVIAS, más de la mitad de los 1923,07 de kilómetros de carreteras sin pavimentar, se encuentran en mal o muy mal estado, como se puede observar en la figura 1 (INVIAS, 2025). Este dato es el reflejo de los diversos problemas que se presentan en este tipo de vías, sin embargo, teniendo en cuenta que Colombia encabeza la lista de los países con mayor precipitación al año, uno de los problemas y retos más comunes en estas carreteras terciarias es cuando hay presencia de agua, debido a que el suelo disminuye su capacidad para soportar cargas. Es por esto la importancia de conocer si el estabilizante empleado va a influir en el suelo de la misma manera en condiciones saturadas como no saturadas, y de esta manera asegurarse que el suelo de la vía va a permanecer con las propiedades óptimas para soportar su demanda de tráfico sin importar las condiciones ambientales y climáticas.

La norma ASTM D4609, la cual evalúa el potencial de los productos utilizados para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, en su apartado 8.1.4 indica que "cualquier producto que consiga un incremento de 345 kPa de la resistencia a compresión del suelo y, además que garantice que, al sumergir las probetas en agua éstas no pierdan significativamente su resistencia, puede considerarse apto para la estabilización" (Rivera, 2020).

La norma colombiana no tenía ningún tipo de restricción o control en el uso de estabilizantes no tradicionales y no fue sino hasta el 2022 que la norma colombiana en las especificaciones de INVIAS (Art. 237) empezó a regular el problema de los efectos del agua en los suelos estabilizados con productos no tradicionales, estableciendo que "Si la capa de suelo de subrasante o material existente a estabilizar pretende ser usada con fines estructurales, esta debe



ser resistente a los efectos del agua y presentar una durabilidad comprobada a los efectos climáticos y del tránsito a lo largo del periodo de diseño de la estructura”. Dentro de este artículo, se especifican los ensayos que se deben reportar y para el problema de la estabilidad al agua se debe reportar el ensayo mecánico de índice de resistencia al agua, el cual está definido como la relación porcentual entre las resistencias a la compresión posterior al proceso de inmersión o ascensión capilar y la correspondiente en estado seco; este porcentaje debe ser mayor o igual al 90% para que el suelo estabilizado pueda emplearse en propósitos estructurales.

Ecuación 1: *Índice de resistencia al agua.*

$$IRA (\%) = \frac{\text{Resistencia a la compresión posterior a la inmersión o capilaridad}}{\text{Resistencia a la compresión en estado seco}} * 100$$

IRA ≥ 90% criterio de aceptación para capas de suelo diseñadas con propósitos estructurales

Nota. El índice de resistencia al agua únicamente se reporta si existen propósitos estructurales (INV E 632, 2022).

En el contexto de la construcción de infraestructuras en Colombia, un país conocido por su diversidad climática y abundantes lluvias en muchas regiones, la elección de estabilizantes químicos no tradicionales adquiere una relevancia excepcional. Para garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de las vías y estructuras en un entorno de constantes precipitaciones, es esencial llevar a cabo investigaciones más profundas sobre la aplicación de estos estabilizantes en suelos finos locales.

Una investigación como la presentada en este estudio, que involucra ensayos de resistencia a la compresión inconfiada y análisis del comportamiento de diferentes dosificaciones de un estabilizante no tradicional de silicato de sodio en muestras de suelo fino,



proporciona valiosa información sobre su idoneidad en condiciones climáticas colombianas. La realización de ensayos de resistencia en condiciones de saturación de las muestras en agua (INV E-632) permiten simular las condiciones de abundantes lluvias y evaluar cómo los estabilizantes responden ante estos desafíos climáticos.

Este estudio permitirá a los ingenieros y profesionales de la construcción contar con más información y evidencia técnica para la toma de decisiones al seleccionar los estabilizantes más adecuados para proyectos ubicados en zonas lluviosas de Colombia. Asimismo, constituye una oportunidad para la innovación y el desarrollo de técnicas de estabilización adaptadas a las condiciones climáticas del país. La implementación de estabilizantes que han demostrado resistencia al agua y capacidad para mantener su integridad estructural en condiciones extremas permitirá mejorar significativamente la calidad y la vida útil de las infraestructuras, así como reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

Finalmente se resalta la importancia de la realización de investigaciones con estabilizantes químicos no tradicionales en Colombia, pues son esenciales para adaptar las técnicas de construcción a las condiciones climáticas específicas del país.



2.2. Formulación

¿Cómo es la estabilidad al agua de un suelo fino, tratado con una mezcla de un compuesto químico experimental, en condiciones saturadas?

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General

Evaluar la estabilidad al agua de un suelo fino estabilizado, con adición de un compuesto químico experimental, en condiciones saturadas.

2.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el suelo y seleccionar el estabilizante a utilizar en la investigación.
- Desarrollar dosificaciones de suelo que sean estables al agua.
- Evaluar la resistencia del suelo en condiciones de saturación.

2.4. Justificación

En Colombia, las rutas terciarias representan una vital importancia para el desarrollo económico y social del país, pues son un medio de comunicación entre las zonas rurales y las zonas productoras agrícolas. No obstante, algunas de estas rutas se encuentran en un estado deplorable debido a la falta de mantenimiento, control e inversión en la infraestructura vial. Según el reporte del estado de la Red Vial de INVIAS del semestre pasado, se logra evidenciar que el 18.03% de las vías del país se encuentran sin pavimentar, y aproximadamente el 90% de estas vías sin pavimentar, se encuentran entre un estado regular y muy malo.



Figura 2.
Tabulado del estado de la red vial para el año 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS SUBDIRECCIÓN PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA													jul-25
TERRITORIAL	PAVIMENTADO (KMS)					SIN PAVIMENTAR (KMS)					RED TOTAL CALIFICADA		
	BIENESTAR	REGULAR	DEGRADADO	NO CLASIFICADO	TOTAL	BIENESTAR	REGULAR	DEGRADADO	NO CLASIFICADO	TOTAL	BIENESTAR	DEGRADADO	TOTAL
ANTIOQUIA	47.96	173.72	218.44	181.91	1.32	0.00	0.00	6.04	0.00	0.00	623.35	6.04	629.39
ATLÁNTICO	5.51	28.04	6.60	4.96	0.00	0.00	5.32	16.14	17.64	0.00	45.10	39.10	84.20
BOLÍVAR	9.17	55.66	70.95	24.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	159.73	0.00	159.73
BOYACÁ	21.86	256.88	341.83	201.22	0.00	0.00	0.20	34.19	92.48	24.73	621.78	151.60	973.39
CALDAS	29.88	100.47	43.89	9.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	184.16	0.00	184.16
CAQUETÁ	156.50	57.95	81.45	97.31	0.00	4.33	21.03	5.81	21.07	0.98	393.21	53.22	446.43
CASANARE	0.00	47.12	318.59	196.52	7.30	1.00	9.74	26.16	1.81	0.00	571.53	36.51	610.05
CAUCA	48.41	205.05	222.24	137.11	0.40	0.00	12.84	166.18	406.81	9.43	611.21	595.31	1,206.52
CEPESAR	45.72	177.69	88.68	53.55	8.45	0.00	0.00	9.60	7.00	0.12	374.07	16.72	390.80
CHOCÓ	40.01	131.56	28.20	10.46	0.00	0.00	8.02	29.95	11.79	16.48	210.23	68.25	278.47
CÓRDOBA	33.52	92.47	99.26	47.35	0.00	0.00	7.47	7.80	1.32	0.00	272.61	16.58	289.19
CUNDINAMARCA	14.88	127.29	161.48	79.15	0.00	0.00	0.00	9.10	19.94	0.30	362.78	29.34	412.13
GUAJIRA	12.31	133.99	13.33	3.97	0.00	0.00	7.30	0.00	3.26	0.00	163.59	10.56	174.15
HUILA	29.92	73.73	68.95	99.97	0.00	0.95	22.55	40.60	134.56	0.00	272.56	198.66	471.22
MAGDALENA	8.18	36.86	99.34	26.80	3.01	0.00	0.00	8.44	40.01	35.35	166.18	83.81	249.99
META	66.55	190.31	121.17	52.87	0.00	0.00	52.65	88.19	85.39	0.00	430.90	226.23	657.13
MARINÓ	153.59	312.68	177.31	71.87	2.02	0.00	0.00	1.00	1.24	10.32	717.27	12.58	729.85
N. DE SANTANDER	0.98	113.09	144.70	163.34	1.87	0.00	0.00	52.17	52.87	8.39	423.97	113.43	537.40
PUTUMAYO	107.68	31.31	19.40	5.06	0.00	0.00	35.99	61.05	20.33	0.07	163.44	117.43	280.87
QUINDÍO	91.02	21.17	30.10	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	148.29	0.00	148.29
RISARALDA	40.15	94.95	70.63	23.15	0.00	0.00	0.28	16.00	3.94	0.00	228.88	20.20	249.08
SANTANDER	6.72	237.75	298.62	152.21	4.10	1.49	2.23	88.18	29.86	0.57	699.60	122.34	821.94
SUCRE	4.94	56.30	43.43	34.75	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	139.51	0.00	139.51
TOLIMA	7.95	73.16	37.63	1.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	120.58	0.00	120.58
VALLE	4.88	76.49	91.66	41.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	214.14	0.00	214.14
OCANA	0.00	45.55	51.40	54.95	5.33	0.00	0.00	1.84	1.33	0.00	157.23	3.17	160.40
S. ANDRÉS y PROV.	14.26	12.76	11.57	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.60	0.00	45.60
TOTAL RED VIAL	991.43	2,963.97	2,960.11	1,791.24	9.45	7.78	185.96	661.46	952.46	160.78	8,741.52	1,923.07	10,664.59
	11.34%	33.91%	33.86%	21.49%	0.45%	0.40%	9.65%	34.76%	49.53%	5.60%	81.97%	18.03%	

Nota. Tomado de INVIAS, 2025.

La situación que se presenta es crítica y, en muchos casos, debido a la falta de intervención adecuada, se implementan soluciones provisionales a la problemática por parte de los propios habitantes. Esta situación genera, especialmente durante las épocas de lluvia, procesos de erosión asociados a la escorrentía superficial, que afectan el afirmado cuando este no se encuentra adecuadamente compactado o no ha sido objeto de un proceso de intervención y mantenimiento continuo.

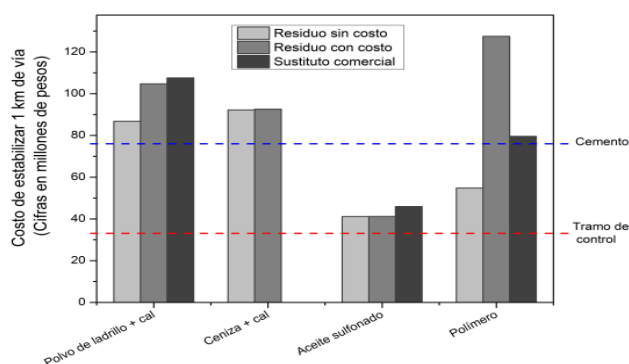
La estabilización de suelos tiene como objetivo mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, así como su durabilidad y resistencia al agua. Lo anterior evidencia la necesidad de implementar estos métodos con el fin de mejorar las condiciones de las carreteras terciarias en el país. Adicionalmente, existen evidencias de que la utilización de ciertos estabilizantes puede resultar más costo-efectiva que los métodos tradicionales. En el municipio de Urrao, Antioquia, por ejemplo, se desarrolló una investigación en la que se evaluaron diversos



agentes estabilizadores, demostrando que algunos estabilizantes alternativos a los más utilizados pueden constituir una mejor opción, considerando que su costo operativo y de materiales es significativamente menor.

Figura 3.

Rangos de variación en el costo estimado de la estabilización



Nota. Tomado de (Martínez-Murillo, L. I., & Olaya-Morales, Y., 2019)

Por todo lo anterior, la presente investigación reviste una alta relevancia para el Estado colombiano, la academia, los ingenieros, los consorcios y las empresas constructoras vinculadas a proyectos viales, principalmente, las comunidades que dependen del adecuado estado de las vías para mejorar su calidad de vida. El uso de estabilizantes no convencionales se ha propuesto como una alternativa potencialmente más económica para la solución de problemas en las carreteras terciarias, ya que no solo permite mejorar las propiedades mecánicas y físicas como lo hacen los estabilizantes convencionales, sino que también puede constituir un nuevo referente de estudio para entidades como el Instituto Nacional de Vías Regionales (INVIR), orientadas a la preservación de la integridad de la red vial terciaria del país, la cual conecta incluso a los principales sectores productivos.



3. Marco de Referencia

3.1. Definiciones y Marco Conceptual

Para el mejor entendimiento del estudio realizado, se presenta el marco conceptual y las definiciones de los conceptos que se utilizan en el presente documento.

3.1.1. Suelos

Para Cid L, et al. 2006

El suelo se define como un sistema disperso, heterogéneo, poroso y está compuesto por tres fases distintas: la fase sólida, que constituye la matriz del suelo; la fase líquida, que es el agua del suelo y que contiene diversas sustancias disueltas, conocida como solución del suelo; y la fase gaseosa, que es la atmósfera del suelo.

3.1.2. Clasificación de suelos

En el ámbito de la ingeniería de suelos, es fundamental clasificar los suelos con propiedades similares en grupos y subgrupos, tomando en consideración sus características mecánicas y su comportamiento. Estos sistemas de clasificación sirven como herramientas que proporcionan un vocabulario estandarizado para describir de manera precisa las propiedades generales de los suelos, que, debido a su gran diversidad, resultan difíciles de abordar mediante descripciones detalladas individuales.

Actualmente, dos sistemas de clasificación ampliamente utilizados en ingeniería se basan en la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos, siendo estos AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelo). (Das, B. 2015)



3.1.3. Granulometría

La técnica de análisis granulométrico se emplea extensamente para determinar la distribución por tamaño de las partículas de los áridos finos y gruesos mediante el uso de tamices, (ASTM C 136- 01) siendo crucial para establecer su clasificación y comprender sus propiedades mecánicas y geotécnicas.

