

# RAMIREZ REGALADO KREYSI FABIOLA GUILLIANA-Análisis de la influencia del aditivo Consolid 444 y Solidry para mejora...

 Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo

---

## Document Details

Submission ID

trn:oid::3117:583178797

Submission Date

Apr 26, 2026, 10:08 AM GMT-5

Download Date

Apr 26, 2026, 1:18 PM GMT-5

File Name

RAMIREZ REGALADO KREYSI FABIOLA GUILLIANA-Análisis de la influencia del aditivo Consolid 4....docx

File Size

176.0 KB

92 Pages

26,408 Words

139,761 Characters




# 14% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

## Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
  - ▶ Cited Text
  - ▶ Small Matches (less than 10 words)
- 

## Top Sources

- 11%  Internet sources
  - 1%  Publications
  - 10%  Submitted works (Student Papers)
-

## Top Sources

- 11% Internet sources
- 1% Publications
- 10% Submitted works (Student Papers)

## Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

<b>1</b>	Internet	
tesis.usat.edu.pe		2%
<b>2</b>	Internet	
hdl.handle.net		1%
<b>3</b>	Internet	
repositorio.ucv.edu.pe		<1%
<b>4</b>	Internet	
repositorio.unj.edu.pe		<1%
<b>5</b>	Internet	
revistas.uclave.org		<1%
<b>6</b>	Internet	
repositorio.uandina.edu.pe		<1%
<b>7</b>	Internet	
repositorio.upse.edu.ec		<1%
<b>8</b>	Submitted works	
Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-19		<1%
<b>9</b>	Submitted works	
Universidad Cesar Vallejo on 2025-07-17		<1%
<b>10</b>	Submitted works	
Universidad Cesar Vallejo on 2022-05-26		<1%
<b>11</b>	Internet	
noesis.uis.edu.co		<1%

12	Internet	repositorio.continental.edu.pe	<1%
13	Internet	de.scribd.com	<1%
14	Submitted works	Higher Education Commission Pakistan on 2025-10-22	<1%
15	Submitted works	Usuario Web on 2026-03-17	<1%
16	Internet	www.slideshare.net	<1%
17	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-12	<1%
18	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-18	<1%
19	Internet	repositorio.udh.edu.pe	<1%
20	Internet	repositorio.unprg.edu.pe	<1%
21	Internet	renatiqa.sunedu.gob.pe	<1%
22	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-18	<1%
23	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2023-01-26	<1%
24	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-17	<1%
25	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-06	<1%

26	Submitted works	Universidad Tecnologica de los Andes on 2024-12-12	<1%
27	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2025-02-10	<1%
28	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2018-11-28	<1%
29	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2022-05-26	<1%
30	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2026-01-05	<1%
31	Internet	repositorio.uss.edu.pe	<1%
32	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2025-10-03	<1%
33	Submitted works	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2026-02-12	<1%
34	Submitted works	Universidad Tecnologica del Peru on 2024-12-09	<1%
35	Internet	upc.aws.openrepository.com	<1%
36	Internet	docplayer.es	<1%
37	Internet	repositorio.uns.edu.pe	<1%
38	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2021-07-01	<1%
39	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2023-11-03	<1%

40	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2026-01-08	<1%
41	Submitted works	Universidad San Ignacio de Loyola on 2022-11-07	<1%
42	Submitted works	Universidad San Francisco de Quito on 2024-10-06	<1%
43	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-15	<1%
44	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-03-18	<1%
45	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2022-07-22	<1%
46	Submitted works	Universidad Católica San Pablo on 2024-12-03	<1%
47	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-16	<1%
48	Submitted works	Universidad Pontificia Bolivariana on 2019-10-17	<1%
49	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-09-18	<1%
50	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-10-15	<1%
51	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2026-02-20	<1%
52	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-12-22	<1%
53	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%

54	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2019-10-03	<1%
55	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2017-11-13	<1%
56	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-01-20	<1%
57	Submitted works	Universidad Nacional del Centro del Peru on 2020-09-23	<1%
58	Submitted works	Universidad Nacional del Centro del Peru on 2022-05-24	<1%
59	Submitted works	Universidad Tecnologica del Peru on 2025-07-11	<1%
60	Internet	repositorio.ucp.edu.pe	<1%
61	Internet	1library.co	<1%
62	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-09-29	<1%
63	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2025-01-30	<1%
64	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2025-10-10	<1%
65	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2024-10-15	<1%
66	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2022-12-21	<1%
67	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2023-12-13	<1%

68	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-07-13	<1%
69	Submitted works	Universidad Santo Tomas on 2016-05-05	<1%
70	Submitted works	Universidad Tecnologica del Peru on 2024-12-09	<1%
71	Internet	www.fao.org	<1%
72	Submitted works	Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador on 2017-1...	<1%
73	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-08-15	<1%
74	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2024-12-04	<1%
75	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2024-12-27	<1%
76	Submitted works	Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo on 2025-05-16	<1%
77	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2022-08-05	<1%
78	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-01-13	<1%
79	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-11-17	<1%
80	Submitted works	Universidad Industrial de Santander UIS on 2026-02-16	<1%
81	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2025-05-03	<1%

82	Internet	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
83	Internet	repositorio.upn.edu.pe	<1%
84	Internet	repositorio.utea.edu.pe	<1%
85	Internet	www.coursehero.com	<1%
86	Internet	www.dspace.unitru.edu.pe	<1%
87	Submitted works	BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA on 2019-10-17	<1%
88	Publication	Jeffrey J. Roth, William Hughes. "Dam Maintenance and Rehabilitation II", CRC Pre...	<1%
89	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2018-07-04	<1%
90	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2022-09-21	<1%
91	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-11-22	<1%
92	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2020-09-14	<1%
93	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2025-10-28	<1%
94	Submitted works	Universidad Católica San Pablo on 2023-11-24	<1%
95	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2017-03-21	<1%

96	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2022-08-05	<1%
97	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2023-07-08	<1%
98	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2023-08-03	<1%
99	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-07-04	<1%
100	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-10-23	<1%
101	Submitted works	Universidad Continental on 2025-04-14	<1%
102	Submitted works	Universidad Continental on 2025-10-17	<1%
103	Submitted works	Universidad Continental on 2026-02-06	<1%
104	Submitted works	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2024-01-29	<1%
105	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2024-05-21	<1%
106	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2025-10-06	<1%
107	Submitted works	Universidad Ricardo Palma on 2017-03-21	<1%
108	Internet	bvs.sld.cu	<1%
109	Internet	core.ac.uk	<1%

110	Internet	es.scribd.com	<1%
111	Internet	patents.google.com	<1%
112	Internet	repositorio.uap.edu.pe	<1%
113	Internet	repositorio.ulvr.edu.ec	<1%
114	Internet	repositorio.unc.edu.pe	<1%
115	Internet	repositorio.upla.edu.pe	<1%

1

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

1

Análisis de la influencia del aditivo Consolid 444 y Solidry para mejorar la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

AUTOR

Kreysi Fabiola Guilliana Ramirez Regalado

1

ASESOR

Joaquín Hernán Rojas Oblitas

<https://orcid.org/0000-0002-6521-0215>

Año de sustentación: Chiclayo, 2026

Análisis de la influencia del aditivo Consolid 444 y Solidry para mejorar la capacidad portante de la subrasante suelos arcillosos

PRESENTADO POR

Ramirez Regalado Kreysi Fabiola Guilliana

1

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

1 Martinez Fiestas Mario Antonio  
PRESIDENTE

1 Angel Alberto Lorren  
Palomino  
Oblitas

Joaquin Hernan Rojas

SECRETARIO  
VOCAL

### Agradecimiento

19 A Dios, por acompañarme en cada momento de este camino, por darme la fuerza cuando las cosas parecían difíciles y la serenidad para seguir adelante sin rendirme.

A mis padres, quienes con su amor, paciencia y sacrificio han sido el pilar más grande de mi vida. Gracias por creer en mí, y por enseñarme, con su ejemplo, que la perseverancia y la honestidad son el camino hacia los logros verdaderos. Este logro también les pertenece a ustedes.

A mis asesores Ing. Rojas Oblitas Joaquín y al Ing. López Carranza Rubén, por su tiempo, orientación y compromiso, que me ayudaron a transformar las ideas en resultados y a ver la investigación con una mirada más crítica y profesional.

16 A todos los que, de alguna forma, aportaron su granito de arena en este proceso, gracias por formar parte de este logro que no es solo mío, sino de todos los que me acompañaron con cariño.

1 Índice  
Resumen 11  
Abstract 12  
Introducción 13

28

Revisión de la literatura	16
Materiales y métodos	36
Resultados y Discusiones	63
Conclusiones	96
Recomendaciones	98
Referencias	99
Anexos	103
Anexo N°01: Flujograma de contrastación de la hipótesis	103
Anexo N°02: Matriz de consistencia	105
Anexo N°03: Registro fotográfico	106
Anexo N°04: Validación de ensayos	114

Lista de Figuras

Fig. 1. Sistema CONSOLID [15].	21	
Fig. 2. Aplicación de las fuerzas del neumático [15].	22	
Fig. 3. Perfiles de suelo -AASHTO [22].	25	
Fig. 4. Suelos granulares [22].	25	
Fig. 5. Suelos finos [22].	26	
Fig. 6. Clasificación de suelos según ASSHTO [22].	26	
Fig. 7. Zonificación urbana de José Leonardo Ortiz según [32].	39	
Fig. 8. Áreas tomadas como muestra en la Urbanización Carlos Stein [36].	40	
Fig. 9. Flujograma.	47	
Fig. 10. Ubicación de calicatas	48	
Fig. 11. Muestra C-01		Fig. 12. Muestra
C-02	49	
Fig. 13. Muestra C-03		Fig. 14. Muestra
C- 04	49	
Fig. 15. Lavado de las muestras.	51	
Fig. 16. Lavado de muestras C1,C2,C3.	51	
Fig. 17. Secado al horno.	51	
Fig. 18. Granulometría por tamizado.	52	
Fig. 19. Pesado de las muestras	52	
Fig. 20. Muestras al horno.	52	
Fig. 21. Límites de Atterberg	53	
Fig. 22. Formado de cilindros.	54	
Fig. 23. Peso de fiola+agua.	54	
Fig. 24. Colocación de la muestra en la fiola.	55	
Fig. 25. Peso de la muestra.	55	
Fig. 26. Saturación de muestra.	56	
Fig. 27. Proctor.	56	
Fig. 28. Enrasado de molde.	56	

Fig. 29. Proctor en E.N C-01.	57	
Fig. 30. Proctor en E.N C-02.	58	
Fig. 31. Proctor en E.N C-03.	58	
Fig. 32. Peso de la muestra 5kg.	59	
Fig. 33. Amasado de la muestra.	59	
Fig. 34. Muestras sumergidas.	60	
Fig. 35. Prueba de expansión.	60	
Fig. 36. Ensamblajes de moldes.	60	
Fig. 37. Penetración.	60	
Fig. 38. Peso de la muestra. Solidry.	61	Fig. 39. Peso de
Fig. 40. Mezclado de la muestra. enrasado	62	Fig. 41. Compactado +
Fig. 42. Briquetas SN Y SM. horas.	62	Fig. 43. Sumergido 0
Fig. 44. Sumergido 1 horas.	62	
Fig. 45. Curva granulométrica	65	
Fig. 46. Representación de límites en E.N	66	
Fig. 47. Representación %cont.humedad en E.N	67	
Fig. 48. Representación Proctor en E.N	70	
Fig. 49. Representación de CBR en E.N	71	
Fig. 50. Representación de Limites +adición	72	
Fig. 51. Representación de resultados de Limites de Atterberg con adición	73	
Fig. 52. Representación de Limites de Atterberg con adición C-03	74	
Fig. 53. Representación Proctor+ adición	76	
Fig. 54. Representación Proctor+adición C-02	77	
Fig. 55. Representación de Proctor+adición C-03	78	
Fig. 56. Representación de CBR+ adición C-01	79	
Fig. 57. Representación de CBR+adición C-02	80	
Fig. 58. Representación de CBR+ adición C-03	81	

Lista de

Tablas

TABLA I	21
TABLA II	22
TABLA III	22
TABLA IV	23
TABLA V	29
TABLA VI	30
TABLA VII	33
TABLA VIII	35
TABLA IX	39
TABLA X	40
TABLA XI	41
TABLA XII	41
TABLA XIII	41
TABLA XIV	42
TABLA XV	42
TABLA XVI	42
TABLA XVII	43
TABLA XVIII	43
TABLA XIX	44
TABLA XX	45
TABLA XXI	46

1

TABLA	XXII	49	
TABLA	XXIII		53
TABLA	XXIV	57	
TABLA	XXV	57	
TABLA	XXVI	58	
TABLA	XXVII		64
TABLA	XXVIII		64
TABLA	XXIX	65	
TABLA	XXX	66	
TABLA	XXXI	66	
TABLA	XXXII		67
TABLA	XXXIII		68
TABLA	XXXIV		68
TABLA	XXXV	69	
TABLA	XXXVI		69
TABLA	XXXVII		70
TABLA	XXXVIII		71
TABLA	XXXIX		72
TABLA	XL	72	
TABLA	XLI	73	
TABLA	XLII	73	
TABLA	XLIII		74
TABLA	XLIV	75	
TABLA	XLV	76	
TABLA	XLVI	77	
TABLA	XLVII		79
TABLA	XLVIII		80
TABLA	XLIX	81	
TABLA	L	82	
TABLA	LI	83	
TABLA	LII	84	
TABLA	LIII	84	
TABLA	LIV	85	
TABLA	LV	86	
TABLA	LVI	86	
TABLA	LVII	87	
TABLA	LVIII		87
TABLA	LIX	88	
TABLA	LX	88	
TABLA	LXI	89	
TABLA	LXII	89	

13

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Contenido de humedad [27]	31
Ecuación 2. Límite líquido[27]	32
Ecuación 3. Límite Plástico [27]	32
Ecuación 4. Límite de Plasticidad [27]	33
Ecuación 5. Densidad húmeda [27]	34
Ecuación 6. Densidad seca [27]	34
Ecuación 7. Coeficiente de permeabilidad (k) [27]	36

## Resumen

15 Esta investigación tiene por objetivo analizar la influencia de los aditivos Consolid 444 y Solidry en la mejora de la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, realizando calicatas, ensayos de laboratorio de granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad, Proctor y CBR, tanto en estado natural como estabilizado con diferentes dosificaciones de aditivos. Los resultados iniciales mostraron que las muestras tomadas corresponden a la clasificación A-7-6 (17) según AASHTO y CL según SUCS, con un CBR entre 2 % y 4 %, evidenciando una subrasante de baja resistencia (pobre), no apta para subrasante según normativa. Tras la aplicación de Consolid C444 y Solidry, se observó un del CBR hasta 29 %, con la dosificación óptima de 0.032 % y 3 % respectivamente. De igual modo, los ensayos hidráulicos, como la ascensión capilar y la permeabilidad, evidenciaron un comportamiento altamente favorable, mostrando una disminución notable en sus valores. Estos resultados confirman la eficacia de los aditivos para mejorar la capacidad portante del suelo, demostrando además que el sistema Consolid-Solidry constituye una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para estabilizar suelos arcillosos en proyectos viales.

## Palabras clave:

8 Consolid 444, Solidry, capacidad portante, subrasante, suelo arcilloso, estabilización química, CBR.

## Abstract

5 This research aims to analyze the influence of the additives Consolid 444 and Solidry on improving the bearing capacity of the subgrade in clay

110 soils. The research was conducted using an experimental approach, carrying out test pits, laboratory tests for particle size distribution, Atterberg limits, moisture content, Proctor density, and CBR, both in its natural state and stabilized with different additive dosages. Initial results showed that the samples taken corresponded to the A-7-6 (17) classification according to AASHTO and CL according to USCS, with a CBR between 2% and 4%, indicating a low-strength (poor) subgrade, unsuitable for use as a subgrade according to regulations. After the application of Consolid C444 and Solidry, an increase in the CBR of up to 29% was observed, with the optimal dosages of 0.032% and 3%, respectively. Similarly, hydraulic tests, such as capillary rise and permeability, showed highly favorable performance, demonstrating a notable decrease in their values. These results confirm the effectiveness of the additives in improving the load-bearing capacity of the soil, also demonstrating that the Consolid-Solidry system constitutes a technically, economically and environmentally viable alternative for stabilizing clay soils in road projects.

Keywords:

Consolid 444, Solidry, bearing capacity, subgrade, clayey soil, chemical stabilization, CBR.

5  
91  
Introducción

La inversión en infraestructura vial juega un papel fundamental en el desarrollo económico de un país al mejorar el acceso a servicios públicos esenciales como centros de comercio, hospitales y oportunidades laborales. Una infraestructura mejorada facilita el transporte de bienes y personas, disminuyendo así los costos y mejorando la competitividad, la eficiencia y la producción económica en general. Según un informe del Banco Mundial, la inversión insuficiente de América Latina en infraestructura vial da como resultado un desempeño deficiente del transporte, incluso en comparación con el África subsahariana [1]. Por ejemplo, mientras Europa tiene 2,1 kilómetros de carreteras pavimentadas por kilómetro cuadrado de tierra, América Latina sólo tiene 0,05 kilómetros [2]. Países sudamericanos como Colombia y Ecuador enfrentan desafíos debido a sus suelos diversos y complejos, predominantemente arcillosos y suelos andinos tropicales, lo que requiere la estabilización del suelo para que los proyectos de construcción cumplan con los estándares técnicos [3].

A nivel nacional, estudios indican que la inversión en la infraestructura del sector transporte ha sido identificado como un área crítica la cual implica una necesidad de mejora en los últimos años. Esto se considera

esencial para la inclusión social y el desarrollo nacional; sin embargo, a menudo se observa una insuficiencia entre las autoridades (nacionales, regionales y locales) a la hora de abordar estas brechas de infraestructura de manera efectiva. Las carreteras de todo el país soportan una tensión significativa por el tráfico y las diferentes condiciones climáticas, lo que destaca la necesidad urgente de métodos para mejorar su resistencia y durabilidad tanto a nivel urbano como nacional [4]. En el departamento de Lambayeque (Perú) el sistema vial presenta una cobertura limitada y se identifican brechas en la infraestructura que implican una necesidad de mejora de la red de transporte para potenciar la inclusión social y el desarrollo regional [5]. A nivel local, las vías de José Leonardo Ortiz, las cuales también presentan problemas de infraestructura vial, ya que fueron construidas de manera empírica, siendo afectadas gravemente ante las lluvias del fenómeno del niño, y las lluvias del ciclón Yaku, estas precipitaciones son fenómenos naturales inevitables, y seguirán ocurriendo a lo largo de los años, siendo fundamental realizar un mantenimiento adecuado de las pistas, para asegurarles una mayor duración [6]. En la actualidad, las metodologías aplicadas al mejoramiento de la capacidad portante del suelo han experimentado una constante evolución, impulsada por el incremento de las cargas vehiculares y las exigencias estructurales de las vías modernas. En este contexto, el comportamiento del suelo de subrasante adquiere un papel determinante en la durabilidad y desempeño del pavimento. Por ello, la presente investigación se orienta a optimizar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos mediante el uso de técnicas de estabilización que contribuyan a incrementar la capacidad portante, garantizando así una infraestructura vial más estable y de mayor vida útil.

En el presente proyecto plantea analizar la influencia de la adición de aditivo Consolid 444 y Solidry en la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos. Estos aditivos intervienen químicamente en las propiedades mecánicas del suelo, favoreciendo la unión de partículas finas y formación de una estructura más estable y resistente. Además el sistema de aditivos Consolid 444 - Solidry contribuye a reducir la permeabilidad y la ascensión capilar, lo que mejora la durabilidad del suelo frente a la acción del agua y las variaciones climáticas. En conjunto, su aplicación permite obtener una subrasante más densa, estable y con mayor soporte estructural, constituyendo una alternativa eficiente para la estabilización de suelos arcillosos. Asimismo otra de sus características importantes es su función catalizadora ante la petrificación natural de los suelos cohesivos, además de su propiedad impermeabilizante que evita la ascensión capilar del agua, generando un mayor tiempo de vida a la estructura vial.

Se justifica de manera teórico-práctica, puesto que la presente investigación representa un aporte al conocimiento sobre la mejora del comportamiento del suelo mediante el empleo de aditivos químicos que priorizan la sostenibilidad ambiental, un campo en constante desarrollo dentro de la ingeniería civil. El análisis de respuesta del suelo tratado con Consolid C444+Solidry aporta evidencia empírica sobre el efecto de estos aditivos para mejorar la capacidad portante (incremento de CBR) y reducción de ascensión capilar, lo cual enriquece la base científica existente y respalda la formulación de futuras investigaciones orientadas a soluciones sostenibles y duraderas en infraestructura vial.

Desde el punto de vista social, la incorporación de los aditivos Consolid

2

444 y Solidry en la estabilización de suelos arcillosos contribuye a la construcción de pavimentos más duraderos y con mayor capacidad portante, lo que se traduce en una infraestructura vial más estable y segura para los usuarios. Este tipo de intervención favorece una circulación continua y eficiente, reduciendo el deterioro prematuro de las superficies y los costos de mantenimiento. Asimismo, al mejorar las condiciones del suelo y disminuir la generación de polvo y material particulado, se promueve un entorno más saludable.

Desde la perspectiva económica, el deterioro progresivo de las vías debido a la falta de mantenimiento periódico genera un incremento considerable en los costos de rehabilitación, ya que las superficies afectadas desarrollan baches, fisuras y pérdida de material. Ante esta situación, la aplicación de los aditivos Consolid 444 y Solidry en la subrasante del pavimento se plantea como una alternativa eficiente para optimizar la inversión en infraestructura vial. Estos productos mejoran la resistencia y durabilidad del suelo, reduciendo la frecuencia de intervenciones correctivas y los gastos asociados al mantenimiento a largo plazo. En consecuencia, su utilización representa una opción económicamente sostenible que contribuye a prolongar la vida útil de un pavimento y a emplear de manera proporcionada los recursos destinados a obras viales.

15

Del punto de vista técnico, la presente investigación se fundamenta en la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos empleados como subrasante en estructuras de pavimento. Este tipo de material presenta alta plasticidad y baja capacidad portante, lo que limita su desempeño estructural y acelera el deterioro del pavimento. Frente a ello, la aplicación de los aditivos Consolid 444 y Solidry se plantea como una alternativa innovadora que promueve la formación de una subrasante más estable, incrementando la capacidad portante y la durabilidad de la capa tratada. Además, su acción contribuye a reducir la permeabilidad y controlar la humedad interna del suelo, factores determinantes para preservar la integridad del pavimento. De esta manera, el estudio aporta evidencia técnica sobre la eficacia de estos aditivos en la estabilización química de suelos arcillosos, fortaleciendo el conocimiento aplicado a la ingeniería vial y optimizando la calidad de las obras.