3.1.4. Clasificación AASHTO

Tabla 1

Clasificación de suelos por el sistema AASHTO.

CLASIFICACIÓN GENERAL	SUELOS GRANULARES Pasa tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200) hasta el 35%							SUELOS ARCILLOSO - LIMOSO Pasa tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200) más del 35%			
CLASIFICACION POR GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5
											A - 7 - 6
Ensayo de tamizado por vía húmeda. Porcentaje que pasa por:											
Tamiz de 2mm. N°10	Máx. 50										
Tamiz de 425µm. N°40	Máx. 30	Máx. 50	Min. 51								
Tamiz de 75µm. N°200	Máx. 15	Máx. 25	Máx.10	Máx. 35	Máx. 35	Máx. 35	Máx. 35	Min. 35	Min. 35	Min. 35	Min. 35
Características de la fracción que pasa por tamiz IRAM 425 micrómetros N° 40											
Límite Líquido	-	-	-	Máx. 40	Min. 41	Máx. 40	Min. 41	Máx. 40	Min. 41	Máx. 40	Min. 41
Índice de plasticidad	Máximo 6		No plast.	Máx. 10	Máx. 10	Min. 11	Min. 11	Máx. 10	Máx. 10	Min. 11	Min. 11
Constituyentes principales de tipos más comunes	Fragmentos de rocas, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas arcillosas limosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Comportamiento General Como Subrasante	Excelente a bueno						Regular a pobre				

Nota. Fuente (AASHTO M 145)



Según el sistema de clasificación AASHTO, los suelos son categorizados en siete grupos principales, designados como A-1 a A-7. Los suelos asignados a los grupos A-1, A-2 y A-3 son predominantemente de naturaleza granular, caracterizados por tener un porcentaje igual o inferior al 35% de partículas que pasan a través del tamiz número 200. Por otro lado, aquellos suelos en los que más del 35% de las partículas atraviesan dicho tamiz son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 y estos últimos se componen mayormente de limo y materiales arcillosos. (Das, B. 2015). En la Tabla 1, se logra observar los distintos criterios de estudio para poder clasificar el suelo en las distintas categorías anteriormente mencionadas.

3.1.5. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo

El sistema de clasificación aborda tanto los suelos gruesos como los finos, diferenciándolos mediante el cribado a través de la malla número 200, donde las partículas gruesas son aquellas de tamaño superior a dicha malla, mientras que las finas son aquellas de tamaño inferior. Se considera que un suelo es grueso si más del 50% de sus partículas son de tamaño grueso, y fino si más de la mitad de sus partículas, en términos de peso, son de tamaño fino. (Badillo, E., Rodriguez, A. 1973).

3.1.5.1. Suelo grueso

Como primera categoría, están los suelos de textura gruesa, compuestos mayormente por grava y arena en su estado natural, con menos del 50% de partículas que pasan a través del tamiz de 75 μ m N°200. Estos suelos se identifican mediante símbolos de grupo que comienzan con los prefijos G o S, donde G denota suelo de grava o grava, y S representa arena o suelo arenoso. (Das, B. 2015)



3.1.5.2. Suelo Fino

La otra categoría de clasificación son los suelos de textura fina, estos se caracterizan por tener un 50% o más de partículas que pasan por el tamiz de 75µm N°200. Estos suelos se designan con símbolos de grupo que inician con el prefijo M, indicando limo inorgánico, C para arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. Además, se emplea el símbolo Pt para describir turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos. Aparte de esto, también se emplean otros prefijos con relación a las propiedades de los suelos, siendo: (W= bien graduado, P= mal graduado, L= Baja plasticidad y H= alta plasticidad) (Das, B. 2015)

Tabla 2
Sistema unificado de clasificación de suelos.

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de Grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Mas de 50% de fracción gruesa reternida en tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a	$C_u \geq 4$ y $2 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GW GP
		Gravas con finos Mas de 12% finos ^{a,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de la línea "A"(Figura 5) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de la línea "A" (Figura 5)	GM GC
	Arenas 50% o más de fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos ^b	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SW SP
		Arenas con finos Mas de 12% finos ^{b,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de la línea "A" (Figura 5) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de la línea "A" (Figura 5)	SM SC
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ o gráficos por debajo de la línea "A" (Figura 5) $PI < 4$ y gráficos en o por encima de la línea "A" (Figura 5)	CL ML
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; Vea la figura 5; Zona OL	OL
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de la línea "A" (Figura 5) Gráficos PI por debajo de la línea "A" (Figura 5)	CH MH
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; Vea la figura 5; Zona OH	OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt

^a Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^b Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

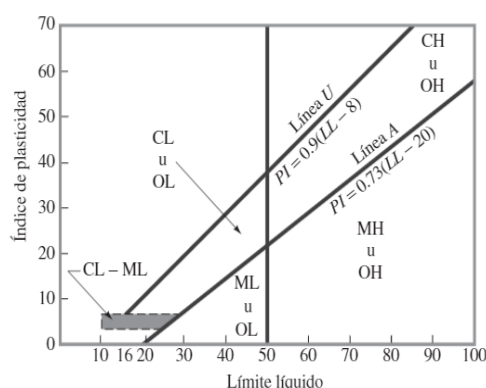
^d Si $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 5, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^e Si $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 5, se usa doble símbolo CL-ML.

Nota. Fuente - Libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. (Das, B. 2015)

Figura 4.

Gráfica de Plasticidad. Fuente: Libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Das, B. (2015)



3.1.6. Estabilización de Suelo

Según López-Lara, Teresa, et al. (2010)

Las estabilizaciones son procedimientos físicos o químicos que nos permiten modificar las características de un suelo con la finalidad de mejorar su comportamiento en cuanto a resistencia y deformación. Dentro de los diferentes tipos de estabilización empleados hoy en día, podemos encontrar estabilización mecánica, física, química y biológica.

3.1.7. Estabilización de suelos con Cemento

Según Jurado, Clavijo (2016)

El suelo modificado con cemento consiste en una mezcla de suelo pulverizado, cemento y agua, cuya interacción permite alterar las propiedades físicas y mecánicas del material, así como



mejorar las características relacionadas con durabilidad, la permeabilidad y la resistencia. Este tipo de estabilización modifica la estructura del suelo mediante procesos físicos y químicos que incrementan su desempeño como material de soporte.

La estabilización de suelos con cemento constituye un método ampliamente documentado en la literatura técnica, cuyos orígenes se remontan a 1917, año en el que se patentó el primer procedimiento de mejoramiento y estabilización de suelos mediante la incorporación de cemento en proporciones variables. (Montejo, 2002)

En el contexto colombiano, la estabilización de suelos mediante cemento se encuentra regulada por las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). El desempeño de este tipo de tratamiento depende de múltiples variables, entre las cuales se destacan la dosificación del cemento respecto al suelo, el contenido óptimo de humedad, el periodo de curado y las propiedades geotécnicas del material natural. Estas propiedades incluyen la distribución granulométrica, los límites de consistencia y el índice de plasticidad, factores que influyen directamente en la respuesta mecánica del suelo estabilizado.

Desde el punto de vista práctico, la aplicación de cemento como agente estabilizante resulta más adecuada en suelos con bajo contenido de materia orgánica, dado que este tipo de materiales presenta una mayor compatibilidad con los procesos de cimentación y, en consecuencia, un comportamiento estructural más favorable frente a las exigencias de servicio.

3.1.8. Estabilización Química de suelos

Según Rivera, et al. (2020)



La estabilización química es una técnica utilizada en diversos tipos de suelos con el fin de mejorar sus propiedades geotécnicas. Esto se logra alterando las propiedades físico-químicas del suelo nativo para mitigar problemas como la inestabilidad volumétrica o aumentar la resistencia y durabilidad. Los materiales comúnmente utilizados incluyen cemento, cal, residuos industriales y otros como el cloruro de sodio o el cloruro de calcio. La selección del estabilizante depende del tipo de suelo, las necesidades de mejora y consideraciones ambientales y económicas.

3.1.9. Silicato de Sodio

El silicato de sodio es un nombre que se ha vuelto común para referirse al metasilicato de sodio, conocido como Na_2SiO_3 , o también conocido como vidrio soluble o vidrio líquido.

Se ha investigado el uso del silicato de sodio en el ámbito geotécnico, y ha demostrado una gran efectividad cuando se tratan suelos débiles, (Kiuna, 2023) aumentando la resistencia y durabilidad de suelos arenosos y limosos, pero solamente logran aumentar la fuerza de suelos de arcilla estabilizados con otros componentes a corto plazo. (Hosseini, 2012) En el campo de la estabilización de suelos, este compuesto químico se reconoce como un compuesto estabilizante no tradicional.

Cuando se utiliza este componente para estabilización de suelos, se ha logrado evidenciar que dependiendo de las dosificaciones se disminuye la ductilidad y aumenta ligeramente la resistencia a la compresión uniaxial. Eso implica que el uso de este material para los métodos de mejora de suelos en proyectos de construcción es una alternativa económicamente viable. (Pouya Javadzadeh, 2021).



3.1.10. Permeabilidad

Según Das,b (2015) y Tensar International, s.f.

La permeabilidad del suelo representa la capacidad de un material geotécnico para permitir el flujo de agua a través de su estructura porosa, propiedad que depende de la configuración interna del suelo y de la interacción entre sus partículas. Este comportamiento hidráulico se encuentra condicionado por factores como la granulometría, la distribución y conectividad de los poros, el grado de compactación, la densidad seca, el contenido de humedad y la naturaleza mineralógica del suelo. Por ende, los suelos granulares usualmente presentan mayores coeficientes de permeabilidad, mientras que, en los suelos finos, particularmente arcillas, exhiben una menor capacidad de transmisión de agua debido a su estructura más compacta y a la influencia de las fuerzas interparticulares

Para los ensayos de laboratorio, la permeabilidad es un parámetro clave para caracterizar el comportamiento hidráulico de las probetas de suelo, ya que permite evaluar su respuesta frente al flujo de agua en condiciones controladas. En estudios de estabilización es de vital importancia debido a la incorporación de agentes estabilizantes que pueden llegar a modificar la estructura del suelo y su capacidad de drenaje.

3.1.11. Estabilidad al agua

Según el documento planteado por Espinosa (2005)

La estabilidad al agua en suelos para carreteras es un aspecto crítico, pues el exceso de agua puede desencadenar una serie de problemas graves que afectan la integridad y durabilidad



de la infraestructura vial. Entre los problemas más comunes se encuentran la formación de baches, grietas, asentamientos y desintegración de las capas del pavimento o afirmado.

Comprender cómo el agua se infiltra en los pavimentos es esencial para prevenir estos problemas. Se ha observado que el humedecimiento excesivo puede reducir considerablemente la vida útil de los pavimentos, incluso hasta la mitad. Esta reducción en la vida útil conlleva costos significativos en términos de mantenimiento y reparaciones, lo que subraya la importancia de abordar adecuadamente el problema del agua en los pavimentos.

En el desarrollo de las muestras de laboratorio, el ensayo Proctor modificado constituye una herramienta fundamental para la caracterización del comportamiento del suelo frente a la compactación. Este permite establecer la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca, determinando valores representativos de densidad seca máxima y humedad óptima, los cuales resultan determinantes en el diseño de mezclas suelo-estabilizante.

3.1.12. Ensayo de compresión inconfiada

Según la norma INV-152-13

La determinación de la resistencia a la compresión es esencial para el diseño de vías, proporcionando información sobre la capacidad de carga del suelo sin confinamiento lateral. El ensayo de compresión inconfiada, sigue una secuencia de pasos meticolosa para garantizar resultados precisos y reproducibles. Para comenzar, se preparan muestras de suelo según las especificaciones del solicitante, pudiendo ser inalteradas, remoldeadas o compactadas.

Posteriormente, se procede a recortar los extremos de la muestra de manera perpendicular al eje longitudinal, determinando su masa y dimensiones para asegurar la uniformidad del ensayo.



Una vez preparada la muestra, ésta se coloca en el aparato de carga, centrándose cuidadosamente sobre la platina inferior. Es fundamental ajustar el instrumento de carga de manera precisa para que la platina superior haga contacto apenas con la muestra, llevando a cero el indicador de deformación. Después de tener el ajuste en la máquina, la aplicación gradual de carga es fundamental para evaluar la respuesta del suelo, por lo que se monitorea cuidadosamente la muestra, continuando con la carga hasta que los valores disminuyan o se alcance una deformación del 15%.

Al concluir el ensayo, se procede a determinar el contenido de agua de la muestra, utilizando el espécimen completo o recortes representativos, y especificando claramente si se extrajo la muestra antes o después del ensayo de compresión.

3.2. Antecedentes

Evaluación del comportamiento de la resistencia a la compresión inconfiada de un suelo tratado con un compuesto experimental (Michael Steven Cerón Males, María Camila Cuéllar Cornejo)

En el estudio se plantea la estabilización de un suelo fino por medio de cemento y silicato de sodio como un estabilizante no tradicional, siendo este una buena alternativa con respecto al desempeño de suelos arenosos y limosos, no solo por su función impermeabilizante y de mejoramiento de propiedades mecánicas, sino también porque representa un menor costo comparado con otros estabilizantes, como lo son el cemento o la cal.



Las dosificaciones tomadas en cuenta en este trabajo plantean que los porcentajes del agente (Silicato de sodio) estarían entre 4% y 10% mientras que para las muestras estabilizadas con el cemento serían entre 3% y 5%.

Luego de caracterizar las relaciones de humedad y los límites de consistencia del suelo estabilizado para las muestras con Silicato de sodio y cemento, se procedió a utilizar 94 probetas de ensayo para el análisis de resistencia a la compresión, distribuidas como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 3

Cantidad de probetas para el ensayo por dosificación.

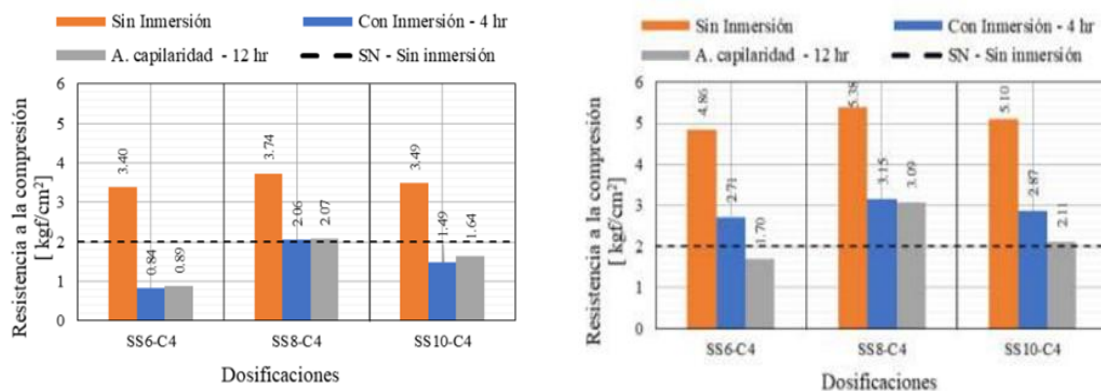
	Cantidad
Suelo natural compactado	3
C4%	18
C15%	18
SS6%-C4%-H3%	18
SS6%-C4%-H3%	18
SS6%-C4%-H3%	18
Total	94

Nota. Tomado de la tesis de Cerón y Cuellar (Escuela de ingeniería civil y geomática, Universidad del Valle, 2023)

Para las pruebas de resistencia a la compresión, se tuvo en cuenta para un periodo de resistencia de la muestra de 7 días y 28 días, como se evidencia en la Figura 5 y en la Figura 6.

**Figura 5**

Resistencia a la compresión inconfiada en probetas de suelo posterior a 7 y 28 días de curado



Nota. Tomado de la tesis de Cerón y Cuellar (Escuela de ingeniería civil y geomática, Universidad del Valle, 2023)

También se analizó la variación de las pruebas por medio del índice de resistencia al agua para las tres dosificaciones, evaluadas para las dos condiciones de 7 y 28 días, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Índice de resistencia al agua

Comparación	Silicato de sodio	Cemento	Edad	Índice	Edad	Índice
			[Días]			
Estado con inmersión	/	15	7	33.2	28	59.9
	/	4		0.0		5.4
	6	4		24.7		55.9
	8	4		55.1		58.5
Estado sin inmersión	10	4		42.7		56.3



Estado con A.	/	15		26.7		84.8
capilar	/	4		0.0		8.1
/	6	4	7	26.3	28	35.1
Estado sin	8	4		55.5		57.4
inmersión	10	4		47.0		41.3

Nota. Tomado de la tesis de Cerón y Cuellar (Escuela de ingeniería civil y geomática, Universidad del Valle, 2023).

Finalmente, el estudio concluyó que la acción de la mezcla de silicato de sodio - cemento ejerció un efecto beneficioso en el comportamiento de las muestras bajo condiciones críticas de inmersión en agua y absorción capilar. Esto se evidencia al observar que, en el caso de la dosificación SS8-C4 en ambas edades de curado, las resistencias a la compresión alcanzadas por las muestras experimentales igualaron o superaron los valores obtenidos en las muestras con suelo natural compactado.

Improvement of swelling chlorite soil using sodium silicate alkali activator (Ahmed S. Elmannay, Hala E.E. Fouad, Youssef G.)

En este trabajo investigativo, los autores realizaron una serie de pruebas de laboratorio en muestras de suelo tratadas con diferentes cantidades de silicato de sodio, y descubrieron que el uso de silicato de sodio como único activador puede mejorar significativamente la resistencia a la compresión no confinada y reducir el límite líquido y el índice de plasticidad del suelo tratado. El suelo tratado también mostró una reducción significativa en el asentamiento en comparación con las muestras no tratadas. Sin embargo, los autores señalan que la literatura sobre la estabilización del suelo con silicato de sodio muestra hallazgos contradictorios, y advierten



contra el uso de silicato de sodio como único activador para suelos arcillosos debido a las mejoras mecánicas pobres y posibles problemas de durabilidad.

Además, los autores investigaron la mineralogía de las muestras de suelo tratadas y descubrieron que el tratamiento con silicato de sodio convirtió el mineral de clorita de hinchamiento en clorita no hinchable, lo que indica que el suelo puede estabilizarse y hacerse no hinchable en un tiempo limitado. Los autores también monitorearon la durabilidad de las muestras de suelo tratadas con el tiempo y descubrieron que el gel formado experimentó microfisuras con el tiempo, que se propagaron a fisuras más grandes y finalmente a la falla, lo que plantea preocupaciones sobre la durabilidad del uso de silicato de sodio como único estabilizador. En general, los autores concluyen que el uso de silicato de sodio como único activador para la estabilización del suelo es factible para mejorar las características mecánicas y la consistencia del suelo de clorita de hinchamiento, pero advierten contra su uso como único estabilizador para suelos arcillosos y destacan la necesidad de más investigación sobre la durabilidad del suelo tratado.

Dentro de los ensayos llevados a cabo se incluyeron pruebas de resistencia a la compresión sin confinamiento, pruebas de límite líquido e índice de plasticidad, pruebas de asentamiento y análisis mineralógico mediante SEM y análisis de dispersión de rayos X de energía. También determinaron la capacidad de intercambio catiónico de las muestras de suelo y realizaron pruebas de Índice de Soporte de California (CBR).

Finalmente para destacar del texto, teniendo en cuenta que el suelo utilizado en el estudio era principalmente de clorita de hinchamiento; el cual es un tipo de suelo que contiene una alta



proporción de minerales de clorita y que tiene la capacidad de expandirse y retener agua, lo que puede tener implicaciones en la construcción, se menciona que el coeficiente de permeabilidad de la muestra tratada con silicato de sodio fue tres veces mayor que el de la muestra de referencia, lo que puede atribuirse a la posible creación de nuevas vías de agua debido al ataque químico del activador. Además, se menciona que la estructura microscópica de las muestras estabilizadas con silicato de sodio se convirtió en una estructura amorfa después de 90 días, lo que puede indicar una mayor resistencia al agua.

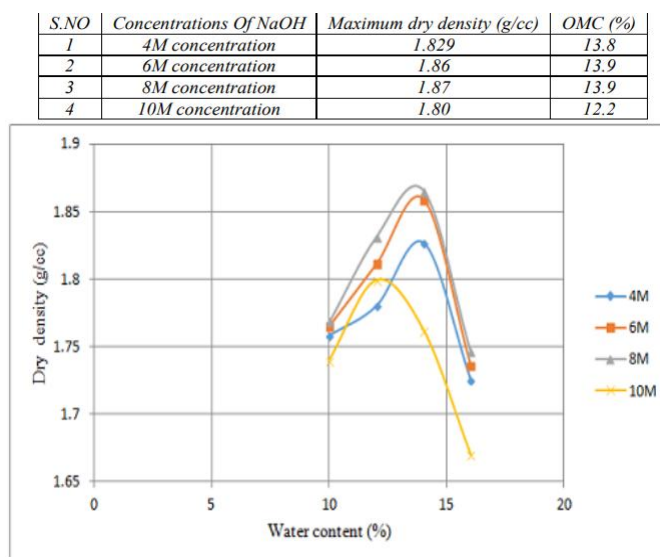
Stabilization of Soil using Chemical Additives (Md. Shakeel Abid, Department of Civil Engineering Kakatiya Institute of Technology & Science, Warangal)

El trabajo investigativo presenta un estudio sobre la estabilización del suelo utilizando aditivos químicos, específicamente hidróxido de sodio. El objetivo del estudio fue mejorar las propiedades del suelo y estudiar los efectos de los estabilizadores químicos en suelos cohesivos y sin cohesión. Se realizaron pruebas para evaluar el rendimiento del suelo cuando se estabiliza con hidróxido de sodio.

El hidróxido de sodio es muy soluble en agua, lo que lo hace efectivo como un agente de compactación entre las partículas del suelo. Además, el estudio presenta una figura que muestra la variación del contenido de agua versus la densidad seca para diferentes concentraciones de hidróxido de sodio en peso del suelo (Figura 6), lo que sugiere que el agua es un factor importante en la estabilización del suelo con hidróxido de sodio.

Figura 6.

Resultados de la curva de compactación para diferentes concentraciones de NaOH.



Nota. Tomado de Stabilization of Soil using Chemical Additives (Md. Shakeel Abid, 2016).

El estudio también menciona que los suelos expansivos son un problema común en la construcción y que el uso de hidróxido de sodio como aditivo químico ha demostrado una mejora significativa en las propiedades del suelo. Los resultados del estudio indican que la adición de hidróxido de sodio aumenta la densidad seca del suelo y mejora la resistencia al corte y la resistencia a la compresión. Además, se encontró que la adición de hidróxido de sodio aumenta la permeabilidad del suelo, lo que puede ser beneficioso para reducir la erosión.

En cuanto al comportamiento de los aditivos en presencia del agua, se puede inferir que el hidróxido de sodio es efectivo en la estabilización del suelo en condiciones húmedas debido a su alta solubilidad en agua. Sin embargo, se necesitaría más investigación para determinar la durabilidad de los estabilizantes químicos en climas con muchas lluvias o húmedos.



3.3. Estado del Arte

(Emad, E., Sheikha, A. A., & Ahmed, A. (2021), en su estudio se investigó el efecto del silicato de sodio en la resistencia a la compresión no confinada de dunas de arena. Se utilizó arena de duna clasificada como arena pobremente graduada (SP) obtenida del desierto de Alshnafia. Se observó que al agregar silicato de sodio, la cohesión de las partículas de la duna de arena aumentó, siendo más notable con una adición del 8% de silicato de sodio. La reacción entre las dunas de arena y el silicato de sodio fue rápida, con las muestras comenzando a endurecerse en pocas horas. Se encontró que la cohesión de las dunas de arena en estado denso era mayor que en estado suelto al agregar silicato de sodio. Además, se destacó que el tiempo de curado influyó significativamente en la resistencia a la cohesión de las dunas de arena, con un aumento en la cohesión a medida que aumentaba el tiempo de curado. Estos resultados sugieren que el silicato de sodio puede ser un agente efectivo para mejorar las propiedades mecánicas de las dunas de arena, lo que podría ser beneficioso en aplicaciones de construcción y geotecnia.

(Elmannaey, A. S., Fouad, H. E. E., & Youssef, Y. G., 2021), en el documento se centraron en la mejora de un suelo expansivo de clorita utilizando un activador alcalino de silicato de sodio. El suelo se identificó como arcilla grasa (CH) según la USCS y arcilla con calificaciones de subrasante pobres según la clasificación de AASHTO. Los resultados mostraron que el activador de silicato de sodio redujo la capacidad de intercambio catiónico (Fenómeno clave en la retención de nutrientes para las plantas y en la estabilidad del suelo) de la muestra de suelo y disminuyó la presión de hinchamiento y el porcentaje de levantamiento. Además, se observó una reducción en la permeabilidad del suelo tratado. En general, el estudio



demostró que el activador de silicato de sodio mejoró las propiedades del suelo expansivo de clorita, lo que podría tener implicaciones positivas para la construcción de edificios y carreteras en suelos problemáticos.

(Neeladharan, C., Sathish, P., Nandhini, A., Priya, R., Fathima, I. S., & Srimathi, J. 2018), en el artículo, se planteó el uso de silicato de sodio y polvo de mármol para mejorar las propiedades de suelos arcillosos. En relación a los resultados, se observó que la adición de silicato de sodio junto con polvo de mármol resultó en una mejora significativa en la estabilidad del suelo arcilloso. Se encontró que esta combinación redujo el límite plástico del suelo, lo que indica una disminución en su plasticidad y una mayor estabilidad estructural. Además, se observó una mejora en la compactación, resistencia al corte y capacidad de carga del suelo tratado. Es por eso que se concluyó que el uso de polvo de mármol con silicato de sodio como aglutinante demostró ser una estrategia efectiva para mejorar la estabilidad de suelos arcillosos, pues la adición de silicato de sodio contribuyó significativamente a la reducción de la plasticidad del suelo y a la mejora de sus propiedades mecánicas, lo que sugiere que esta técnica puede ser clave para aumentar la estabilidad y resistencia de suelos problemáticos.

(Cruz, M. P., Schmädke, M., Italo, F. & Perret, G. 2015), en su estudio realizado, se enfocó en la estabilización de suelos limo-loess erodables mediante el uso de silicato de sodio líquido. El objetivo principal fue lograr una eficiente estabilización físico-química del suelo para mejorar la durabilidad de los caminos rurales no pavimentados. Se llevaron a cabo ensayos geotécnicos para caracterizar el suelo natural y las mezclas con silicato de sodio líquido, resultando en que la dosificación óptima de silicato de sodio líquido con sedimentos loéssicos



erodables fue de 1S:2A:10L (relación en peso), donde S representa el silicato de sodio líquido, A el agua potable y L el loess. Esta dosificación demostró una mejora significativa en la estabilidad del suelo, eliminando la erodabilidad, reduciendo el índice de plasticidad un 8% y aumentando la resistencia al corte no drenado. Además, se observó un incremento notable en el índice CBR 2,5mm ante hinchamientos, con un incremento del 30% cuando la probeta permanece sumergida 11 días, en vez de 4, lo que indica una mayor resistencia a corto y largo plazo. Por ende, el uso de silicato de sodio líquido se mostró como una solución efectiva para estabilizar suelos limo-loess erodables, proporcionando beneficios como la reducción de la vulnerabilidad a la erodabilidad, la disminución de polvo ambiental y baches en los caminos, así como la optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación anual en vías no pavimentadas.

(Junco del Pino, J. M., & Tejeda Piusseaut, E. 2011)., en su estudio, se plantea el uso de un aditivo químico a base de sales cuaternarias para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. Los resultados obtenidos en la investigación muestran que el empleo del aditivo químico a base de sales cuaternarias ha generado mejoras significativas en las propiedades de los suelos estabilizados. Se observó un incremento notable en los valores de CBR (California Bearing Ratio) después de la estabilización, pasando de un 1,2% con el suelo natural a un 5,6% de CBR con el suelo estabilizado, utilizando la energía de compactación modificada. Además, se destaca que el aditivo químico a base de sales cuaternarias ha demostrado reducir la permeabilidad del suelo tratado, lo cual es beneficioso para la ejecución de obras viales y puede contribuir a la disminución de los costos de mantenimiento a largo plazo.