51

100

88

Desde el punto de vista ambiental el uso de los aditivos Consolid 444 y Solidry , se justifica porque presenta una opción más amigable con el medio ambiente a diferencia de los métodos tradicionales basados en cal o cemento, los aditivos Consolid 444 y Solidry no produce emisiones significativas de CO<sub>2</sub> durante su fabricación ni altera el equilibrio químico del suelo, ni contaminan napas freáticas, lo que permite su clasificación como productos ecológicos, dado que no generan contaminantes ni residuos peligrosos durante su aplicación o permanencia en el suelo. Además disminuyen la necesidad de extracciones masivas de material granular o cal, reduciendo el impacto por transporte y explotación de canteras . Su aplicación mejora la durabilidad de la infraestructura vial, disminuyendo el mantenimiento y el consumo de materiales a largo plazo, lo cual también es un indicador de sostenibilidad ambiental.

Ante la problemática presentada y las justificaciones establecidas, en esta investigación se plantea la siguiente problemática, ¿De qué manera influye el aditivo Consolid y Solidry en el incremento de la capacidad portante en suelos arcillosos? Para dar solución a dicha pregunta, nos

planteamos la siguiente hipótesis: La aplicación de los aditivos Consolid C444 y Solidry mejora la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos

Para ello, esta investigación tiene como objetivo general, analizar la influencia del aditivo Consolid C444 y Solidry para mejorar la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos. Para poder desarrollar este objetivo principal, nos planteamos los siguientes objetivos específicos, Definir las propiedades físicas de granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad y clasificación del suelo respecto a su estado natural, Definir las propiedades mecánicas de Proctor y CBR del suelo respecto a su estado natural, Determinar la influencia del aditivo Consolid y Solidry en las propiedades físicas del suelo a nivel de subrasante del tramo de estudio, Determinar la influencia del aditivo Consolid 444 y Solidry en las propiedades mecánicas de Proctor y CBR del suelo a nivel de subrasante del tramo de estudio, Establecer la dosificación óptima de aditivo consolid y Solidry a utilizar en la subrasante, Realizar el análisis de costo-beneficio de la aplicación del aditivo consolid y Solidry.

Revisión de la literatura

Antecedentes

Antecedentes internacionales

Guevara et al. [7], en su artículo científico "Estudio comparativo de los aditivos químicos Consolid 444 y con-Aid para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos", En una investigación desarrollada por Guevara y colaboradores (2021), titulada "Estudio comparativo de los aditivos químicos Consolid 444 y Con-Aid para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos", se analizó la efectividad de ambos estabilizantes químicos en el incremento de la capacidad portante de suelos cohesivos. El trabajo, de enfoque aplicado y con un diseño experimental, consistió en la toma de aproximadamente 570 kg de material procedente de la carretera Pedro Ruiz, entre los progresivos 3+000 y 4+000 km, ubicada en la provincia de Bongará, Perú. Posteriormente, se ejecutaron ensayos de laboratorio destinados a determinar las características físicas y mecánicas del material natural y del suelo tratado. Los resultados mostraron que el suelo original correspondía a la clasificación CL según el Sistema Unificado (USCS) y al grupo A-7-6 (17) de la norma AASHTO. Al incorporar dosis de 0,035 % de Consolid 444 y 2 ml de Con-Aid, se observó un notable incremento en el CBR al 95 % de compactación, pasando de 5,49 % en el estado natural a 28,65 % y 24,32 % respectivamente. Asimismo, se comprobó que el proceso de curado influye positivamente en el desarrollo de la resistencia, evidenciándose mejoras adicionales a los 7, 14 y 28 días. En síntesis, la investigación concluyó que ambos aditivos generaron un refuerzo sustancial en el comportamiento mecánico de la arcilla, consolidando su uso como alternativa eficiente para el mejoramiento de la subrasante.

Castro y Manzaba [8], en su tesis "Evaluación del Comportamiento de Materiales Estabilizados con el Sistema Consolid", concentraron su investigación en evaluar el rendimiento de materiales estabilizados con el Consolid System, en el cual evaluaron las propiedades físico-mecánicas de materiales granulares de una cantera (El Corozo) y un suelo fino (limo arcilloso) utilizado para subrasantes, de la provincia de Santa Elena. La metodología de investigación de tipo experimental y aplicada, con un enfoque cuantitativo. El estudio identificó la dosis óptima de estabilización con el componente C-444 al 0.04% de la densidad seca

7 máxima y el componente SOLIDRY en dosis del 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% del peso de la muestra de suelo. Los resultados mostraron que el aditivo mejoró significativamente la relación de carga (CBR), aumentando la capacidad de carga en más del 100 % en algunos casos y aumentó la resistencia a la compresión a 26,74 kg/cm<sup>2</sup>. En el material de cantera (CBR inicial 84,00%), la dosificación óptima (0,05% C444 +1,0% Solidry) elevó el CBR a 94,15% a los 7 días. Más relevante fue el efecto en el suelo fino (limo arcilloso), el cual tenía un CBR inicial muy bajo de 7,40%. El estudio concluyó que el Sistema Consolid mejora efectivamente las propiedades del suelo, siendo la mejora más notable en el suelo fino, donde el CBR aumentó de 7,40% hasta 47,70%, cumpliendo con los estándares establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas para bases, subbases y mejoramiento de subrasante.

6 Jácome y Ortiz [9], pretendieron desarrollar una técnica novedosa para estabilizar suelos de subrasante que mejore las propiedades del suelo y aumente significativamente la capacidad de carga. Su metodología utilizó un enfoque mixto (tanto cualitativo como cuantitativo) y un diseño experimental. Para ello, realizaron una calicata en la parroquia Colón de la provincia de Manabí, donde se recolectaron muestras de suelo intacto para realizar pruebas de laboratorio de acuerdo con las normas de mecánica de suelos. Luego, se elaboraron nueve cilindros incorporando aditivos en diversas concentraciones, concretamente utilizando un 0,032% de Consolid 444 (CD444) y un 1,5% de Solidry en peso de suelo, tal y como se describe en el manual de especificaciones técnicas del aditivo. Dicha combinación es la idónea para estabilizar limos de alta plasticidad (MH) y suelos arcillosos (A-7-5). Asimismo, ello conllevó a que aumente la capacidad de carga del suelo en un 12,40% en comparando con el suelo no tratado, que tenía una capacidad del 2,12%, tras un período de curado de 72 horas y una inmersión adicional de 72 horas.

### 3 Antecedentes nacionales

27 Gamarra [10], en su tesis realizó un estudio destinado a mejorar la capacidad portante del suelo de cimentación utilizando el aditivo Consolid en la Av. Los Eucaliptos del Distrito de Carabayllo. La investigación siguió una metodología aplicada a nivel explicativo el cual implementó un diseño experimental, que incluyó pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Estas propiedades fueron examinadas mediante excavación manual en tajos abiertos separados por 100 metros a lo largo de la Avenida Los Eucaliptos, resultando en cuatro pozos, cada uno de 1.50 metros de profundidad, designados como C-1, C-2, C-3 y C-4. Del pozo C-4 se recolectaron tres muestras (etiquetadas M-1, M-2 y M-3), cada una con un peso de 80 kilogramos, para un total de 240 kilogramos. Estas muestras fueron tratadas en tres lugares separados utilizando diferentes dosis de aditivos (13, 17 y 20 ml) recomendadas por CONSOLID PRODUCTOS VIALES S.A.C. Los resultados mostraron una mejora significativa, con el índice de rodamiento de California (CBR) aumentando del 5,9% al 40,8%, lo que representa aproximadamente un aumento de siete veces. Esto llevó a la identificación de la dosis óptima para estabilizar un suelo de una profundidad de 50 cm con un CBR del 45%, equivalente a un módulo resiliente (Mr) de 10394.09 psi, cumpliendo con los requisitos de ASSHTO. 2 El estudio concluyó que el sistema de consolidación mejora efectivamente la subrasante utilizando un aditivo de consolidación líquido. Se probaron diferentes proporciones del aditivo (4%, 6%, 10% y 12%), lo que resultó

en un aumento promedio de CBR del 7,98%, que está significativamente por encima del límite permitido.

Chamba [11], realizó un estudio para realizar un análisis comparativo evaluando las características técnicas del cloruro de sodio como agente estabilizante frente al Consolid System. Se trató de evaluar sus efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo en la Urb. El Parral, distrito de La Victoria. La investigación siguió una metodología aplicada a nivel explicativo con un diseño cuasiexperimental. Se trató del uso de diferentes dosis de cloruro de sodio al 2%, 6%, 10% y 15%, y una combinación de CD444 al 0,045% con Solidry al 1%, 1,5% y 2%, a partir de muestras de cuatro pozos. Se utilizaron diversas técnicas, programas y ensayos físicos y mecánicos para analizar en laboratorio el comportamiento de estos aditivos, tanto con o sin estabilizantes. Los resultados mostraron que la dosis óptima de cloruro de sodio fue del 6%, arrojando un CBR del 44% al 95% de compactación, con una densidad seca máxima de 1.882 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad óptimo de 12.73%. Por otro lado, la dosis más efectiva de Consolid System fue CD444 combinado con 2% Solidry, logrando un CBR de 55.07% al 95% de compactación y una densidad seca máxima de 1.817 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad óptimo de 11.26%. Ambos superaron significativamente a la muestra patrón, que tenía un CBR del 2,4 %, una densidad seca máxima de 1,824 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad óptimo del 11,49 %. El estudio concluyó que, en suelos arcillosos, agregar más del 6% de cloruro de sodio reduce el CBR, aumenta la densidad seca máxima y disminuye el contenido de humedad. Además, el sistema Consolid fue eficaz para estabilizar la subrasante con 2% de Solidry, mejorando la capacidad de carga. Sin embargo, para suelos CL, el sistema Consolid con CD444 solo fue insuficiente para la estabilización de la subrasante.

Sanca [12], en su tesis "Estudio de la estabilización de suelos para mejorar su capacidad portante aplicando cloruro de sodio y Sistema Consolid", en el cual llevó como objetivo mejorar la capacidad de carga del suelo mediante la incorporación de agentes estabilizantes como el cloruro de sodio y el Consolid System para optimizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. La metodología de investigación fue de tipo aplicada con un diseño experimental y un enfoque cuantitativo, realizando pruebas de laboratorio como los límites de Atterberg, la prueba de Proctor modificada y la prueba CBR para agentes estabilizantes. El cloruro de sodio se evaluó en concentraciones de 2%, 6% y 10%, mientras que el sistema Consolid se probó con combinaciones de Consolid 444 al 0,0045% y Solidry al 1,25%, 1,75% y 1,90%. Los resultados demostraron que el uso de cloruro de sodio al 10% mejoró significativamente las propiedades del suelo, reduciendo el índice de plasticidad al 7,00% y aumentando el CBR al 5,27% en comparación con la muestra patrón natural del suelo de 4.85%. De manera similar, el mejor desempeño para Consolid System se logró con 0.0045% Consolid 444 y 1.25% Solidry, lo que redujo el índice de plasticidad a 8.16% y aumentó el CBR a 22.08% en relación con la muestra patrón natural. Los hallazgos concluyeron que tanto el cloruro de sodio como el Consolid System mejoran la capacidad de carga del suelo, como lo demuestra un aumento continuo de CBR con ambos aditivos,

Chacón [13], en su tesis titulada "Determinación del efecto del estabilizante Consolid, para mejorar la capacidad portante del suelo limo-arenoso, para cimentaciones superficiales, San Sebastián". La investigación fue de tipo aplicada, de nivel explicativo o causal y con

53 un diseño experimental, donde se realizaron múltiples probetas de tierra comprimida estabilizadas mediante un aditivo amigable con el medio ambiente conocido como sistema Consolid, que consta de un componente líquido llamado C-444 y un componente sólido conocido como SOLIDRY. Se crearon un total de 53 muestras de prueba utilizando suelo del área APV Praderas del Inca en el distrito de San Sebastián de Cusco. El estudio investigó las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante la preparación de muestras con varias dosis del componente líquido C-444 al 0,1%, 0,2%, 0,5% y 0,8%, y el componente sólido SOLIDARIO al 0,5%, 2%, 4% y 10%, junto con diferentes energías de compactación (4, 8, 12 y 16 golpes). Según el ensayo de resistencia a la compresión, una probeta con una dosis de 10% SOLIDRY en peso de suelo y una dosis de 0,8% C-444 en peso de suelo seco, compactada con 16 golpes, logró una resistencia a la compresión de hasta 13 kg/cm<sup>2</sup> de 2.59 kg/cm<sup>2</sup> que tenía el suelo en su estado natural. La investigación concluyó que SOLIDRY, particularmente cuando se combina con suficientes golpes de compactación, es muy eficaz para mejorar la estabilización del suelo.