(Yilmaz, Y., Eun, J., & Goren, A., 2017), en su estudio, evaluaron la resistencia a compresión inconfínada de suelos arcillosos de alta plasticidad estabilizados mediante la combinación de cemento y distintos agentes químicos dispersantes, entre ellos hexametafosfato de sodio, sulfato de aluminio, carbonato de sodio y silicato de sodio. Los resultados mostraron que la incorporación de cemento incrementa de manera significativa la resistencia mecánica del suelo; no obstante, la adición de agentes químicos puede modificar este comportamiento en función de su naturaleza y concentración. En particular, el silicato de sodio evidenció una influencia relevante en el desempeño del suelo estabilizado, dado que su interacción con el cemento y con la microestructura del suelo arcilloso incide en los procesos de cementación y en la reorganización de las partículas. Asimismo, se observó que, a bajas concentraciones, algunos agentes químicos pueden contribuir a mejoras puntuales en la resistencia del suelo, mientras que, a concentraciones elevadas de silicato de sodio, se registró una disminución notable de la resistencia, asociada a fenómenos de dispersión de partículas y a la alteración de los enlaces interparticulares. En este contexto, el estudio pone de manifiesto que el comportamiento mecánico del suelo estabilizado depende de la interacción entre el cemento y los agentes químicos, destacando la importancia de definir adecuadamente las proporciones y condiciones de aplicación del silicato de sodio para optimizar su desempeño en procesos de estabilización de suelos arcillosos de alta plasticidad.



4. Metodología

4.1. Fases y Productos

A continuación, se muestra la metodología empleada para esta investigación.

Tabla 5.

Metodología empleada

Fases	Objetivos Específicos	Actividad	Desarrollo metodológico de la actividad
I	Caracterización del suelo y selección del estabilizante utilizado.	Se realizaron los ensayos: -Granulometría -Límites de Atterberg -Clasificación AASHTO -Clasificación SUCS	Se realizaron las actividades según las normas correspondientes a cada caso. (INV E – 213 – 13, INV E – 181 – 13, AASHTO M-145)
II	Desarrollo de dosificaciones de suelo estables al agua.	-Se elaboraron las dosificaciones preliminares estudiadas.	Se tuvieron en cuenta estudios anteriores y se realizaron varias pruebas de inmersión para seleccionar las dosificaciones apropiadas.
III	Evaluación de la resistencia del suelo en condiciones de saturación.	-Se seleccionaron las dosificaciones óptimas.	Se realizó el ensayo de compresión inconfiada según lo describe la norma INV E – 152.
		-Se relacionaron las resistencias a la compresión (estado seco vs estado saturado)	Se realizaron nuevos ensayos para las dosificaciones seleccionadas y se ensayaron en condiciones secas y de inmersión.
			Se realizaron las pruebas de estabilidad al agua de las muestras que presentaron mejor resistencia a la compresión.

4.2. Muestra de suelo natural

4.2.1. Selección del material

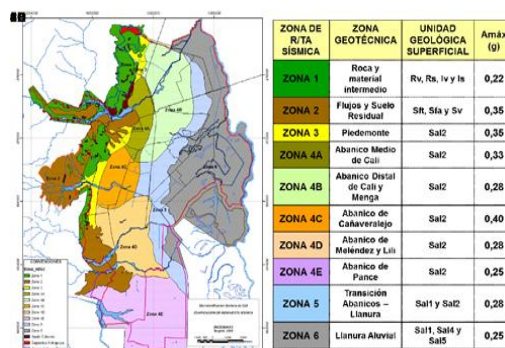


La ciudad de Cali presenta gran variedad de suelos de diferentes características, uno de los tipos de suelos predominantes son los suelos finos de alta plasticidad. Por tal razón, en la presente investigación se optó por seleccionar un suelo fino de alta plasticidad, específicamente una arcilla de alta plasticidad, que de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS se denomina (CH); ya que son de especial interés geotécnico debido a que se caracteriza por su alta capacidad de retención de agua y su propensión a sufrir cambios volumétricos significativos ante variaciones en la humedad.

Para Encontrar el lugar de extracción de la muestra se usó como guía la microzonificación sísmica de Cali, la cual muestra las zonas en las cuales normalmente hay presencia de arcillas de alta plasticidad (CH), las cuales suelen estar asociadas a áreas donde existen depósitos aluviales o lacustres antiguos. Estas áreas están comúnmente localizadas en las partes bajas de la ciudad y en zonas cercanas a cuerpos de agua, como ríos y humedales. Específicamente, las zonas del Valle Geográfico del Río Cauca y las terrazas aluviales pueden presentar este tipo de suelos.

Figura 7

Microzonificación sísmica de Cali.



Nota. Fuente (Alcaldía de Santiago de Cali, 2005)



4.2.2. Propiedades físicas y mecánicas del suelo natural

Con el fin de determinar las características físicas y mecánicas del suelo natural en estudio, se realizaron múltiples ensayos de laboratorio de acuerdo con los procedimientos establecidos por la normativa nacional (Normas de Ensayo de materiales para carreteras, INVIAS).

Tabla 6.

Ensayos y normas empleados en la investigación

Nombre	Identificación	Cantidad
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo.	INV E - 122	1
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	INV E - 123	1
Determinación del límite líquido de los suelos.	INV E - 125	1
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	INV E - 126	1
Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación).	INV E - 141	1
Compresión inconfiada en muestras de suelos.	INV E - 152	1
Total de ensayos		6

4.2.3. Distribución granulométrica

Se llevó a cabo el ensayo de determinación de los tamaños de las partículas I.N.V. E 123 - 13, para el cual se tomó una muestra de suelo de aproximadamente 500 g, la cual previamente



fue secada al horno por un periodo de 12 horas, para posteriormente ser lavada con ayuda del tamiz #200, esto con la finalidad de separar la fracción gruesa y fina del suelo, siendo la primera el material retenido en el tamiz #200. Una vez terminado el proceso de lavado, el material retenido fue llevado al horno durante 24 horas, finalizado este tiempo se procedió a calcular el peso seco de la muestra, para poder calcular la cantidad de material que se perdió durante el proceso de lavado. Con la muestra retenida, se procedió a realizar el proceso de tamizado, utilizando los tamices especificados en la norma.

4.2.4. Límites de consistencia.

4.2.4.1. Determinación del límite líquido de los suelos.

Para la determinación del límite líquido del suelo a estudiar, se realizó el ensayo con respecto a la norma INV E - 125. Se tomó una muestra de suelo pasante por el tamiz # 40 de aproximadamente 150-200 g que se encontraba previamente secado al aire y pulverizado con la ayuda de un mortero. Luego de pulverizado, se mezcló el suelo con pequeñas cantidades de agua preocupando que, al colocarse en la tara, la ranura generada se cerrará entre los 15 y 35 golpes. El proceso anteriormente descrito se realizó 4 veces, aumentando la cantidad de agua de forma paulatina a medida que se daban los resultados de la prueba y adicionalmente de cada muestra recolectada se tomó una muestra pequeña de material para poder obtener la humedad.

4.2.4.2. Determinación del límite plástico del suelo.

En conformidad con lo establecido en la norma INV E – 126, Se tomó una muestra de suelo de 12 g, con la que se formaron rollos de aproximadamente 3.2 mm (1/8”) de diámetro. Para ello, se rodó una porción de suelo entre la palma de la mano y una placa de vidrio,



repitiendo el proceso hasta que los rollos mostraron pequeñas grietas bajo la presión de los dedos. Luego, se recogieron las porciones de suelo y se colocaron en un recipiente, que se llevó al horno para calcular la humedad. Con los valores de ambos límites mencionados anteriormente, se procedió a calcular el índice de plasticidad.

4.2.5. Relaciones humedad - peso unitario seco en los suelos.

Para conocer el valor de la humedad óptima, se llevó a cabo el ensayo normal de compactación I.N.V. E. – 141 - 13, para el cual inicialmente se prepararon varias muestras de suelo de 2.5 kg, que se tamizaron para eliminar partículas gruesas y se mezclaron con diferentes cantidades de agua para ajustar su contenido de humedad. Para compactar la muestra de suelo en 3 capas diferentes, se utiliza un martillo de 2.5 kg que se deja caer desde una altura de 30.5 cm, aplicando 25 golpes por capa. La energía de compactación aplicada es uniforme y controlada para asegurar resultados consistentes. Al finalizar la compactación de la última capa, se enrasa la superficie final al retirar el anillo exterior del molde y se toma posteriormente la masa del molde con la muestra compactada para calcular la densidad húmeda. Finalmente se extrae una muestra del suelo compactado para determinar su contenido de humedad al secarlo en horno hasta obtener un peso constante.

4.2.6. Clasificación del tipo de suelo.

A partir de los ensayos realizados se determinó una clasificación del tipo de suelo en estudio a través del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO).



4.3. Materiales del estabilizante no tradicional

4.3.1. Silicato de sodio

El silicato de sodio, también conocido como vidrio soluble, es un compuesto inorgánico formado por óxido de sodio (Na_2O) y dióxido de silicio (SiO_2). Se presenta comúnmente en forma líquida o en polvo y es altamente soluble en agua. Sus principales características incluyen su capacidad como aglutinante, su resistencia a altas temperaturas y su reactividad con ciertos materiales, lo que lo hace útil en aplicaciones industriales como adhesivos, recubrimientos y tratamiento de suelos.

4.3.2. 3.3.2 Cemento

Se utilizó cemento gris, de uso general, el cual según lo establecido por el fabricante cumple con las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC 121.

4.3.3. 3.3.3 Hidróxido de sodio.

El hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como soda cáustica, es un compuesto altamente alcalino y soluble en agua. Se presenta en forma de escamas, perlas o solución líquida y es conocido por su fuerte capacidad corrosiva y su reacción exotérmica al contacto con el agua.

Este material fue usado como activador alcalino debido a que en combinación con los otros agentes estabilizantes como el silicato de sodio o el cemento, contribuye al desarrollo de reacciones pozolánicas que aumentan la resistencia y durabilidad del material tratado.

4.4. Determinación de dosificaciones

El proceso utilizado, para determinar los porcentajes de las adiciones, consistió en realizar probetas pequeñas, que a su vez fueron compactadas, tomando como referencia la



humedad óptima y densidad seca máxima del suelo en estado natural. Estas probetas fueron sometidas a una inmersión durante 24 horas y posteriormente evaluadas, separando las que presentaron desprendimiento de material, de las que no presentaron desprendimiento, para poder así hacer un diseño experimental consistente para la investigación.

4.5. Fabricación de las probetas remoldeadas

Para la fabricación de las probetas de suelo con adición de silicato de sodio, hidróxido de sodio y cemento, se estableció un procedimiento que garantizará la uniformidad y representatividad de las muestras. Cada etapa de ensayos tuvo una cantidad diferente de dosificaciones y de probetas, sin embargo, todas fueron compactadas a la densidad seca máxima y a la humedad óptima determinada previamente mediante el ensayo normal de compactación.

Para el moldeado de cada conjunto de dos probetas, se utilizó una cantidad de material previamente secado al aire. Las cantidades de cemento, silicato de sodio e hidróxido de sodio necesarias se estimaron con respecto al peso seco de la muestra, considerando la humedad determinada a partir de un testigo sometido a secado en horno previamente por 24 horas. Dentro de los cálculos anteriormente mencionados, se tuvo en cuenta las variaciones de humedad del suelo ocasionadas por efectos externos, como la humedad relativa del ambiente.

La mezcla del producto se realizó de manera manual, utilizando una espátula hasta obtener una distribución homogénea del material con el cemento. Posteriormente, el silicato y el hidróxido de sodio fueron pesados en una balanza con precisión de 0.01 g y disueltos en el agua



de compactación mediante agitación en un matraz Erlenmeyer, asegurando su completa disolución antes de su incorporación a la mezcla.

Para garantizar el cumplimiento de la humedad óptima de compactación, se tomó una muestra del material mezclado y se llevó al horno para su verificación. El proceso de moldeado de las probetas se llevó a cabo en una prensa, asegurando la conformidad de las dimensiones establecidas. Una vez extraída del molde, las muestras fueron sometidas a una verificación dimensional mediante un calibrador digital, registrando tres mediciones de diámetro y altura para corroborar la relación 1:2.

Finalizado el proceso de fabricación, las probetas fueron almacenadas en una cámara húmeda durante los periodos de curado correspondientes. Una vez alcanzadas las edades de curado establecidas para el ensayo, las muestras fueron sometidas a pruebas de compresión para evaluar su desempeño mecánico.

4.6. Ensayo de compresión inconfiada

El ensayo de compresión inconfiada simple consiste en la aplicación de una carga axial sobre las muestras de suelo hasta que se produzca la falla de la probeta. Es importante recalcar que en este ensayo no se aplican los esfuerzos de confinamiento de la muestra.

Cuando las muestras son retiradas de la cámara húmeda al cumplir su tiempo respectivo de curado, ya sea 7 o 28 días, se preparan para inmersión por 1 hora. Posterior a esto, se toman las medidas de altura y diámetro, además de su masa antes de ser ensayadas y se limpian con un trapo fino de manera superficial.



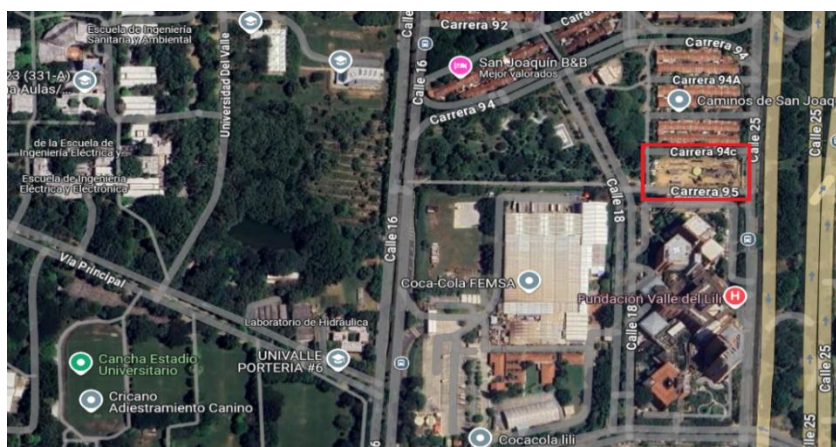
5. Resultados y Análisis de Resultado

5.1. Localización del material

El punto al que se recurrió para la extracción del material está localizado en la zona 5d, en la cual hay altas probabilidades de encontrar arcillas de alta plasticidad, especialmente en áreas con depósitos aluviales recientes.