12 Huaraca [14], realizó un estudio de investigación en su tesis titulada "Efecto del sistema Consolid en el California Bearing Ratio (CBR) y el ascenso capilar del material de la cantera Totorá en Cusco". El estudio empleó una metodología aplicada, de nivel explicativo, con un enfoque cuantitativo y con un diseño experimental. El impacto del sistema Consolid (C-444 + SOLIDRY) en la resistencia del suelo se evaluó midiendo la respuesta CBR a través de un experimento factorial fraccional optimizado, que incluyó 36 pruebas CBR no sumergidas y 36 pruebas de elevación capilar. Los hallazgos revelaron que el material analizado fue clasificado como SG-SD (grava y arena mal graduadas). Los resultados iniciales establecieron que el CBR del material natural era de 79,80% y su ascensión capilar de 11,55%. El estudio concluyó que el Sistema Consolid mejora la capacidad de soporte (CBR) y disminuye la ascensión capilar del material. Cuantitativamente, la dosificación óptima (0,045% de Consolid 444 y 1,5% de Solidry) incrementó el CBR de 79,80% hasta un valor de 99,99%. Además, esta aplicación generó una notable reducción de la ascensión capilar, disminuyendo la absorción de agua de 11,55% a solo 0,57%, lo que representa una reducción del 95%. Sin embargo, el componente C-444 del sistema Consolid no mostró un impacto significativo en la mejora del CBR en este suelo en particular. El estudio concluyó que la eficacia del sistema Consolid depende en gran medida del tipo de suelo y de la dosificación aplicada.

3 Bases teóricas

7 Sistema Consolid C-444

2 Esta combinación de productos C444+SD de estabilización de alta tecnología que consiste en la compactación del suelo y regula su humedad óptima independiente de las variaciones climáticas que puedan ocurrir. Este sistema catalizador del proceso natural de petrificación de los suelos cohesivos tiene propiedades impermeabilizantes, que evitan las filtraciones y ascensiones capilares del agua [15].

Diseño

El Sistema CONSOLID consiste en el mezclado de los productos o aditivos que lo componen con el suelo a tratar. Se aplica en dos etapas: en la primera etapa se mezclan 15 a 25 centímetros de suelo con CONSOLID C444, posteriormente se agrega SOLIDRY a la parte superior, tal cual el siguiente esquema [15].

Fig. 1. Sistema CONSOLID [15].

Los parámetros para el diseño de estabilización están en relación a la combinación de ambos aditivos; a la dosis empleada y al espesor del suelo tratado [15].

TABLA I

PARÁMETROS TÉCNICOS DE CONSOLID Y SOLIDRY [15].

PRESENTACIÓN

CONSOLID 444

SOLIDRY

Líquido de color blanco

Polvo fino de color gris/beige

Envase

Barril de 200 lt.

Bolsa de 25 kg

Aplicación

Con Camión Cisterna

De forma manual

Preparación

Combinar con agua 1:4

Listo para usar

Conservación

Barril cerrado

En lugar seco

Nota. Elaboración propia.

Dosis

La selección de la dosis está parcialmente influenciada por la composición química del suelo, pero más significativamente por su composición granular [15].

Fig. 2. Aplicación de las fuerzas del neumático [15].

La proporción de granos finos (donde actúan principalmente los componentes) en comparación con las partículas más grandes afecta los requisitos de estabilización, ya que las partículas más grandes ocupan volúmenes de suelo que no necesitan estabilización. En consecuencia, generalmente, cuanto mayor es el número de partículas grandes, menor es la cantidad de producto requerida.

TABLA II

PORCENTAJES DE CONSOLID 444 Y SOLIDRY [15].

CONSOLID 444

0.032% del peso del suelo

0.64 litros/m<sup>3</sup>

SOLIDRY

1% a 2% del peso del suelo

20 a 40 kg/m<sup>3</sup>

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de aditivo Consolid c444 por m<sup>2</sup>

La elección de la dosis puede variar según el espesor de la capa a tratar (de 15 a 25 cm).

TABLA III

CANTIDAD DE ADITIVO C444 POR M<sup>2</sup> [15].

Litros/m<sup>3</sup>  
Espesor a tratar  
15 cm  
20 cm  
25 cm  
CONSOLID  
0.10 lt/m<sup>2</sup>  
0.13 lt/m<sup>2</sup>  
0.16 lt/m<sup>2</sup>

Nota. Elaboración propia.

Cantidad de aditivo SOLIDRY por m<sup>2</sup>

La elección de la dosis se rige en rangos de dosis en mínima, estándar y máxima, obteniendo las cantidades de aditivo necesario para estabilizar cada combinación de dosis/espesor.

TABLA IV

CANT. DE ADITIVO SD POR M<sup>2</sup> [15].

SOLIDRY

KILOGRAMOS/m<sup>2</sup>

Espesor por tratar

5 cm

7.5 cm

10 cm

Dosis Mínima

1 kg/m<sup>2</sup>

1.5 kg/m<sup>2</sup>

2 kg/m<sup>2</sup>

Dosis Estándar

1.5 kg/m<sup>2</sup>

2.25 kg/m<sup>2</sup>

3 kg/m<sup>2</sup>

Dosis Máxima

2 kg/m<sup>2</sup>

3 kg/m<sup>2</sup>

4 kg/m<sup>2</sup>

Nota. Elaboración propia.

Composición

Aditivo C444

Se utiliza una combinación de una emulsión invertida, que oscila entre 0,4 y 0,8 litros por metro cúbico de suelo, para inducir la aglomeración irreversible de partículas finas de suelo. Esto reduce la superficie activa y disminuye el ascenso capilar del agua. Además, se emplea una mezcla de emulsión invertida con productos monoméricos y poliméricos, complementada con un catalizador e intercambiadores de iones activados, para bloquear la entrada de agua al suelo tratado, evitando tanto el ascenso capilar como la filtración, cuya cantidad específica se determina mediante pruebas de laboratorio [15].

Agua: Se ajustará para cumplir con los requisitos de compactación convencionales para capas base y subbase [15].

Proporción de mezcla: La emulsión invertida se combina con suficiente agua para llevar el suelo tratado, generalmente 150/250 cm de suelo suelto por capa, al contenido de humedad óptimo o ligeramente por encima [15].

Aditivo Solidry SD

El aditivo en polvo, compuesto por un hidrato y una mezcla de catalizadores e intercambiadores de iones, se aplica al suelo a razón de 20 a 40 kg por metro cúbico. Esto normalmente se hace en los 10 cm superiores de la capa de suelo tratada con la emulsión invertida. Cuando se utiliza una solución asfáltica reducida, se diluye con agua en una proporción de 1:1 o 1:2, luego se rocía y se mezcla completamente en los primeros 100 mm de la capa ya tratada con la emulsión invertida. Las cantidades exactas de aditivos se determinan mediante pruebas de laboratorio antes de su aplicación en campo [15].

#### Suelos

La estructura física del suelo consta de partículas sólidas o granos que forman su estructura mineral de soporte, junto con una red de espacios entre estas partículas que pueden estar llenos de aire, agua o una combinación de ambos. Algunos expertos describen el suelo como un material en el que conviven tres etapas: líquida (agua), sólida y gaseosa (aire) [16]. La clasificación del suelo está determinada por el tamaño en que sus partículas predominan. En los casos en los que ningún tamaño de partícula es dominante y hay una presencia significativa de granos gruesos y finos, el suelo se nombra utilizando una combinación de términos, con nombres secundarios que sirven como adjetivos, como arena arcillosa o limo arenoso [8].

En ingeniería, el suelo se considera un sustrato terrestre o un depósito no consolidado de partículas minerales que consta de múltiples fases: sólida, líquida y gaseosa. Este material sirve como base para diversos proyectos de ingeniería. Es reconocido como un material con antigüedad compleja y extensamente utilizada en ingeniería para la elaboración de distintas tipologías de estructuras. El suelo posee varias propiedades fisicoquímicas y mecánicas clave, que incluyen durabilidad, permeabilidad, resistencia, compresibilidad y estabilidad volumétrica [17].

#### Estabilización de suelos

Para una estabilización del suelo implica mejorar sus características por medios métodos mecánicos y adición de productos tanto naturales, como sintéticos o químicos. Este proceso se aplica típicamente a suelos de subrasante pobre [18]. El procedimiento de estabilización abarca diversos procesos que transforman las características del suelo, dando como resultado un material mejorado en términos de resistencia a la compresión, trabajabilidad, permeabilidad, plasticidad, entre otros. La plasticidad de los suelos [18]. La plasticidad de los suelos, medida por el índice de plasticidad (IP), se reduce en suelos estabilizados para mejorar sus propiedades. Por lo tanto, la estabilización de subrasantes es un proceso crítico para la construcción de carreteras de alta calidad [19].

#### Subrasante

Esta es la capa superior del subsuelo que será nivelada, moldeada y compactada y se realizará un mejoramiento si no cumple un el estándar requerido (pobre <6% CBR) para soportar las capas de pavimento. La cual es la superficie superior del terreno natural o terraplén creado durante la excavación, que servirá de cimentación para la estructura del pavimento. Esta capa está formada por suelo con características compactas y aceptables, lo que garantiza que pueda soportar las cargas del tránsito vehicular sin sufrir daños [13].

Tipos de suelo

-Distribución de suelos usados en construcción en carreteras(AASHTO y SUCS).

Fig. 3. Perfiles de suelo -AASHTO [22].

Fig. 4. Suelos granulares [22].

Fig. 5. Suelos finos [22].

Fig. 6. Clasificación de suelos según ASSHTO [22].

### Propiedades físicas del suelo

El suelo está conformado por una combinación de partículas sólidas, agua y aire, cuya interacción determina su comportamiento y capacidad para sostener la vida vegetal. El equilibrio entre estos componentes es esencial, ya que influye directamente en la retención de nutrientes y en el crecimiento de las plantas. Entre sus propiedades más importantes destacan la textura, estructura, color, permeabilidad, porosidad, drenaje, consistencia y la profundidad útil del terreno [14].

#### Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción de diferentes tamaños de partículas que lo componen, lo cual afecta la capacidad del suelo para proporcionar nutrientes, agua y aire a las plantas. Se clasifica según el tamaño de las partículas minerales en arenas, limos y arcillas, y cada tipo de suelo tiene una mezcla específica de estos grupos. El análisis mecánico o granulométrico permite determinar la distribución de las partículas, lo que influye en sus propiedades físicas como la permeabilidad, la retención de agua y la aireación [23].

#### Estructura

Se refiere a cómo las partículas individuales de arena, limo y arcilla se agrupan para formar agregados, lo que afecta el movimiento del agua y la circulación de nutrientes. Dependiendo de la forma en que se agrupan, se pueden clasificar en varios tipos: esferoidal (agregados redondeados), laminar (en láminas), prismática (en columnas), blocosa (en bloques) y granular (en granos). Además, el grado de estructura varía desde suelos sin estructura, donde no hay agregados visibles, hasta suelos con estructuras fuertes, en las que los agregados son duraderos y bien formados [24].

El grado de la estructura del suelo se clasifica en cuatro niveles: sin estructura, débil, moderada y fuerte, dependiendo de la cohesión de los agregados. La clase de estructura se refiere al tamaño de estos agregados, que puede ser muy fina, fina, mediana, gruesa o muy gruesa. Además, existen diferentes tipos de estructuras, como granulares y migajosas, que permiten una fácil circulación de agua, o laminares, donde el agua tiene dificultad para moverse. Estas estructuras se encuentran en diferentes horizontes del suelo, con variaciones según la acumulación de materiales como arcilla [23].

#### Color

El color del suelo, influenciado por su composición, puede indicar diversas propiedades como el contenido de minerales y materia orgánica. Los colores como el rojo y amarillo indican la presencia de óxidos de hierro, mientras que los tonos oscuros como el negro y marrón reflejan la

72

62

111

35

71

48

cantidad de materia orgánica, lo que generalmente mejora la productividad del suelo. Los suelos de color gris o con manchas suelen indicar mala aireación. La medición del color se realiza mediante la Tabla de Colores Munsell, que evalúa tres componentes: tono, intensidad y luminosidad [25].

#### Propiedades mecánicas del suelo

Las propiedades mecánicas del suelo son esenciales para la ingeniería geotécnica y civil, ya que determinan el comportamiento del terreno bajo cargas y su interacción con las estructuras construidas sobre él. A continuación, se presentan las principales propiedades mecánicas del suelo, ordenadas según su relevancia y aplicación práctica [26]:

**Resistencia al corte:** Es la capacidad que tiene el suelo para resistir fuerzas que tienden a desarticular sus partículas. Esta propiedad es fundamental para evaluar la estabilidad de taludes, muros de contención y cimentaciones [26].

**Compresibilidad:** Refleja la capacidad del suelo para reducir su volumen bajo carga. La compresibilidad es crucial para predecir asentamientos en estructuras y garantizar su estabilidad a largo plazo [26].

**Rigidez:** Indica la resistencia del suelo a la deformación bajo cargas. Suelos con alta rigidez son menos susceptibles a deformaciones, lo que es importante en el diseño de pavimentos y estructuras sometidas a cargas dinámicas [26].

**Permeabilidad:** Es la capacidad del suelo la cual permite el paso de agua. La permeabilidad influye en la respuesta mecánica del suelo y puede hacerlo más susceptible a fenómenos como la licuefacción [26].

**Densidad:** La densidad del suelo es una propiedad importante que influye en su comportamiento mecánico. Suelos más densos suelen tener mayor resistencia y menor compresibilidad [26].

#### Ensayos

##### Ensayos de campo

##### Calicatas (ASTM D-2488)

Las muestras se recolectan durante la excavación de los pozos, siguiendo los estratos específicos del suelo, y luego se colocan en bolsas herméticas para su identificación y posterior análisis en laboratorio. La excavación de una calicata ha facilitado el examen de las características del suelo en función de su estratificación y horizontes. Dicha calicata proporciona un espacio suficiente para realizar cómodamente este análisis [26]. Las dimensiones y profundidad de ello dependen del análisis específico que se esté realizando; según la Norma E.050, hay varios tipos de exploración adaptados a cimentaciones y caminos.

##### Ensayos de laboratorio

##### Granulometría de suelos por tamizado (NTP 339.128 - MTC E 107 - ASTM D422):

Las muestras extraídas de cada calicata se analizan según normativa especificada, determinando los porcentajes que pasan por distintos tamices. El equipo incluye báscula de precisión (0.01 gr.) y un horno, con herramientas como recipientes, cepillos y tamices con aberturas desde el No. 200 hasta 3" [10]. Se encuentra bajo la normativa MTC E 107, permite determinar la distribución de tamaños de las partículas de un suelo o agregado mediante el método de tamizado. Aunque es aplicable a suelos en general, cobra especial relevancia en el análisis de agregados finos, es decir, materiales que pasan por el tamiz N.º 4, como arenas y fracciones limosas. En estos casos, es fundamental realizar un lavado

12

33

69

previo de la muestra, ya que los finos más pequeños, como arcillas o limos, tienden a adherirse a las partículas mayores y no se separan adecuadamente solo con tamizado en seco. Este lavado se efectúa usando agua sobre tamices finos (generalmente hasta el N.º 200), hasta que el agua salga clara, asegurando que el análisis refleje únicamente el tamaño real de las partículas. Luego, el material retenido se seca, se somete a una agitación mecánica controlada y se cuantifica el peso retenido en cada malla. Los resultados se expresan en forma de porcentajes acumulados y se representan en una curva granulométrica que ayuda a evaluar propiedades como la trabajabilidad, compactación y comportamiento del suelo frente al agua, lo cual es fundamental en proyectos de pavimentación y estructuras de base o subbase. Integrada por una serie de tamices [27].

TABLA V  
TAMICES-MALLA [27].

Malla

ABERTURA (mm)

3"

75,000

1 ½"

38,100

¾"

19,000

3/8"

9,500

Nº 4

4,760

Nº 8

2,360

Nº 16

1,100

Nº 30

0,590

Nº 50

0,297

Nº 100

0,149

Nº 200

0,075

Nota. Elaboración propia.

Cálculos para resultados:

$$\%pasa = 100 - \%retenido\ acumulado$$

Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos SUCS) (NTP 339.134):

Los suelos se clasifican en función de sus propiedades mecánicas y su comportamiento en grupos y subgrupos. Se utilizan comúnmente 2 sistemas de clasificación: AASHTO, desarrollado por la Asociación Estadounidense de funcionarios de Carreteras Estatales en 1929, divide los suelos en 7 grupos que van de granulares (A-1 a A-3) a limos y arcillas (A-4 a A-7). El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), introducido por Arthur Casagrande en 1942, utiliza nomenclaturas como grava (G), arena (S), limo (M), arcilla (C) y descriptores como bien clasificado

(W), mal clasificado (W). clasificados (P), alta plasticidad (H), baja plasticidad (L), orgánicos (O) y turba (Pt) [28].

TABLA VI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS-AASHTO [28].

Clasificación de Suelos por

AASHTO M -145

Clasificación de Suelos

ASTM-D-2847

A.1(a)

GW-GP-GM-SW-SP-SM

A.1(b)

GM-GP-SM-SP

A.2

GM-GC-SM-SC

A.3

SP

A.4

CL-ML

A.5

ML-MH-CH

A.6

CL-CH

A.7

OH-MH-CH

Nota. Elaboración propia.

Determinación del contenido de humedad de un suelo (NTP 339.127 - MTC E 108 - ASTM D2216):

Se determina recolectando una muestra del campo y midiendo su contenido de agua mediante un proceso de secado en un horno. El equipo incluye básculas y hornos, con materiales como contenedores, desecadores y herramientas manuales básicas utilizadas para la prueba. El procedimiento comienza registrando la masa de un recipiente limpio y seco, seguido de la selección de muestras representativas. A continuación, se deposita en un recipiente y se pesan, tanto el recipiente como también el material húmedo y recipiente. Luego se coloca al horno y se seca hasta alcanzar un peso constante. Después del proceso de secado, se deja enfriar a temperatura ambiente y luego se pesa una vez más para determinar el peso de la muestra seca [28].

Se encuentra bajo la normativa MTC E 108, se emplea para establecer el contenido de humedad presente en una muestra de suelo, es decir, cual es la cantidad de agua que contiene respecto a su masa seca. Este procedimiento es fundamental en geotecnia, ya que la humedad influye directamente en las propiedades mecánicas del suelo, como su compactación, consistencia y capacidad de carga. Para realizar la prueba, se toma una porción representativa del suelo húmedo, se pesa y luego se coloca en un horno a una temperatura constante de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  durante un periodo suficiente (generalmente 24 horas) hasta alcanzar peso constante. Finalmente, se vuelve a pesar la muestra seca, y con ambos valores se calcula el porcentaje de humedad mediante una fórmula sencilla. Esta información es esencial para ajustar las condiciones de compactación en campo, interpretar resultados de otros ensayos geotécnicos y garantizar un diseño adecuado de cimentaciones y obras de infraestructura [27].

Ecuación 1. Contenido de humedad [27]

Dónde:

W = cont. humedad (%)

Mmws = peso.molde + muestra (gr)

Mms = peso.molde+ muestra seca (gr)

Mm = molde (gr)

Mw = peso de agua (gr)

Ms = peso seco (gr)

Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos (NTP 339.129 - ASTM D4318):

Se encuentra bajo la normativa MTC E 110 y la normativa MTC E 111, se utilizan para determinar las propiedades de consistencia de los suelos finos, específicamente el límite líquido y plástico, respectivamente. El MTC E 110 permite conocer el contenido de humedad a partir del cual el suelo pierde su cohesión y comienza a fluir, lo cual se determina con el dispositivo de Casagrande, registrando el número de golpes necesarios para cerrar una ranura trazada en la muestra; el valor correspondiente a 25 golpes se define como el límite líquido [27].

-Límite líquido (MTC E 110)

Representa el contenido máximo de humedad en el que el suelo permanece en estado plástico sin pasar a estado líquido, donde una mínima fuerza hace que comience a fluir. El equipo requerido incluye filtros, básculas, un horno, un calibrador y una taza Casagrande. Se utiliza una espátula para manipular materiales [28].

Ecuación 2. Límite líquido [27]

Dónde:

N = Golpes requeridos para cerrar la ranura

Wn = Contenido de humedad

Equipos para utilizar:

Copa Casagrande

Horno

Calibrador para la copa de Casagrande

Acanalador

Balanza digital  $\pm 0.01$ gr

Recipientes/ Utensilios

Agua Destilada

Límite plástico (MTC E 111)

A diferencia del límite líquido, este es el contenido mínimo de humedad con el que el suelo mantiene la plasticidad. En este punto, el suelo puede moldearse, pero no recuperará su forma original al deformarse. Un contenido de humedad superior al límite plástico da como resultado un ablandamiento significativo del suelo estabilizado [28].

Ecuación 3. Límite Plástico [27]

Índice de Plasticidad (MTC E 111)

Este índice se determina restando el límite plástico del límite líquido, indicando el rango de humedad dentro del cual el suelo exhibe propiedades plásticas. Se realizan pruebas específicas para medir y calcular el índice de plasticidad [28]. Establece el punto en el que el suelo pasa de un estado plástico a uno semisólido, moldeando hilos delgados de 3 mm de

diámetro hasta que comienzan a agrietarse, momento para medir su contenido de humedad como límite plástico. La diferencia entre ambos valores se conoce como índice de plasticidad, parámetro esencial para clasificar el tipo de suelo y predecir su comportamiento frente a la humedad en proyectos de ingeniería geotécnica [27].