Figura 8

Zona de extracción de la muestra de suelo natural, Santiago de Cali, Valle del Cauca.



Nota: La imagen es referencia propia.

El sector fue Valle del Lili como se observa en la Figura 8, en una excavación realizada para la construcción de la torre 8 de la Fundación Valle del Lili. Se observó en la excavación que aproximadamente a los 9 metros de profundidad se encontraba un suelo grisáceo con características plásticas el cual fue el que se tomó para esta investigación, dando como resultado en la caracterización, arcilla de alta plasticidad (CH).



Figura 9

Material extraído in situ.



Nota. La figura es referencia propia

5.2. Características del suelo en estado natural

5.2.1. Distribución Granulométrica

El análisis granulométrico se realizó siguiendo el procedimiento consignado en la norma NTC 77, para ello se secó en el horno una muestra de 314.62 gramos de suelo. Una vez seca, se realizó el lavado del material por el tamiz 200, finalizado este proceso se secó nuevamente el material retenido, y se procedió a pasar el material por los tamices 4, 8, 16, 30, 50, 100 (Figura 10).



Figura 10.

Tamices empleados para el análisis granulométrico.



Nota. La figura es referencia propia

Finalmente se registraron los pesos retenidos en cada tamiz (Figura 11) y con estos datos se realizó la curva granulométrica del material como lo muestra la Figura 12.

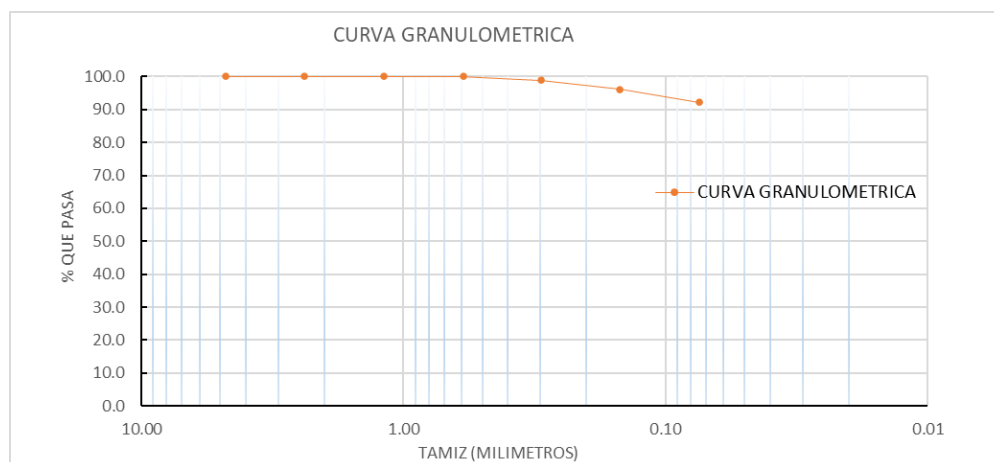
Figura 11.

Porcentajes de muestra obtenidos en ensayo granulométrico

TAMIZ	ABERTURA (mm)	Pesos Retenidos	% Pesos Retenidos	% Retenidos Acumulados	% QUE PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
Nº 4	4,760	0,00	0,0	0,0	100,0	UBICACIÓN : Cra. 95 # 18-93 (TORRE 8 FVL)
Nº 8	2,380	0,00	0,0	0,0	100,0	PESO TOTAL : 314,62
Nº 16	1,190	0,00	0,0	0,0	100,0	LIMITE LIQUIDO : 67,6 %
Nº 30	0,590	0,00	0,0	0,0	100,0	LIMITE PLASTICO : 30,83 %
Nº 50	0,297	3,56	1,1	1,1	98,9	INDICE PLASTICO : 36,7 %
Nº 100	0,149	8,78	2,8	3,9	96,1	CLASIFICACIÓN
Nº 200	0,074	12,01	3,8	7,7	92,3	SUCS : CH
< Nº 200	0	290,27	92,3	100,0	0,0	AASHTO : A-7-5

Nota. La figura es referencia propia

Figura 12
Curva Granulométrica



5.2.2. Límites de consistencia y clasificación del suelo

Para obtener los valores del límite líquido, se tuvo en cuenta el método de la cuchara de Casagrande, como se observa en la Figura 13.

Figura 13
Suelo en la cazuela de Casagrande, b. Muestra de suelo.



a.



b

Igualmente, se determinó el límite plástico, mediante el procedimiento planteado en la norma correspondiente y que se evidencia en la Figura 14.

Figura 14

Determinación del límite plástico, b. Muestra de suelo al finalizar el ensayo.



a.

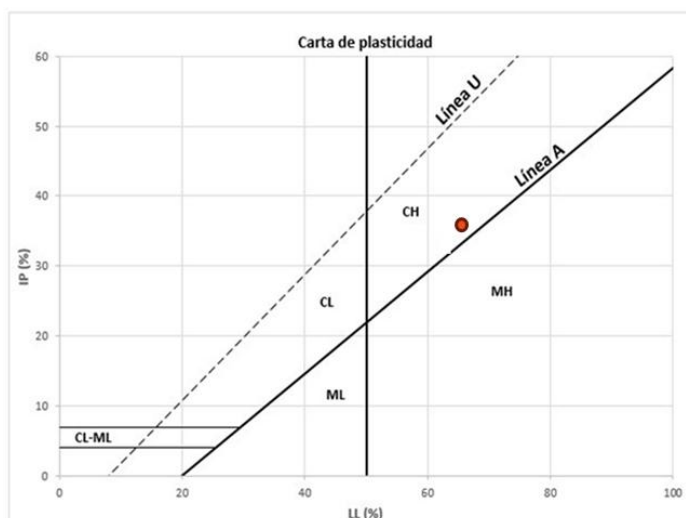


b.

Para los límites de consistencia se obtuvo un límite líquido (LL) de 67.6, límite plástico (LP) de 30.83 y por último un índice de plasticidad (IP) de 36.7. Con estos valores se determinó teniendo en cuenta el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y la carta de plasticidad, que el suelo se encuentra por encima de la Línea A, y se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH).

Figura 15

Clasificación según la gráfica de la Carta de plasticidad de Casagrande.





Mientras que para la clasificación AASHTO se obtuvo una clasificación del grupo A-7-5 (Suelo fino arcilloso de alta plasticidad).

Figura 16

Criterios de clasificación según la AASHTO

Clasificación general	Suelos granulares. Pasa tamiz de 75 µm (N° 200) hasta el 35%							Suelos arcilloso-limoso. Pasa tamiz de 75 µm (N° 200) más del 35%			
Clasificación general por grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
											A-7-6
Ensayo de tamizado por vía húmeda porcentaje que pasa por:											
Tamiz de 2mm. N°10	Máx.50										
Tamiz de 425µm. N°40	Máx.30	Máx.50	Máx.51								
Tamiz de 75µm. N°200	Máx.15	Máx.25	Máx.10	Máx.35	Máx.35	Máx.35	Máx.35	Min.36	Min.36	Min.36	Min.36
Características de la fracción que pasa por tamiz de 450µm, N°40:											
Límite líquido	-	-	-	Máx.40	Min.41	Máx.40	Min.41	Máx.40	Min.41	Máx.40	Min.41
Índice de plasticidad	Máximo 6		No plas	Máx.10	Máx.10	Min.11	Min.11	Máx.10	Máx.10	Min.11	Min.11
Constituyentes principales de tipos más comunes	Fragmentos de rocas, grava y arena		Arena fina	Gra vas y arenas arcillosas limosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Comportamiento general como subrasante	Excelente a bueno						Regular a pobre				

Nota. Obtenida de la norma ASTM D 3282

5.2.3. Relaciones de humedad y peso unitario

En el ensayo normal de compactación, también conocido como Proctor (I.N.V.E. - 141), se obtuvieron los resultados de humedad óptima y densidad seca, de 30% y 1.38 g/cm³ respectivamente. Estos valores fueron usados para los cálculos de cantidades de las dosificaciones preliminares. Posteriormente se decidió realizar un segundo ensayo normal de compactación que corresponde para la mezcla suelo cemento; esto con el fin de ajustar la humedad óptima, para las siguientes probetas de ensayo. Los resultados obtenidos de humedad óptima y densidad seca fueron de 28% y 1.42 g/cm³.



Figura 17

Realización del Ensayo normal de compactación



5.3. Dosificaciones.

5.3.1. Dosificaciones preliminares (Etapa I de ensayos)

Para determinar los porcentajes óptimos a utilizar en la mezcla, se llevó a cabo una etapa de ensayos preliminares utilizando probetas cilíndricas de dimensiones reducidas, específicamente de 50 mm de diámetro y 60 mm de altura. Esta etapa tuvo como finalidad identificar el comportamiento inicial del material ante las condiciones de inmersión, evaluando la estabilidad físico-química de las mezclas.

Con base en la revisión bibliográfica y estudios previos sobre estabilización química de suelos, se definieron rangos para cada componente del estabilizante. En particular, el porcentaje de silicato de sodio se establece entre 6% y 10% respecto al peso seco del material, mientras que para el cemento estarían entre 2% y 6%. Estos límites fueron seleccionados considerando tanto la efectividad observada en estudios previos como la viabilidad técnica en función del comportamiento mecánico y durabilidad esperada del material estabilizado. Adicionalmente, con el objetivo de mejorar el entorno alcalino de la mezcla y favorecer la activación de los



compuestos cementantes, se incorporó hidróxido de sodio, un agente activador destinado a elevar el pH de la solución. Este fue dosificado en 3% y 4% y su inclusión respondió a la necesidad de promover reacciones más eficientes entre los componentes de la mezcla.

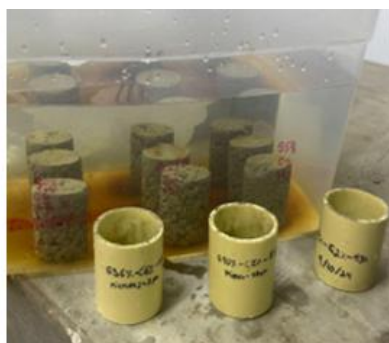
Las probetas fueron curadas durante un periodo de 7 días en cámara húmeda, a condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, y posteriormente sometidas a un ensayo de inmersión en agua por 24 horas. Esta prueba tuvo como objetivo principal evaluar la resistencia a la disgregación por efecto del agua. Finalizado el tiempo de inmersión, se realizó una inspección cualitativa de cada probeta, observando si existía pérdida de material, presencia de fisuras o desintegración estructural. Aquellas probetas que no presentaron signos visibles de deterioro fueron sometidas a una leve presión en ambas caras, con el fin de comprobar la estabilidad en condiciones saturadas. Las probetas que no se destruyeron al finalizar la prueba anteriormente descrita, fueron consideradas como satisfactorias en esta fase.

Figura 18

a. Probetas con las distintas dosificaciones, b. Probetas en prueba de inmersión con su clasificación por dosificación, c. Dosificaciones que cumplieron los criterios de la prueba.



a.



b.



c.



La Figura 18 muestra el procedimiento seguido para la preparación y evaluación de las mezclas. Este consistió en la adición de una cantidad determinada de suelo seco, al cual se incorporó la dosificación correspondiente de cemento hasta obtener una mezcla homogénea. De manera paralela, en un recipiente independiente se preparó la solución líquida compuesta por silicato de sodio, hidróxido de sodio y agua. Una vez completada su integración, dicha solución se adiciona a la mezcla, la cual fue posteriormente moldeada y compactada en probetas cilíndricas. Las probetas obtenidas fueron curadas durante un periodo de siete días en una cámara húmeda y posteriormente, sometidas a un proceso de inmersión de 24 horas antes de su evaluación.

En la Tabla 7 se presentan los resultados correspondientes a las dosificaciones analizadas. Las probetas que cumplieron con los criterios de evaluación establecidos fueron clasificadas como satisfactorias y se identifican como “Si superó”, mientras que aquellas que no alcanzaron dichos criterios se clasificaron como no satisfactorias y se registran como “No superó”.

Tabla 7

Análisis de dosificaciones preliminares.

Dosificaciones		NaOH [%]	Tiempo [hr]	Resultado
Silicato de sodio [%]	Cemento [%]			
6	2	3	24	No superó
8	2	3	24	No superó
10	2	3	24	Si superó
6	4	3	24	No superó
8	4	3	24	No superó
10	4	3	24	No superó



6	6	3	24	Si superó
8	6	3	24	Superó 1 de 3
10	6	3	24	Si superó
6	2	4	24	No superó
8	2	4	24	No superó
10	2	4	24	Si superó
6	4	4	24	No superó
8	4	4	24	Si superó
10	4	4	24	Si superó
6	6	4	24	Si superó
8	6	4	24	Si superó
10	6	4	24	Si superó
			Total de probetas	54

Los resultados presentados en la Tabla 7 permitieron evaluar la estabilidad de las mezclas ensayadas. Las muestras con un 2% de cemento mostraron en general un desempeño deficiente, excepto cuando se combinaron con porcentajes elevados de silicato de sodio. Esto sugiere que un mayor contenido de silicato puede compensar parcialmente la baja proporción de cemento, al contribuir a la formación de productos cementantes secundarios que mejoran la cohesión del material.