Ecuación 4. Índice de plasticidad [27]

TABLA VII

RANGOS DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD [28].

Índice de Plasticidad

Plasticidad

Característica

IP > a 20

Alta

muy arcillosos

IP < igual a 20

IP > a 7

Media

arcillosos

IP < a 7

Baja

pocos arcillosos

IP = a 0

No plástico

extensos de arcillas

Nota. Elaboración propia.

Ensayos de Resistencia del Suelo

Ensayo Proctor modificado

Se encuentra bajo la normativa MTC E 115, se utiliza para determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima que puede alcanzar un suelo al ser compactado con una energía mayor que la utilizada en el ensayo Proctor estándar. Esta prueba es clave en el diseño y control de calidad de bases y subrasantes, ya que permite establecer el grado óptimo de humedad para obtener la máxima densidad del suelo, lo que se traduce en mayor estabilidad y capacidad de soporte. El procedimiento consiste en compactar el suelo dentro de un molde cilíndrico en cinco capas, aplicando 25 golpes por capa con un pisón de 4.54 kg desde una altura de 45.7 cm, lo que genera una energía de compactación más alta. Se repite el proceso con diferentes niveles de humedad, y los resultados se grafican para obtener la curva de compactación, identificando el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima, parámetros esenciales para garantizar un buen comportamiento estructural del suelo en campo [27].

Ecuación 5. Densidad húmeda [27]

Dónde:

$\rho_m$  = Densidad Húmeda compactada (Mg/m<sup>3</sup>)

$M_t$  = Peso.húmedo+molde (kg)

$M_{md}$  = Peso.molde compactado (kg)

$V$  = Volumen de molde compactado (m<sup>3</sup>)

Ecuación 6. Densidad seca [27]

Donde:

pd = Densidad seca compactada (Mg/m<sup>3</sup>)

w = contenido de agua (%)

Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (NTP 339.141 - ASTM D-1557)

Esta prueba identifica el contenido de humedad y la densidad óptima para compactar un suelo. Se lleva a cabo en un laboratorio de suelos y ayuda a determinar el porcentaje de agua necesario para una compactación óptima. Se deja caer un apisonador de 44,5 N (10 lbf) desde una altura de 18 pulgadas (45,7 cm) sobre moldes llenos de tierra de diferentes tamaños (4 o 6 pulgadas), según el método utilizado. Primero se realiza un análisis granulométrico para determinar la distribución del tamaño de las partículas. La prueba Proctor modificada incluye tres métodos: Método "A", "B" y "C", cada uno de los cuales requiere tipos de molde específicos [28].

Método de ensayo de CBR (California Bearing Ratio) (NTP 339.145 - MTC E 132 - ASTM D-1883):

Se encuentra bajo la normativa MTC E 132, permite determinar el índice CBR (California Bearing Ratio) de un suelo, el cual mide su capacidad para resistir la penetración de una carga en condiciones controladas de humedad y compactación. Este valor se utiliza ampliamente para evaluar la calidad del suelo como subrasante, subbase o base en estructuras de pavimento. En el procedimiento de laboratorio, se compacta una muestra de suelo en un molde cilíndrico bajo condiciones definidas de energía (generalmente Proctor estándar o modificado), se satura y se deja en remojo por 4 días, y luego se mide la resistencia que ofrece al ser penetrada por un pistón a velocidad constante. El esfuerzo medido se compara con un valor estándar obtenido con un material de referencia (piedra triturada), y se expresa como un porcentaje. Un CBR alto indica que el suelo posee buena capacidad de soporte, mientras que valores bajos sugieren necesidad de estabilización o reemplazo del material para su uso en capas estructurales de una carretera [27].

TABLA VIII

CATEGORÍAS DE LA SUBRASANTE SEGÚN SU CALIDAD [10]

Categoría de subrasante

CBR

S<sub>0</sub>: S. inadecuada

El CBR < al 3%

S<sub>1</sub>: S. pobre

El CBR entre 3% ≤ 6%

S<sub>2</sub>: S. regular

El CBR 6% ≤ 10%

S<sub>3</sub>: S. buena

El CBR 10% ≤ 20%

S<sub>4</sub>: S. muy buena

El CBR 20% ≤ 30%

S<sub>5</sub>: S. excelente

El CBR mayor igual a 30%

Nota. Elaboración propia.

Ensayo de ascenso de capilaridad:

El ascenso capilar en suelos es un fenómeno físico mediante el cual el agua sube desde capas inferiores hacia niveles superiores del terreno, aprovechando los poros existentes entre las partículas del suelo. Esta

capacidad depende principalmente del tamaño y distribución de esos poros, siendo más pronunciada en suelos finos como los limos o arcillas. El ensayo que evalúa este comportamiento busca medir hasta qué altura puede llegar el agua, bajo condiciones controladas, cuando entra en contacto con una muestra seca. Se utiliza una columna transparente, donde se coloca el suelo, y se permite el contacto con una lámina de agua en la base. A lo largo del tiempo, se observa el avance de la humedad por capilaridad, registrando la altura máxima alcanzada. Este análisis es útil en proyectos donde la presencia de agua ascendente puede afectar el rendimiento de pavimentos, cimentaciones u otras estructuras sensibles a la humedad [27].

Ensayo de permeabilidad:

Se encuentra bajo la normativa MTC E 906, se emplea para describir la permeabilidad de suelos granulares utilizando el método de carga constante, que consiste en medir la cantidad de agua que traspasa una muestra saturada manteniendo una altura constante de agua sobre ella. Se prepara un cilindro con el suelo compactado y saturado, y se deja fluir agua de forma continua mientras se mide el volumen que pasa a través del material en un tiempo determinado. Con estos datos se calcula el coeficiente de permeabilidad, el cual refleja la capacidad del suelo para drenar agua. Este valor es fundamental en proyectos de ingeniería donde es necesario prever el comportamiento del suelo ante la presencia de humedad, como en sistemas de drenaje, cimentaciones o pavimentos, ya que permite seleccionar materiales adecuados que eviten acumulaciones de agua o problemas de presión dentro del terreno [27].

Ecuación 7. Coeficiente de permeabilidad (k) [27]

Dónde:

k: coeficiente de permeabilidad (cm/s)

Q: volumen de agua recolectado (cm<sup>3</sup>)

L: longitud del espécimen (cm)

A: área transversal de la muestra (cm<sup>2</sup>)

h: altura de carga hidráulica constante (cm)

t: tiempo durante el cual se recolectó el volumen Q (s)

Materiales y métodos

Materiales

Incluye todos los materiales utilizados para los ensayos físicos y mecánicos y cumplir con el objetivo que tiene esta investigación.

a) Muestra de suelo

El material utilizado corresponde a un suelo arcilloso de color marrón rojizo, recolectado de la zona designada como subrasante del tramo vial en evaluación. La extracción se realizó a una profundidad promedio de 150 cm, siguiendo las especificaciones del MTC (E-100), asegurando que la muestra sea representativa del comportamiento natural del terreno.

Posteriormente, el suelo fue secado al aire, desmenuzado y tamizado por el tamiz N° 4.

b) Aditivo Consolid (C444)

Es un estabilizante químico líquido, que actúa favoreciendo la aglomeración irreversible de partículas finas, reduciendo la capilaridad y aumentando la resistencia mecánica, promoviendo la floculación y compactación del suelo.

c) Aditivo Solidry (SD)

Es un polvo mineral (secante e impermeabilizante), el cual reduce la humedad, acelera el proceso de petrificación y mejora la estabilidad

volumétrica. El cual favorece con la cementación y endurecimiento del suelo.

d) Agua

El agua utilizada es libre de impurezas y materia orgánica, cumpliendo los requisitos establecidos.

e) Equipos y herramientas

Para realizar los ensayos se utilizaron los equipos y herramienta del Laboratorio de Mecánica de Suelos, tales como: balanzas, hornos de secado, tamices, molde Proctor, martillo de compactación, CBR, probetas, cronómetros y bandejas metálicas, bolsas plásticas.

Tipo, nivel y diseño de investigación

Tipo de investigación

Cabezas et al. [29], consideran que la investigación aplicada permite la generación de conocimientos que es empleados para dar solución a un problema investigativo.

De acuerdo al fin que persigue la investigación se le clasifica como aplicada por el hecho de que se busca dar solución a un problema poniendo en práctica conocimientos previos que se han adquirido, como viene a ser el análisis de la influencia del aditivo Consolid y Solidry en el mejoramiento de la capacidad portante de la subrasante.

Nivel de investigación

Ñaupas et al. [29], clasifican este estudio como explicativa porque pretende esclarecer por qué ocurre un problema y cuales son las condiciones aparece o cómo se interconectan diversas variables. Estas investigaciones suelen ser más metódicas en comparación con otros tipos de estudios y tienen como objetivo lograr una comprensión integral del tema.

La investigación se centró en analizar cómo la variable independiente influye en la variable dependiente. Se trata de comparar muestras de suelo natural no tratado con aquellas estabilizadas mediante el Sistema Consolid + Solidry en cuanto a sus propiedades resistentes. En consecuencia, los hallazgos y conclusiones representan una exploración exhaustiva del tema.

Diseño de investigación

La presente investigación es de tipo experimental, dado que se justifica porque se trabajó con muestras de suelo en condiciones controladas de laboratorio, aplicando diferentes dosificaciones de los aditivos y evaluando sus resultados mediante ensayos normalizados, lo que garantiza validez y confiabilidad en la comprobación de la hipótesis planteada.

Diseño de investigación para demostrar la hipótesis

Hernández [30], menciona que una investigación es cuantitativa, debido al análisis que se realizará en laboratorio a través de los ensayos para sustentar la hipótesis, teniendo en esta investigación como objeto de estudio el análisis de la influencia del aditivo Consolid y Solidry.

El modelo de investigación es el siguiente:

$G_c \rightarrow X_1 \rightarrow M_1$ : Para el grupo de control

$G_e \rightarrow X_2 \rightarrow M_2$ : Para el grupo Experimental

Donde:

$G_c$  y  $G_e$ : Grupos pilotos.

$X_1$ : Ausencia de estabilizante.

$X_2$ : Incorporación del Aditivo Consolid C444 y Solidry SD.

M: Medición de las propiedades físico-mecánicas del suelo a investigar  
Población, muestra y muestreo  
Población

De acuerdo con Shukla [31], la población corresponde al total de fenómenos o eventos que se estudian, en donde respecto a sus unidades, éstas presentan parámetros comunes, las cuáles dan origen a la data investigativa.

1 Para la presente investigación, la población está conformada por la pavimentación del sector 1 del distrito de José Leonardo Ortiz, donde el material predominante son arcillas, el cual es nuestro rubro de estudio.

Fig. 7. Zonificación urbana de José Leonardo Ortiz según [32].

Muestra

De acuerdo con Hernández et al. [33], la muestra corresponde al subgrupo de participantes figurativos en relación a una población, con propiedades de gran similitud.

En cuanto a la muestra, se realizará en un punto específico del distrito de José Leonardo Ortiz, comprendidas la Calle Tulipanes por las fallas notorias visualizadas en el pavimento y predominancia de arcillas.

Dosificaciones en Antecedentes

TABLA IX

RESUMEN DE ANTECEDENTES CBR [13]

Autor

Guevara

Castro y Manzaba

Jacobo

Gamarra

Chamba

Sanca

Chacón

Huaraca

Tipo-aditivo

Porcentaje % en peso

Consolid 444

0.0035

0.04

0.032

0.02

0.045

0.45

-

0.5

0.5

SOLIDRY

-

2

1.5

-

2

-

1.9

10

1.5

CBR Inicial

5.49  
2.36  
2.12  
5.9  
2.4  
4.5  
6.5  
12.59  
12.7  
CBR Final  
28.65  
78.24  
12.4  
40.8  
55.07  
34.08  
43.82  
15.79  
82.79

Nota. Elaboración propia.