Al incrementar el contenido de cemento, se evidenció una mejora significativa en la resistencia de las probetas tras la inmersión, lo que confirma el efecto positivo del cemento como agente estabilizador primario. Sin embargo, también se destacó el papel del activador alcalino (NaOH), cuya presencia favorece la disolución de los compuestos silíceos y aluminicos del suelo, promoviendo reacciones de polimerización que fortalecen la estructura del material. Este efecto fue particularmente notorio en las mezclas con porcentajes intermedios y altos de



cemento, donde la sinergia entre ambos componentes resultó determinante para la durabilidad frente a la inmersión. Haciendo un balance general, observamos que las combinaciones más estables fueron aquellas que incluyeron 6% de cemento, entre 6% y 10% de silicato de sodio y 3% de NaOH, las cuales superaron satisfactoriamente las pruebas de inmersión sin evidenciar deterioro ni ruptura apreciable.

5.3.2. Dosificaciones Preparatorias (Etapa II de ensayos)

Con los resultados de la Tabla 7, se implementó un diseño experimental factorial, con el fin de evaluar simultáneamente el efecto de los 3 componentes (Variables independientes) sobre una o más variables de respuesta (dependientes), para así evaluar el efecto individual de cada factor, en este caso el Silicato de sodio en 6%, 8% y 10%, el cemento con 2%, 4% y 6% y finalmente el hidróxido de sodio con 3% y 4%. Con estos factores se generó un conjunto de combinaciones posibles ($3 \times 3 \times 2 = 18$ combinaciones), que fueron ensayadas con probetas duplicadas R1 y R2 a dos tiempos de curado distintos: 7 días y 28 días .

La variable respuesta fue la resistencia a la compresión simple medida en Mpa y el objetivo fue identificar qué combinación de materiales ofrece el mejor desempeño mecánico después de haber superado previamente una prueba de inmersión de 1 hora, pues con esta metodología se buscó evaluar el efecto individual de cada adición, observar la interacción entre los factores, como el efecto combinado de silicato e hidróxido de sodio, determinar combinaciones con mayor resistencia a la compresión y por último, comparar resultados a diferentes tiempos de curado.



Para la elaboración de las probetas se empleó una humedad óptima de 28 % y una densidad máxima seca de 1.42 g/cm³, obtenidas del ensayo Proctor para la mezcla suelo-cemento. Estos valores se seleccionaron considerando que la adición de cemento altera propiedades del suelo natural, como la densidad seca, lo que influye directamente la resistencia. Así mismo, se utilizaron probetas con medidas de 54 mm de diámetro y de 110 mm de altura.

Tabla 8

Análisis de la resistencia a la compresión de diferentes dosificaciones (diseño experimental)

[illegible]

Figura 19

Resistencia a la compresión inconfiada de probetas finales a 7 días de curado.

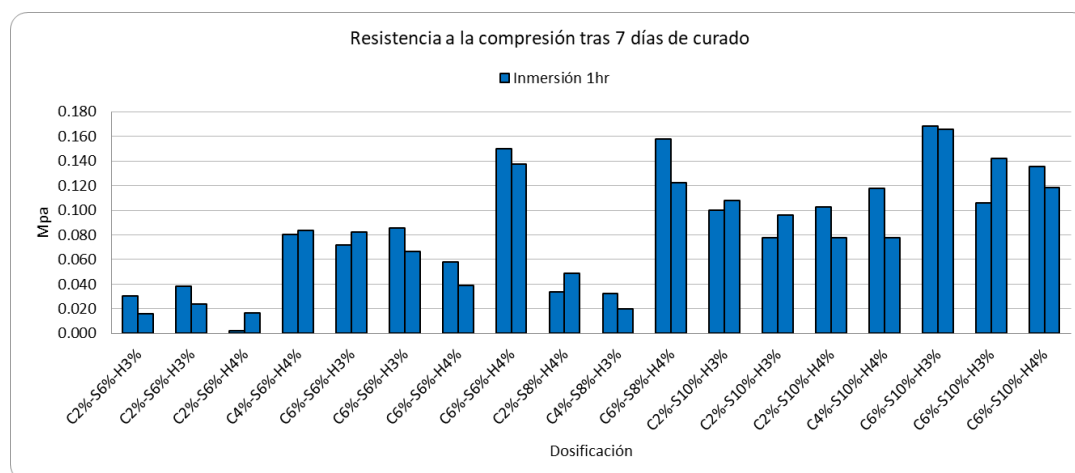
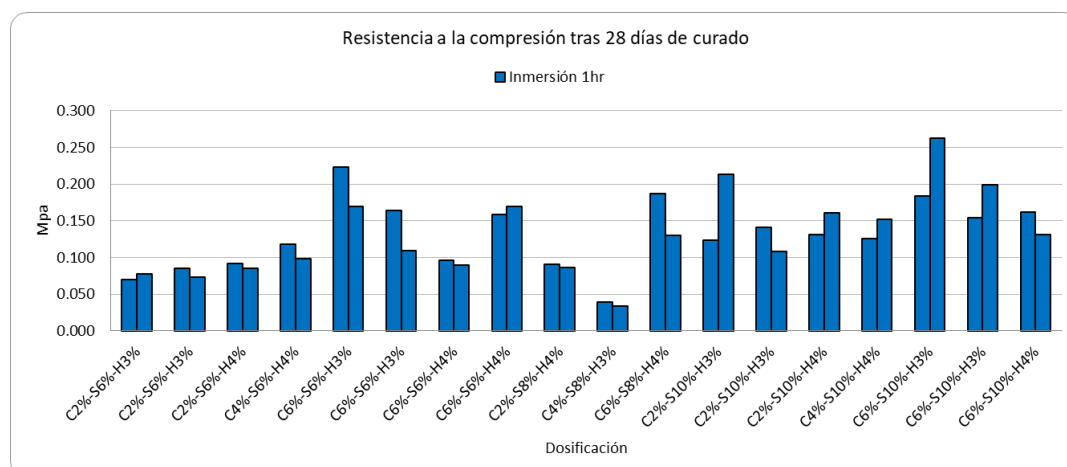


Figura 20

Resistencia a la compresión inconfiada de probetas finales a 7 días de curado.



Los resultados obtenidos evidencian un incremento progresivo en la resistencia a la compresión a medida que aumentan tanto el porcentaje de cemento como de silicato de sodio. Se evidencia además que el tiempo de curado tiene un papel fundamental, ya que, en la gran mayoría de dosificaciones evaluadas, la resistencia a los 28 días fue superior a la registrada a los



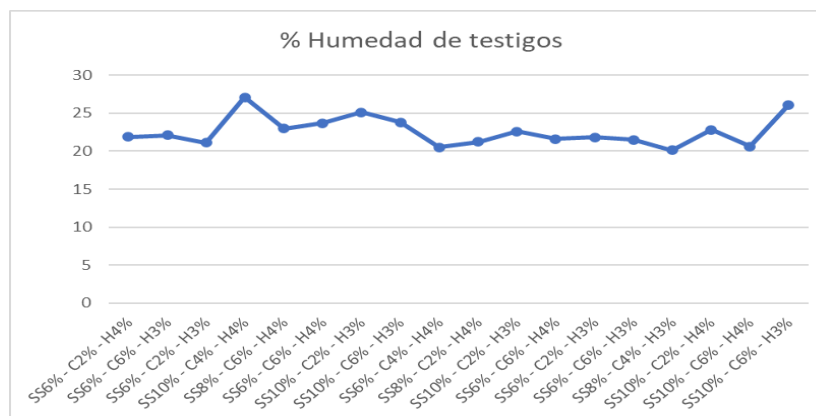
7 días, confirmando el desarrollo paulatino de las reacciones puzolánicas y de geopolimerización dentro de las mezclas por los agentes involucrados.

A partir del cruce de los factores evaluados y de los resultados de resistencia obtenidos, se identificaron dos combinaciones específicas como las más favorables, destacando tanto por su desempeño mecánico como por su estabilidad estructural post-inmersión, siendo estas *SS6-C6-H3* y *SS10-C6-H3*.

Finalmente, y previo a la etapa de las dosificaciones finales, se realizó como ejercicio de control, la gráfica de las humedades obtenidas en los testigos de cada dosificación ensayada, como se observa en la Figura 21.

Figura 21

Porcentaje de humedad de los testigos de la etapa II de ensayos.



5.3.3. Dosificaciones finales. (Etapa III de ensayos)

Una vez seleccionadas las dosificaciones óptimas a partir del diseño experimental factorial, se evaluaron considerando los mismos tiempos de curado mencionados anteriormente, sin embargo, se incorporó un criterio de evaluación relacionado con la resistencia a la



compresión simple bajo condiciones secas o sin inmersión, para poder comparar el comportamiento de los estabilizantes frente a ambos ambientes, saturados y secos.

Con el fin de obtener un valor de referencia se ensayaron probetas de suelo natural sin agentes estabilizantes para comparar el comportamiento de las dosificaciones estabilizadas con respecto a la respuesta de la resistencia a la compresión del suelo natural en condiciones de inmersión y humedad controlada, de esta forma se logró identificar una mejoría en la resistencia del suelo en condiciones secas y una mayor estabilidad al agua. Se prepararon 2 probetas por cada estado, el valor máximo de q_u para el suelo natural sin inmersión fue de 0,09 Mpa y en condiciones de saturación, el suelo evaluado no tuvo la capacidad de soportar los efectos de la inmersión.

Tabla 9

Análisis de la resistencia a la compresión de dosificaciones finales a 7 días.

Dosificaciones			Tiempo [días]	Estado seco			Inmersion (1 hr)		
Cemento [%]	Silicato de Sodio [%]	NaOH [%]		Resultado R1 (Mpa)	Resultado R2 (Mpa)	Resultado R3 (Mpa)	Resultado R1 (Mpa)	Resultado R2 (Mpa)	Resultado R3 (Mpa)
6	6	3	7	0.168	0.179	0.179	0.054	0.069	0.031
6	10	3		0.171	0.195	0.206	0.089	0.031	0.108
Total de probetas								12	

**Tabla 10**

Análisis de la resistencia a la compresión de dosificaciones finales a 28 días.

Dosificaciones			Tiempo [días]	Estado seco			Inmersion (1 hr)		
Cemento [%]	Silicato de Sodio [%]	NaOH [%]		Resultado R1 (Mpa)	Resultado R2 (Mpa)	Resultado R3 (Mpa)	Resultado R1 (Mpa)	Resultado R2 (Mpa)	Resultado R3 (Mpa)
6	6	3	28	0.266	0.270	0.271	0.143	0.132	0.139
6	10	3		0.326	0.363	0.348	0.255	0.232	0.208
Total de probetas								12	

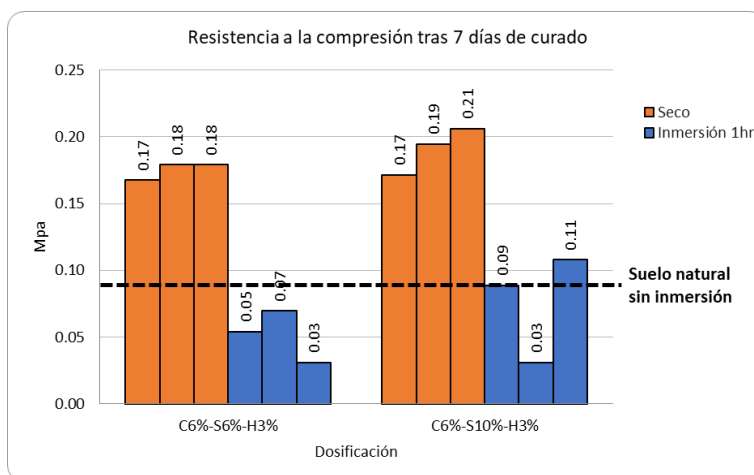
De estos resultados se logra evidenciar una gran diferencia entre el suelo natural y el suelo estabilizado. Se observa un comportamiento claro de incremento progresivo en la resistencia conforme aumenta el tiempo de curado, siendo coherente con los procesos de hidratación y reacción puzolánica para los materiales estabilizados.

A los 7 días, en estado seco, ambas dosificaciones muestran valores similares de resistencia a la compresión. Bajo condiciones de inmersión, la mezcla con mayor porcentaje de silicato de sodio (10%) mejora notablemente su desempeño, indicando una mejor resistencia al deterioro por humedad en etapas tempranas.

A los 28 días, la mezcla con 10% de silicato de sodio demuestra un desempeño superior en todas las condiciones evaluadas. En estado seco alcanza hasta 0.363 Mpa y tras la inmersión de 1 hora se obtuvo una resistencia máxima de 0.255 Mpa, reflejando una mayor durabilidad y cohesión de la matriz del material estabilizado. Esto sugiere que la mayor proporción de silicato de sodio favorece la formación de productos cementantes a largo tiempo.

Figura 22

Resistencia a la compresión inconfiada de probetas finales a 7 días de curado.



En la figura anterior se evidencian los resultados de resistencia a la compresión inconfiada en un tiempo de curado de 7 días, con las dos dosificaciones de estudio (C6-SS6-H3 y C6-SS10-H3), para las dos condiciones estipuladas. El valor de resistencia para el suelo natural sin inmersión, que equivale a 0.09 Mpa, se resalta en la Figura 22 por medio de una línea horizontal punteada. Los valores promedio para ambas mezclas (C6-SS6-H3 y C6-SS10-H3) en seco son de 0.175 y 0.191 Mpa respectivamente, y representan un incremento notable, duplicando aproximadamente la resistencia con respecto al suelo natural. Este incremento refleja una respuesta temprana favorable de los activadores alcalinos, que contribuyen a una mejor compactación y cohesión de la arcilla de alta plasticidad desde las primeras etapas.

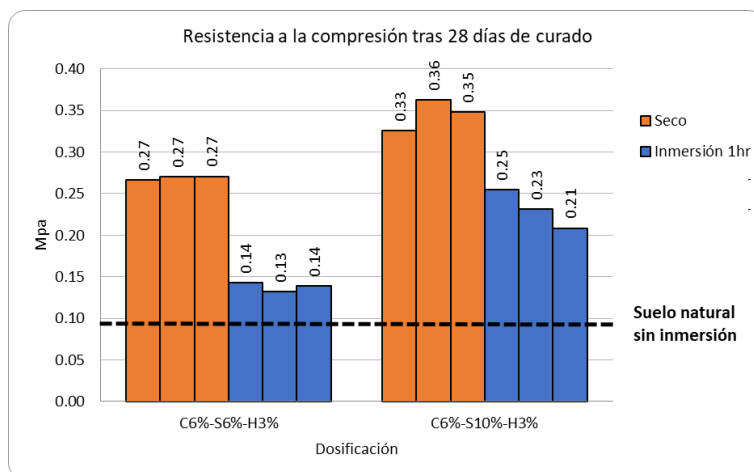
Con respecto a las condiciones de inmersión durante 1 hora a los 7 días de curado, se observó que la dosificación C6-SS10-H3 logró un comportamiento similar al del suelo natural, obteniendo una resistencia hasta de 0.108 Mpa demostrando una mayor resistencia frente a la



pérdida de cohesión por la acción del agua. En contraste, la dosificación C6-SS6-H3 no superó en ninguna de sus muestras ensayadas, el umbral de referencia que es la resistencia a la compresión inconfiada del suelo natural seco; lo que sugiere que el 10% de silicato de sodio favorece la formación de productos cementantes más estables y duraderos a etapas tempranas. Es de remarcar que para esta condición se tuvo una mayor variabilidad en los resultados de resistencia. Esto debido a que algunas muestras presentaron desprendimientos mínimos de material durante el tiempo de inmersión que posteriormente influyó en el ensayo de compresión simple.

Figura 23

Resistencia a la compresión inconfiada de probetas finales a 28 días de curado.



Los resultados a 28 días confirman una evolución positiva en la resistencia a la compresión de las mezclas estabilizantes. Las resistencias para las dosificaciones. C6-SS6-H3 y C6-SS10-H3 fueron 52% y 140% mayores respecto a la del suelo natural sin inmersión, evidenciando un comportamiento mecánico y de durabilidad notablemente superiores. En estado

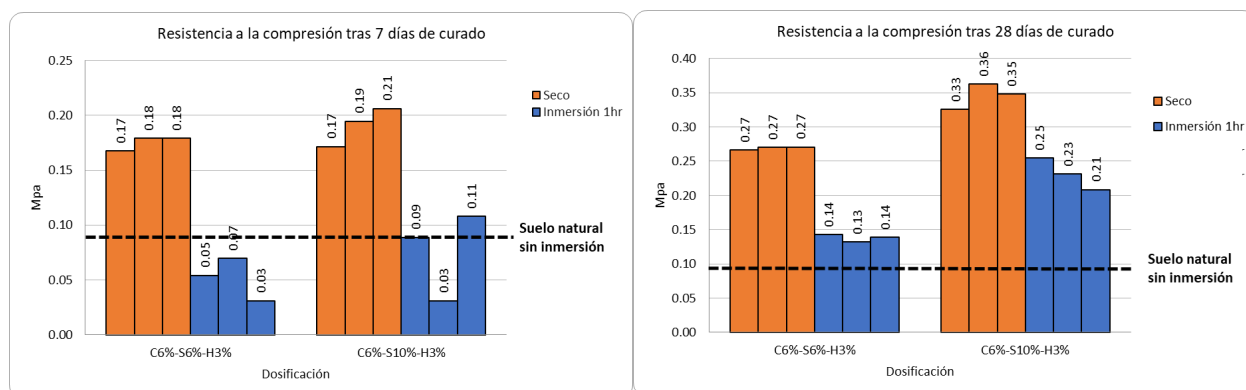


seco, la mezcla con el porcentaje de 6% de silicato de sodio presenta un promedio de 0.269 Mpa, mientras que aquella con 10% alcanza 0.346 Mpa, mostrando una mayor resistencia asociada al contenido de silicato en cada muestra. Asimismo, se observa un crecimiento significativo de resistencia en comparación con los resultados a 7 días, pues la mezcla con 6% de Silicato crece aproximadamente un 35%, mientras que la mezcla con 10% experimenta un aumento cercano al 45%. Esta tendencia reafirma el papel activo del silicato de sodio en el proceso de activación alcalina.

4.2.4 Comparación de la resistencia a las dos edades de curado.

Figura 24

Resistencia a la compresión inconfiada de probetas finales a 7 y 28 días de curado.



En la figura anterior se evidencia que en ambas muestras estabilizadas se presentó un aumento progresivo de resistencia con el incremento del tiempo de curado. La mezcla C6-SS6-H3 mostró un aumento del 34.9% en estado seco, pasando de 0.175 Mpa (promedio a 7 días) a 0.266 Mpa (Promedio a 28 días). En condiciones de inmersión, esta misma mezcla incrementó su resistencia de 0.051 Mpa a 0.138 Mpa, lo que representa un 62,7% de mejora. Por su parte, la



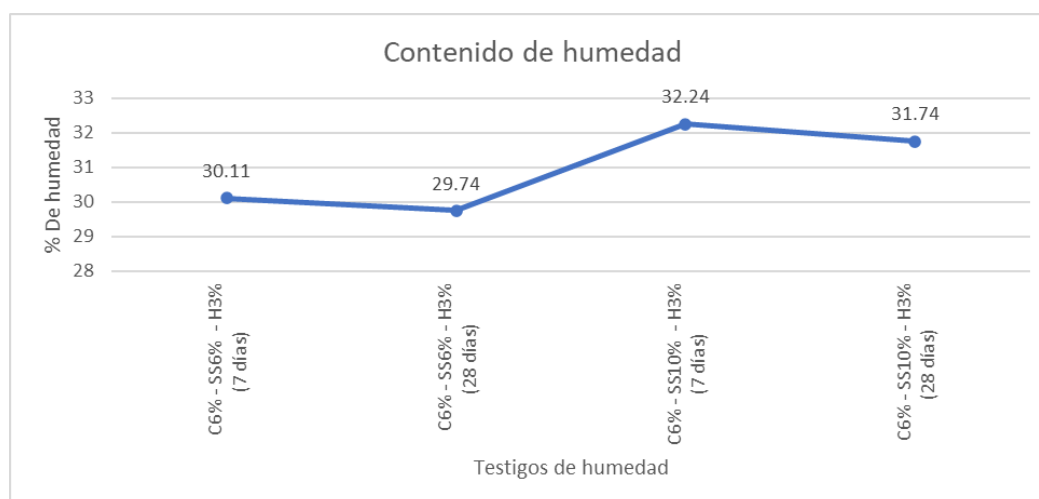
mezcla C6-SS10-H3 reflejó un comportamiento aún más favorable ya que en estado seco, la resistencia pasó de 0.191 Mpa a 0.346 Mpa, con un aumento del 44,8%, mientras que bajo inmersión aumentó de 0.076 Mpa a 0.208 Mpa, correspondiente a un 67,2% de incremento.

Al comparar estos valores con la resistencia del suelo natural, se logra concluir que ambas dosificaciones, superan dicho umbral a los 28 días de curado incluso en sus condiciones más críticas, como lo es la condición de inmersión. Sin embargo, para edades tempranas (7 días) el estabilizante C6-SS10-H3 da mejores resultados, mejorando las condiciones del suelo a tal punto que, en condiciones saturadas, el suelo se comporta igual que en su condición inicial seca.

Cabe destacar que la resistencia máxima alcanzada en el conjunto de ensayos de esta etapa fue de 0.363 Mpa, correspondiente a la mezcla C6-SS10-H3 en estado seco a los 28 días, lo que equivale a un incremento aproximado en la resistencia del 75,1% respecto al suelo natural.

Figura 25

Porcentaje de humedad de los testigos de la etapa III de ensayos





5.3.4. Mejor dosificación (Etapa IV de ensayos)

En la última etapa de ensayos se decidió ensayar únicamente la dosificación que mejor desempeño tuvo en las anteriores etapas, la cual corresponde a la dosificación C6-SS10-H3. La condición de los ensayos fue inmersión de 1 hora después de 28 días de curado para las 7 probetas ensayadas.

Se ensayaron 7 probetas con la misma condición con el propósito de respaldar y validar los resultados anteriormente obtenidos y reducir la variabilidad de los resultados para esta dosificación.

Tabla 11

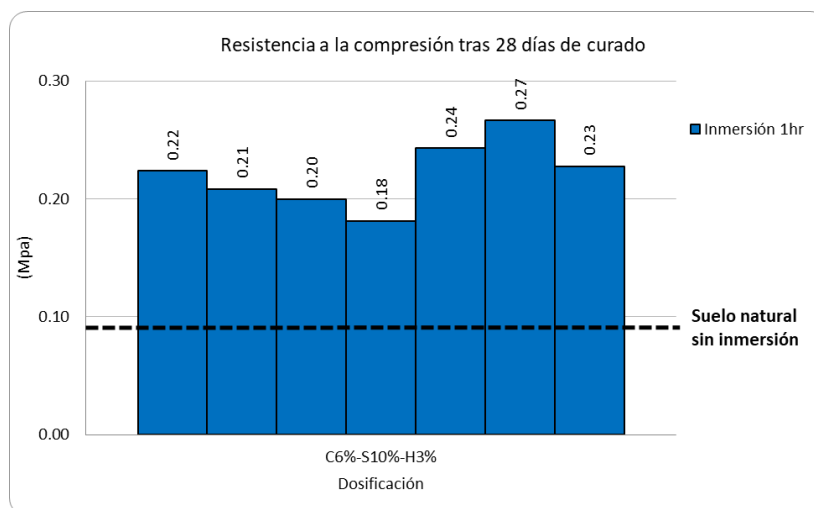
Análisis de la resistencia a la compresión de dosificaciones finales a 28 días.

Dosificaciones			Tiempo [días]	Resultado R1 (Mpa)	Resultado R2 (Mpa)	Resultado R3 (Mpa)	Resultado R4 (Mpa)	Resultado R5 (Mpa)	Resultado R6 (Mpa)	Resultado R7 (Mpa)
Silicato de sodio [%]	Cemento [%]	NaOH [%]								
10	6	3	28	0.224	0.208	0.200	0.181	0.243	0.266	0.228
Total de probetas										7

Dado que los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada fueron similares a los de las anteriores pruebas, se puede concluir que a pesar de que en esta etapa solo se ensayó el suelo bajo una condición los resultados validan el comportamiento obtenido en la etapa III en donde encontramos que ya a los 7 días, la combinación suelo-estabilizante con la dosificación C6-SS10-H3 en condiciones saturadas, era tan estable como el suelo natural seco. La humedad del testigo tomado fue de 28.2% lo que sugiere que se realizó correctamente el cálculo de cantidades de la mezcla para obtener la densidad máxima.

Figura 26

Resistencia a la compresión inconfiada de la mejor dosificación tras 28 días de curado.



5.4. Índice de resistencia al agua

El índice de resistencia al agua (IRA) constituye un parámetro fundamental en la caracterización del comportamiento de materiales estabilizados frente a condiciones de saturación. Este índice se calcula con la relación entre la resistencia a la compresión inconfiada de una muestra remoldeada sometida a un periodo de inmersión y la resistencia de la misma muestra en condiciones secas. Su valor permite cuantificar el grado en que la presencia de agua afecta la integridad estructural del suelo estabilizado, siendo de especial interés en aplicaciones donde el material se encuentre en ambientes húmedos.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados de la etapa III, se observaron diferencias significativas en el comportamiento de las dos mezclas seleccionadas para los tiempos de curado evaluados. Para el periodo de 28 días de curado, la mezcla C6-SS6-H3 presentó un índice de 60%, mientras que la otra mezcla C6-SS10-H3 alcanzó un valor de



78.2%. Esta variación puede atribuirse al mayor contenido de silicato de sodio en la segunda mezcla, el cual, al actuar como un activador alcalino, potencia la formación de geles cementantes que favorecen la cohesión interna del material incluso bajo condiciones de inmersión.

Teniendo C6-SS10-H3 como dosificación seleccionada se interpreta con su índice de resistencia al agua que el material pierde alrededor del 21.8 % de su resistencia al estar en condiciones de humedad o saturación.

5.5. Tipos de fallas en las probetas

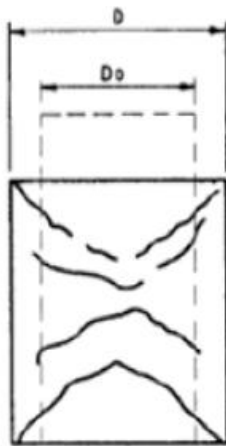
Durante el desarrollo de los ensayos de resistencia a la compresión inconfínada, se identificaron principalmente dos tipos de fallas en las probetas, de acuerdo con la clasificación presentada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS): la falla frágil y la falla cilíndrica. Estas fallas son representativas del comportamiento mecánico de mezclas estabilizadas, como las utilizadas en esta investigación con materiales químicos no convencionales. La falla frágil se evidenció por una ruptura inclinada y abrupta, característica de materiales con un componente quebradizo ante la carga. Por otro lado, la falla cilíndrica mostró fisuras horizontales y deformación sin fractura instantánea, asociada a una distribución más uniforme de esfuerzos. (INVIAS, s.f.).

Figura 27

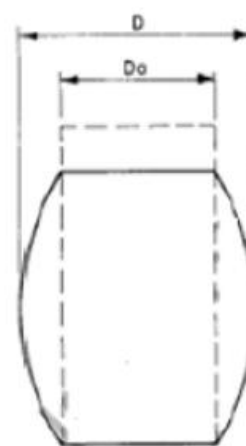
Tipología de fallas en el ensayo de resistencia a la compresión inconfina de muestras de suelo estabilizadas con productos químicos no tradicionales INV E 632-22



Falla frágil



Falla cilíndrica



Falla en forma de barril



NO SE PRESENTÓ ESTA FALLA

Nota. Estas figuras son tomadas como referencia de la norma INV E 632-22 y por referencia propia

5.6. Comparación de resultados con estudios previos

Una vez obtenidos los resultados experimentales del programa de ensayos, estos fueron contrastados con investigaciones y estudios previos reportados en la literatura consultada,



particularmente aquellos enfocados en la estabilización química de suelos finos mediante el uso de silicato de sodio y activadores alcalinos. Esta comparación permitió validar las tendencias observadas en términos de incremento de la resistencia mecánica y mejora en la estabilidad al agua, evidenciando comportamientos consistentes con relación a la reducción de la susceptibilidad a la degradación por inmersión descritos por otros autores.