Se va a trabajar con distintos porcentajes, para el aditivo Consolid 444, vamos a trabajar con el porcentaje de 0.032, ya que nos vamos a regir con lo evidencia que se ha obtenido mejores resultados en suelos que trabajan con arcillas, a lo cual coincide con nuestra investigación, por ende, trabajaremos con el mismo porcentaje establecido. Para el aditivo Solidry, vamos a trabajar con 3 porcentajes, 1.5%, 2.25% y 3%, ya que se encuentra dentro de los parámetros establecidos por los antecedentes, estos datos los hemos considerado aptos para nuestra investigación, para mejor evaluación y trabajabilidad.

Muestreo

En cuanto al muestreo, se puede afirmar que su propósito es identificar la porción específica del universo o población que se está estudiando y que necesita ser examinada para sacar conclusiones sobre toda la población [34]. En esta investigación, se empleó un método de muestreo aleatorio en la cual se toma 4 calicatas cada 250 metros con la finalidad de tener una mejor clasificación de un suelo arcilloso, muy por encima de lo que indica la norma . Para poder obtener el muestreo de esta investigación, se debe tomar en cuenta lo descrito en NTP.CE.0.10 Pavimentos Urbanos, el cual nos dice lo siguiente:

TABLA X

NÚMERO DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN [35]

TIPO DE VIA

NÚMERO DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN

ÁREA (m<sup>2</sup>)

Expresas

1 cada

2000

Arteriales

1 cada

2400

Colectoras

1 cada

3000

Locales

1 cada  
3600

Nota. Elaboración propia.

Tomando en cuenta el tramo de la vía seleccionada para esta investigación, es una calle que no tiene mucha relevancia con el tránsito vehicular pesado, se le va a considerar como "local" para la extracción de muestras. Según las áreas tomadas por Google Earth, tiene un perímetro de 1378.22 m, y área de 7924.48m<sup>2</sup>, la cual interseca con la Av. Balta, como se puede visualizar en la siguiente figura:

Fig. 8. Áreas tomadas como muestra en la Urbanización Carlos Stein [36].

De acuerdo con el tipo de vía seleccionada, se ha determinado esta relación para el cálculo de puntos extracción de calicata:

$7924.48m^2/3600m^2=2.20$ , Sin embargo, se ha decidido realizar 4 calicatas para una investigación más completa de acuerdo al tipo de suelo de fundación, para poder comprender y verificar la clasificación del suelo a estudiar, de las cuales nos quedamos con 3 muestras de 3 calicatas para los ensayos posteriores de las muestras con adición del aditivo Consolid C444 y Solidry. Las calicatas de exploración se realizaron a una profundidad de 1.50m, para llegar a un estrato arcilloso, el cual servirá como punto de inicio para realizar esta investigación.

Variables y operacionalización

Variable independiente: Aditivo Consolid C444 y Solidry,

Variable dependiente: Capacidad portante.

TABLA XI

DISTRIBUCIÓN DE MUESTRAS LÍMITES EN E.N

Muestras

LL

LP

TOTAL

C-1

1

1

2

C-2

1

1

2

C-3

1

1

2

TOTAL

3

3

6

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 6 muestras para el ensayo de límites entre las 3 calicatas.

TABLA XII

DISTRIBUCIÓN DE MUESTRAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestras

M1

M2  
 TOTAL  
 C-1  
 1  
 1  
 2  
 C-2  
 1  
 1  
 2  
 C-3  
 1  
 1  
 2  
 TOTAL  
 3  
 3  
 6

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron total de 6 muestras en estado natural para el ensayo de contenido de humedad

TABLA XIII  
 DISTRIBUCIÓN DE PROCTOR EN E.N

Muestras

Molde 1  
 Molde 2  
 Molde 3  
 Molde 4

TOTAL

C-1

1  
 1  
 1  
 1  
 4

C-2

1  
 1  
 1  
 1  
 4

C-3

1  
 1  
 1  
 1  
 4

TOTAL

3  
 3  
 3  
 3  
 12

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 12 muestras sin alterar para el ensayo de Proctor modificado entre las 3 calicatas seleccionadas.

TABLA XIV

DISTRIBUCIÓN DE CBR EN E.N

Muestras

12 golpes

25 golpes

56 golpes

TOTAL

C-1

5

5

5

15

C-2

5

5

5

15

C-3

5

5

5

15

C-4

5

5

5

15

TOTAL

15

15

15

45

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 45 muestras sin alterar para el ensayo de CBR entre las 3 calicatas.

Estudio con adición del aditivo Consolid + Solidry

Está conformado por la elaboración de briquetas con 0.032% de adicción del aditivo Consolid 444, además de la incorporación del aditivo Solidry en cantidades de 1.5 kg/m<sup>2</sup>, 2.25 kg/m<sup>2</sup> y 3kg/m<sup>2</sup> en las muestras que se obtuvieron en la zona de estudio. Como muestra patrón, se seleccionó la muestra más desfavorable de las 4 calicatas iniciales y nos quedamos con las 3 calicatas analizadas en cuanto las propiedades físicas y mecánicas.

TABLA XV

DISTRIBUCIÓN DE ASCENSO DE CAPILARIDAD+ADITIVO

Muestras

Descripción

Probetas

M1

Patrón

3

M2

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
1  
M3  
Patrón C-02 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
1  
M4  
Patrón C-03 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
1  
TOTAL

6

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 10 muestras para el ensayo de ascenso de capilaridad considerando las muestras patrón y todas las dosificaciones de adición.

TABLA XVI

DISTRIBUCIÓN LÍMITES+ADICIONES

Muestras

Descripción

LL

LP

TOTAL

M1

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD

1

1

2

M2

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD

1

1

2

M3

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD

1

1

2

M4

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD

1

1

2

M5

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD

1

1

2

M6

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD

1

1

2

M7

Patrón C-03 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD

1  
 1  
 2  
 M8  
 Patrón C-03 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M9  
 Patrón C-03 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 TOTAL  
  
 9  
 9  
 18

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 18 muestras para el ensayo de límites considerando todas las dosificaciones de adición Consolid C444 y Solidry.

TABLA XVII  
 DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD+ADICIONES

Muestras  
 Descripción

M1  
 M2  
 TOTAL  
 M1  
 Patrón C-01 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M2  
 Patrón C-01 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M3  
 Patrón C-01 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M4  
 Patrón C-02 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M5  
 Patrón C-02 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M6

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M7  
 Patrón C-03 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M8  
 Patrón C-03 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 M9  
 Patrón C-03 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
 1  
 1  
 2  
 TOTAL  
  
 9  
 9  
 18

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 18 muestras para el ensayo de contenido de humedad considerando todas las dosificaciones de adición.

TABLA XVIII  
 DISTRIBUCIÓN DE PROCTOR MODIFICADO+ADICIONES

Muestras  
 Descripción

M1  
 M2  
 M3  
 M4  
 TOTAL  
 M1  
 Patrón C-01 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD  
 3  
 3  
 3  
 3  
 12  
 M2  
 Patrón C-01 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
 3  
 3  
 3  
 3  
 12  
 M3  
 Patrón C-01 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
 3  
 3

3  
3  
12  
M4  
Patrón C-02 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD  
3  
3  
3  
3  
12  
M5  
Patrón C-02 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
3  
3  
3  
3  
12  
M6  
Patrón C-02 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
3  
3  
3  
3  
12  
M7  
Patrón C-03 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD  
3  
3  
3  
3  
12  
M8  
Patrón C-03 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD  
3  
3  
3  
3  
12  
M9  
Patrón C-03 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
3  
3  
3  
3  
12  
TOTAL  
  
27  
27  
27  
27  
108

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 108 muestras para el ensayo de Proctor

modificado considerando todas las dosificaciones de adición.

TABLA XIX

DISTRIBUCIÓN DE CBR+ ADICIONES

Muestras

Descripción

12 golpes

25 golpes

56 golpes

TOTAL

M1

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD

5

5

5

15

M2

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD

5

5

5

15

M3

Patrón C-01 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD

5

5

5

15

M4

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD

5

5

5

15

M5

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD

5

5

5

15

M6

Patrón C-02 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD

5

5

5

15

M7

Patrón C-03 + 0.032% C444 + 1.5% en peso SD

5

5

5

15

M8

Patrón C-03 + 0.032% C444 + 2.25% en peso SD

5

5  
 5  
 15  
 M9  
 Patrón C-03 + 0.032% C444 + 3.0% en peso SD  
 5  
 5  
 5  
 15  
 TOTAL

45  
 45  
 45  
 135

Nota. Elaboración propia.

Se distribuyeron un total de 135 muestras para el ensayo de CBR considerando todas las dosificaciones de adición.

#### OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable independiente: Incorporación en diferentes porcentajes de 0.032% de Consolid C444, con 1.5%, 2.25% y 3% en peso de Solidry

Variable dependiente: Capacidad Portante

TABLA XX

#### OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable independiente

Definición conceptual

Dimensión operacional

Dimensiones

Indicadores

Unidad de medida

Escala de medición

Método de medición (Instrumento, ensayo, NTP)

Aditivo Consolid C444 y Solidry

Los aditivos Consolid 444 y Solidry se emplean como estabilizantes del suelo, actuando mediante reacciones químicas que fortalecen la estructura interna del material, mejoran la compactación y reducen la plasticidad. Su uso permite incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y minimizar los asentamientos diferenciales [37].

Se aplicarán en proporciones controladas (0.032 % Consolid 444 y 1.5 %, 2.25 % y 3 % Solidry) sobre muestras representativas del terreno. Cada mezcla será homogeneizada y compactada de acuerdo con el método Proctor Modificado, con el fin de observar los cambios en el comportamiento físico y mecánico.

Dosificación

0.032% Consolid C444

l/m<sup>2</sup>

Razón

Balanza

1.5, 2.25 y 3 Solidry

Kg/m<sup>2</sup>

Espesores de capa

Subrasante

cm

m2

31 Variable dependiente  
Definición conceptual  
Dimensión operacional  
Dimensiones  
Indicadores  
Unidad de medida  
Escala de medición  
Método de medición (Instrumento, ensayo, NTP)

90 Capacidad portante  
La capacidad portante del suelo corresponde a la resistencia que ofrece ante las cargas transmitidas por la estructura del pavimento. Está determinada por sus características físicas y mecánicas, las cuales pueden optimizarse mediante la incorporación de aditivos estabilizantes. Las propiedades físicas y mecánicas serán evaluadas mediante ensayos normalizados, comparando el suelo natural con los resultados obtenidos tras la aplicación de Consolid 444 y Solidry.  
Propiedades físicas  
Granulometría  
%  
Razón  
Análisis Granulométrico MTC E 107

Gravedad específica  
%  
Gravedad específica de sólidos (MTC E 113)

Clasificación de suelos  
%  
Clasificación de suelos SUCS -ASSHATO

Límites de Atterberg  
%  
Límites de Atterberg (NTP 339.129 - ASTM D4318)

67 Contenido de humedad  
%  
contenido de humedad de un suelo MTC E 108

Ascenso de Capilaridad  
h  
Ascenso de capilaridad (ASTM D2434)

Propiedades mecánicas  
CBR  
%  
Ensayo de CBR MTC- E 132

Proctor Modificado  
KN-m / m2  
Proctor modificado (NTP 339.141 - ASTM D-1557):

Permeabilidad

%

Permeabilidad (MTC E 906)

Nota. Elaboración propia.