Específicamente el documento de (Michael Steven Cerón Males, María Camila Cuéllar Cornejo) se obtuvo para las dosificaciones seleccionadas, que a los 28 días de curado la resistencia a la compresión de las probetas con estabilizante superó en todas las condiciones (con inmersión y sin inmersión) el umbral de la resistencia del suelo natural seco. Sin embargo, la diferencia de este trabajo de investigación fue que a los 28 días de curado las probetas con el estabilizante más óptimo en concición de inmersión por 1 hora, obtuvieron más del doble de resistencia que el suelo natural seco; esto puede atribuirse a que en este estudio las dosificaciones ensayadas tenían un porcentaje de cemento del 6% mientras que el estudio en referencia usó 4% debido a la plasticidad de los suelos estudiados.

En otros documentos como el de (Neeladharan, C., et al., 2018) se encontró que la combinación de silicato de sodio y polvo de mármol redujo el límite plástico del suelo, lo que indica una disminución en su plasticidad y una mayor estabilidad estructural. Esto valida el comportamiento de las probetas preliminares ensayadas en este trabajo investigativo, en donde se evidencia una necesidad de un porcentaje mayor de cemento que sería el equivalente al polvo de mármol ya que actúan como aglutinantes a la hora de la estabilización.



6. Propuesta para futuras investigaciones

6.1. Máquina para evaluar muestras estabilizadas bajo carga dinámica

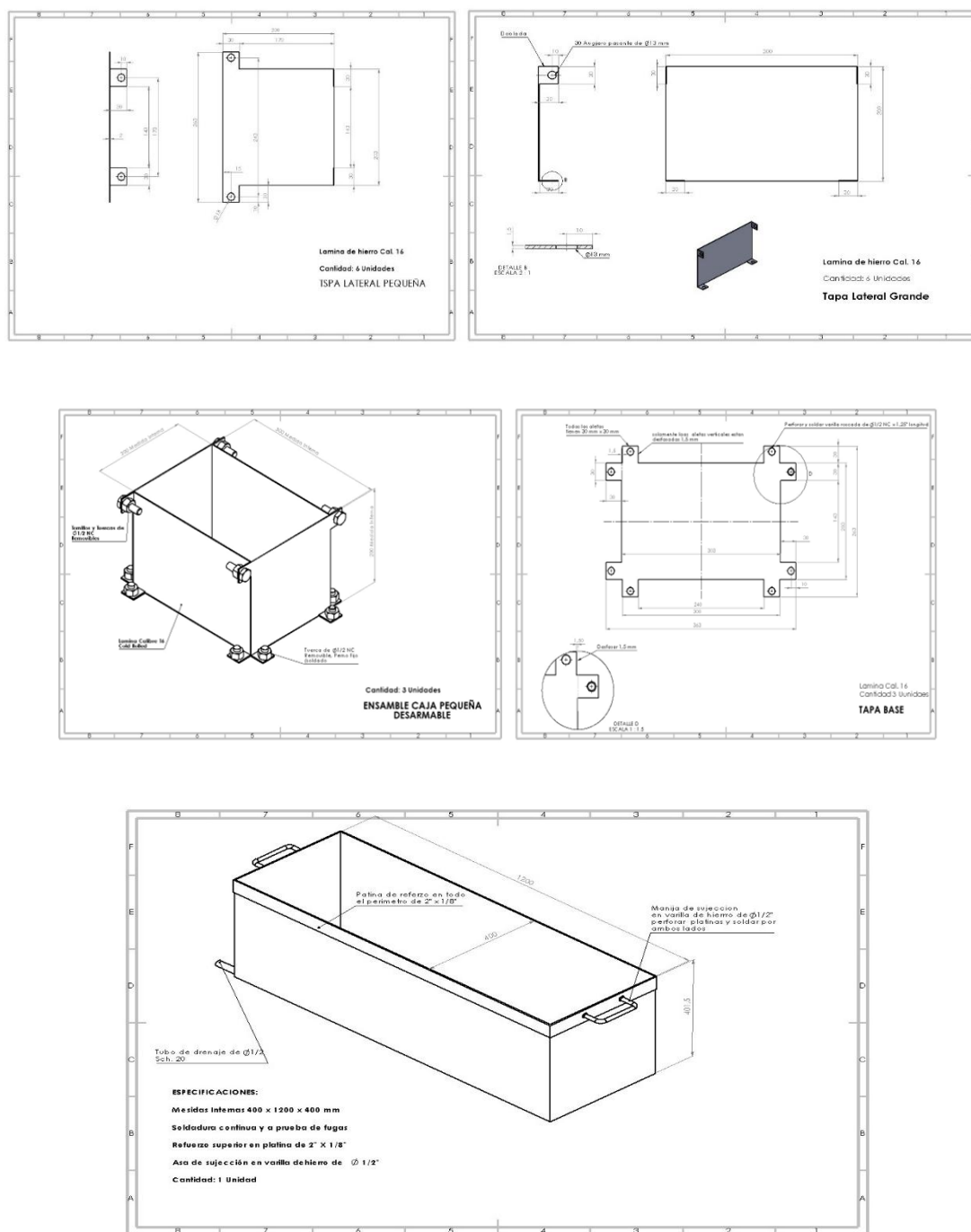
Adicional al estudio basado en la realización de ensayos de laboratorio, se intentó desarrollar una máquina para realizar las pruebas en laboratorio. Esta máquina consta de un mecanismo que incorpora una llanta, la cual recorre longitudinalmente muestras de suelo, generando esfuerzos controlados para simular condiciones reales de carga en carretera y permitir la medición del asentamiento producido.

El desarrollo del equipo corresponde a una necesidad de contar con un instrumento asequible que facilite la caracterización y el análisis del comportamiento mecánico de mezclas de suelo bajo cargas dinámicas, en condiciones secas o saturadas, lo cual es fundamental para el estudio geotécnico en carreteras y obras civiles en general. La máquina permite replicar de forma repetitiva el paso de cargas a través de la llanta, registrando de manera sistemática el hundimiento producido en la muestra.

Cómo se logra evidenciar a continuación en la Figura 28, la estructura metálica grande es donde se alojarían las muestras con tres cajas pequeñas de muestras internas, que a su vez cuentan con piezas removibles, con el fin de que las muestras a la hora de ser ensayadas no tengan condiciones de confinamiento y se puedan excluir los esfuerzos que podrían generarse por las platinas. Al mismo tiempo, el diseño de la caja grande cuenta con un mecanismo de drenaje, con el fin de saturar las muestras de ser necesario y lograr que el agua pueda ser desalojada del área de estudio.

Figura 28

Planos estructurales de la máquina para el diseño preliminar





A parte de la estructura donde se almacenarían las muestras, se propuso un mecanismo que albergase el motor y la rueda con la cual se transmitiría la carga del ensayo.

Si bien el diseño conceptual y estructural del equipo fue desarrollado hasta la fase de planos técnicos, la construcción física de la máquina no se logró materializar debido a limitaciones presupuestales y de recursos disponibles durante la ejecución del proyecto. No obstante, el planteamiento constituye una base sólida para futuras investigaciones orientadas al perfeccionamiento del equipo y su implementación práctica en laboratorios de mecánica de suelos.

La máquina propuesta permitiría reproducir, en condiciones “controladas”, los efectos de cargas cíclicas y repetitivas sobre suelos estabilizados, lo cual representa un avance significativo respecto a los métodos convencionales de ensayo estático. La incorporación de un sistema de carga mediante una llanta que se desplaza longitudinalmente sobre las muestras ofrece la posibilidad de estudiar de manera más realista el comportamiento del suelo bajo condiciones similares a las de tránsito vehicular, tanto en estado seco como saturado.

El diseño modular y desmontable de las cajas internas facilita el manejo de las muestras, su remoción posterior al ensayo y la realización de pruebas comparativas entre diferentes tipos de estabilización. Igualmente, la inclusión de un sistema de drenaje en la estructura principal permitiría evaluar la influencia de la presencia del agua en el desempeño mecánico de los suelos, aspecto fundamental en esta investigación y futuras investigaciones donde la variabilidad de los estados seco y húmedo sea de gran importancia para el desarrollo de los ensayos.



7. Conclusiones

En este trabajo de investigación, que tuvo como objetivo general evaluar la estabilidad al agua de un suelo fino (CH) estabilizado con adición de un compuesto químico experimental, partiendo de un enfoque metodológico basado en la realización de ensayos de laboratorio, se concluye que:

- Por medio de las probetas sometidas a inmersión, se determinó que las dosificaciones óptimas para que las muestras conservarán su integridad bajo el agua (estabilidad al agua), fueron C6%-S6%-H3% y C6%-S10%-H3%, siendo esta última la que mejor desempeño presentó en todas las condiciones ensayadas.
- Los resultados de resistencia a la compresión de las muestras de suelo estabilizado con el compuesto experimental reflejan un incremento de resistencia a medida que el tiempo de curado aumenta de 7 a 28 días, evidenciando que la exposición de las probetas a un ambiente de humedad controlada influye de manera positiva en las reacciones puzolánicas que se llevan a cabo en el suelo, y a su vez son las encargadas de generar el gel de sílice, responsable de la unión entre partículas.
- La acción de la mezcla de silicato de sodio - cemento influyó de manera positiva en el comportamiento de las probetas en condiciones críticas de inmersión en agua, como se evidenció con las dosificaciones óptimas que alcanzaban resistencias superiores a las del suelo natural seco.



- El hidróxido de sodio tiene un papel importante para el desarrollo de la resistencia, esto se evidenció en las etapas I y II de ensayos en donde la variación del porcentaje de este componente influía en la resistencia a edades tempranas (7 días).
- La resistencia obtenida para la dosificación C6-SS10-H3 fue en promedio un 131% mayor respecto a la del suelo natural sin inmersión, evidenciando un comportamiento mecánico y de durabilidad notablemente superior y validando la aplicabilidad de este estabilizante para arcillas de alta plasticidad.



8. Recomendaciones

- Si se pretende aplicar este tipo de estabilización en campo, se recomienda desde un comienzo plantear un estricto protocolo de mezcla, en el cual se priorice la disolución del silicato de sodio en el agua de mezclado antes de ser esparcido en el suelo, dado que si se aplica directamente al suelo, este debido a su viscosidad producirá que las partículas se aglomeren de manera irregular, provocando que no se esparza en todo el suelo, por lo cual no cubrirá de manera homogénea la mayor parte de las partículas.
- Para la aplicación práctica de este estabilizante se recomienda tener controles para el proceso de compactación, de esta forma se asegura la compactación adecuada para garantizar la densidad máxima de la mezcla.
- Para evaluar el comportamiento de estabilizantes bajo efecto de una carga dinámica se recomienda para futuras investigaciones continuar la construcción y perfeccionamiento de la máquina planteada en este documento.



Bibliografía

- AASHTO. (2021). Standard Method of Test for Particle-Size Analysis of Soils. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alarcón, Jiménez & Benítez. (2010). Stabilization of soils through the use of oily sludge. <https://www.scielo.cl/pdf/ric/v35n1/0718-5073-ric-35-01-5.pdf>
- ASTM C 136-01. Método de Ensayo Normalizado para determinar el análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/328614344/ASTM-C-136-01-doc>
- ASTM D4609-94e. Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Chemicals for Soil Stabilization. <https://www.astm.org/d4609-94e01.html>
- ASTM International. (2011). Práctica estándar para la clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos – SUCS). CESMEC.
- Badillo, E., & Rodríguez, A. (1973). Fundamentos de mecánica de suelos, Tomo I.
- Cid L., G., López S., T., & González R., F. (2006). Parámetros fundamentales para la caracterización hidropedológica general de los suelos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 15(4), 42–47.
- Cruz, M. P., Schmädke, M., Italo, F., & Perret, G. (2015). Estabilización de subrasante loésica con silicato de sodio líquido. In XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires.
- Das, B. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (4.^a ed.). <https://www.academia.edu>
- Elmannaey, A. S., Fouad, H. E. E., & Youssef, Y. G. (2021). Improvement of swelling chlorite soil using sodium silicate alkali activator. Ain Shams Engineering Journal, 12, 1535–1544.



- Emad, E., Sheikha, A. A., & Ahmed, A. (2021). Effect of sodium silicate on the unconfined compressive strength of sand dune. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1105, 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1105/1/012095>
- Hosseini, M., Bujang, B., Kazemian, S., & Saman, D. (2012). Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout. *International Journal of Physical Sciences*, 1395–1402. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.1509>
- INVIAS. (2023, diciembre). Estado de la red vial. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>
- Junco del Pino, J. M., & Tejeda Piusseaut, E. (2011). Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 5(2).
- Kiuna, V. G., & Kaya, Z. (2023). Effect of sodium silicate and cement on the improvement of engineering properties of organic soil. *Revista de la Construcción*, 22(3), 632–645. <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.3.632>
- López-Lara, T., et al. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(3), 159–168.
- Martínez-Murillo, L. I., & Olaya-Morales, Y. (2019). Estimación de costos del ciclo de vida para la estabilización de vías terciarias en Colombia con subproductos industriales. *Lecturas de Economía*, (91), 241–277. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n91a08>
- Neeladharan, C., Sathish, P., Nandhini, A., Priya, R., Fathima, I. S., & Srimathi, J. (2018). Stabilization of soil by using marble dust with sodium silicate as binder. *International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology*, 5(Special Issue 5), 45–49. <https://doi.org/10.20247/IJARTET.2018.05S0503009>



- Pouya Javadzadeh. (2021). The effects of sodium silicate on stabilization of organic soil. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education, 12(14), 1774–1782.
<https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i14.10521>
- Rivera, J., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos: materiales convencionales y activados alcalinamente (review). Informador Técnico, 84(2), 202–226. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- SISTEMA AASHTO M-145. Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. Recuperado de:
<https://es.scribd.com/document/477223946/Clasificacion-AASHTO-M-145>