1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas

Observación:

Implica el registro sistemático de comportamientos, eventos e interacciones observables tal como ocurren naturalmente. Este método proporciona una manera de recopilar datos ricos y detallados sin influir en los sujetos o el entorno, lo que lo hace particularmente valioso en la investigación cualitativa para comprender el contexto y los fenómenos sociales complejos [38]. En el presente estudio, consistió en la medición y toma de datos en campo durante las visitas realizadas en campo para la obtención de la muestra y para la elaboración de ensayos.

Análisis documental:

43 Implica la evaluación y la interpretación sistemática de información para adquirir conocimientos y comprender un fenómeno particular. Este método permite a los investigadores analizar varios tipos de documentos, como informes, cartas, registros oficiales y artículos de los medios, para extraer información, patrones y temas significativos [39].

Instrumentos

Guía de observación:

Consiste en el formato empleado para plasmar los datos obtenidos en campo durante las visitas realizadas para la definición de la topografía del sector analizado [40].

Guía de análisis documental:

Consiste en los formatos recopilados que sirven como referencia para procesar la data obtenida y plasmarla en el desarrollo del informe del presente proyecto [40].

TABLA XXI

1 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Técnicas

Instrumentos

Elementos de la población

Propósito

Observación

Fichas de registros de datos

34 Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de suelos arcillosos estabilizados con aditivo C444 y SD.

-Obtener las muestras de las calicatas

Análisis documental

Formato de análisis documental

Especificaciones técnicas de aditivos

-Elaborar los ensayos de laboratorio normados

Normativa de ensayos de laboratorio

Expedientes, informes técnicos, etc.

Nota. Elaboración propia.

#### Consideraciones éticas

La ética constituye una base fundamental para la investigación, ya que requiere que el investigador y el líder del proyecto cumplan con las regulaciones nacionales e internacionales de manera transparente y respetuosa. En el caso del presente estudio, éste se lleva cabo bajo los estándares IEEE para citar y hacer referencia a autores, y emplea el software Turnitin para verificar la autenticidad de la información utilizada, asegurando que no esté falsificada. Dicho enfoque cumple con la normativa de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

#### Procedimiento

Para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación, debemos tener en cuenta el siguiente organigrama, donde muestro el orden del procedimiento a seguir.

Fig. 9. Flujoograma.

Nota. Elaboración propia.

#### Estudio de la subrasante y ejecución de calicatas

Para el desarrollo de esta investigación y la identificación de los puntos de exploración, se inició con una revisión bibliográfica acerca de la ciudad y el área de estudio. Con base en la información recopilada, y apoyándonos en el mapa de riesgos proporcionado por INDECI y la Municipalidad del distrito de José Leonardo Ortiz, se seleccionaron las ubicaciones para la extracción de muestras, priorizando zonas cercanas y aquellas con presencia de suelos arcillosos

El trabajo de campo involucró la apertura de cuatro puntos de exploración de 1 m x 1m, identificados como C1, C2, C3 y C4, alcanzando una profundidad de 1.5 metros en cada uno. En cada punto se recolectó una muestra de suelo, almacenándose en sacos impermeables debidamente etiquetadas para su posterior identificación en laboratorio.

#### Fig. 10. Ubicación de calicatas

Para realizar los puntos de exploración solicito permiso a la Municipalidad del distrito de José Leonardo Ortiz, durante proceso de muestreo se registraron y describieron detalladamente los estratos identificados en las cuatro calicatas excavadas. Las muestras recolectadas fueron clasificadas y seleccionadas de acuerdo con lo establecido en la NTP 339.150. Cabe destacar que, en ninguna de las cuatro calicatas exploradas, se detectó la presencia de nivel freático. La investigación se llevó a cabo entre la Avenida Los Tulipanes del sector 1 de la Urbanización Carlos Stein en el distrito de José Leonardo Ortiz de la provincia de Chiclayo en el departamento de Lambayeque. Se elaboró un promedio de 4 calicatas a cielo abierto hasta la profundidad de 1.5 metros para así confeccionar un perfil estratigráfico que comprenda toda la longitud del tramo de estudio considerando que se encuentra entre los 500 y 1000 m. La investigación se enfocó en cumplir sus objetivos de verificar que la muestra del suelo se ha de tipo arcilloso, y su ejecución se divide en períodos. La primera, consistió en la recolección de información y la extracción de muestras.

Fig. 11. Muestra C-

01 Fig. 12. Muestra C-02

Fig. 13. Muestra C-

03 Fig. 14. Muestra C- 04

A continuación, se realizaron la identificación de perfiles estratigráficos correspondientes de las cuatro calicatas, en el cual obtenemos como resultados de las propiedades del suelo y sus características específicas en cada una de ellas

TABLA XXII

CLASIFICACION DE SUELO POR MEDIO DE CALICATAS

SUCS

AASHTO

Descripción

C-01

CL

A-6(15)

Arcilla de baja plasticidad

C-02

CL

A-6(13)

Arcilla de baja plasticidad

C-03

CL

A-7-6(15)

Arcilla de baja plasticidad con arena

C-04

CL

A-6(11)

Arcilla de baja plasticidad con arena

Nota. Elaboración propia.

Ensayos de laboratorio

La realización de cada ensayo se realizó en los laboratorios de la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, cumpliendo con las instrucciones especificadas en el manual de ensayos de materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. El procedimiento se realizó considerando los resultados de del perfil estratigráfico del suelo en estado natural, posteriormente de las cuatro muestras de calicatas, se le escogerá tres tipos de muestras representativas para analizar sus propiedades físicas-mecánicas, y posteriormente con incorporaron de dicho aditivo Consolid 444 y Solidry para analizar su comportamiento en el suelo.

Ensayos de Análisis Granulométrico: MTC E 107

Ensayo de Contenido de Humedad: MTC E 108

Ensayo de Limites de Atterberg: MTC E 110

Ensayos de la Gravedad Especifica Relativa a los sólidos: MTC E 113

Ensayos de Proctor Modificado: MTC E 115

Ensayos de CBR: MTC E 133

Ensayo de Ascensión de capilaridad

Ensayo de Permeabilidad

Esta investigación se enfocó en cumplir sus objetivos, demostrar el planteamiento de la hipótesis, para ello se procede a seguir la normativa que establece la norma en cada ensayo a realizar durante su ejecución.

PRUEBAS DE LA MUESTRA DE SUELO ARCILLOSO EN ESTADO NATURAL

Análisis granulométrico mediante el tamizado

Este ensayo se realizó seleccionando una muestra representativa

104 previamente extraída de cada calicata, en la cual se registra el peso inicial de la muestra, se realizar el lavado y finalmente se lleva a secar la muestra en horno. Posteriormente, pasada las 24 horas, se realiza el tamizado utilizando la serie de tamices: N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 50, N° 100 y N° 200, dispuestos en orden descendente. Finalmente se registró el peso retenido en cada tamiz para calcular la distribución granulométrica, obteniendo la curva granulométrica.

12 Fig. 15. Lavado de las muestras.

Fig. 16. Lavado de muestras C1,C2,C3.

Fig. 17. Secado al horno.

Fig. 18. Granulometría por tamizado.

Contenido de humedad

25 Este ensayo se realizó seleccionando un porcentaje de las muestras de las calicatas C1, C2, C3 y C4, las cuales fueron previamente pesadas con su peso inicial húmedo de la muestra, por consiguiente, se llevó a secar en horno a 110°C por 24 horas. Finalmente, pasado este tiempo se vuelve a pesar la muestra para así obtener porcentaje de peso seco. Este mismo proceso se realizó para todas las calicatas (C1, C2, C3 y C4), en el estado natural.

Fig. 19. Pesado de las muestras

Fig. 20. Muestras al horno.

Para la adición CONSOLID C444 y SOLIDRY, el procedimiento no cambia, pero en este caso se agrega en cada calicata los siguientes porcentajes:

TABLA XXIII

PORCENTAJE DE ADICIÓN EN CADA CALICATA

CALICATA

Porcentaje de adición

C1

0.032% + 1.5%

0.032% + 2.25%

0.032% + 3%

C2

0.032% + 1.5%

0.032% + 2.25%

0.032% + 3%

C3

0.032% + 1.5%

0.032% + 2.25%

0.032% + 3%

Nota. Elaboración propia.

Límites de Atterberg

En este ensayo, se realizó seleccionando para las muestras C1, C2, C3 y C4, las muestras fueron previamente trituradas y pasadas por el tamiz N°40. Se prepararon 200g que esta entre el rango de peso que establece la norma del MTC E 110, MTC E 111, estas muestras fueron primeramente

saturadas por un periodo de 24 horas con agua destilada.

Para determinar el límite líquido se utilizó la cuchara de Casagrande, para formar una ranura y registrar golpes requeridos, los cuales determinaremos al momento de cierre de la ranura de la muestra, determinando el límite líquido mediante gráficos, también se tomas muestras según la cantidad de golpes que haya dado cada muestra en la calicata correspondiente y llevado al horno para así obtener su humedad. Para determinar el límite plástico, se procedió a amasar las muestras formando cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro, se pesaron inicialmente en estado natural y se secaron en horno a 110°C durante 24 horas. Finalmente, se procedió a pesar nuevamente para determinar su contenido de humedad y así calcular el índice de plasticidad.

Fig. 21. Límites de Atterberg

Fig. 22. Formado de cilindros.

Para continuar con las adiciones, vamos a descartar la C4, ya que es una arcilla de media plasticidad, trabajando solo con C1, C2 y C3, porque según su clasificación, son arcillas de alta plasticidad y así obtener mejores resultados para un suelo más pobre. En cada calicata, se va a trabajar con las 3 adiciones antes mencionadas: 0.032%+1.50%; 0.032%+2.25% ; 0.032%+3%.

Gravedad Específica

Para este ensayo, se selecciona una muestra del suelo seca y triturada que pase por la malla N° 40. Se registrar el peso inicial de 50g se coloca la muestra en una fiola y se agrega agua destilada hasta completar su capacidad, luego se procede a pesar la fiola con agua y suelo y dejamos sedimentar las muestras por 24h. Para tener la certeza de eliminar los vacíos se utiliza la olla de vacío, finalmente se realizar cálculos comparativos entre los pesos obtenidos, determinando así la gravedad específica de la muestra.

Fig. 23. Peso de fiola+agua.

Fig. 24. Colocación de la muestra en la fiola.

Proctor Modificado

Para este ensayo, se selecciona una muestra del suelo seca y triturada que pase por la malla N°4 y se pesa 3 kg para cada diferente porcentaje de agua, los cuales fueron obtenidos al realizar en ensayo de Límites de Atterberg, por consiguiente, en bolsas herméticas se deja saturar un periodo de 24h con porcentaje de agua correspondiente. Posteriormente, se compacta en un molde Proctor siguiendo el procedimiento establecido por el MTC E 133, que indica que se realiza en 5 capas y con 25 golpes cada uno de ellos, luego se pesa cada molde más muestra finalizando así el ensayo y determinando la densidad seca máxima y humedad óptima para un suelo arcilloso.

Fig. 25. Peso de la muestra.

Fig. 26. Saturación de muestra.

Fig. 27. Proctor.

Fig. 28. Enrasado de molde.

Para el suelo natural, vamos a seguir trabajando con las 3 calicatas antes mencionadas: C1, C2 y C3. En la muestra de suelo C-01, como se puede visualizar en la siguiente tabla, se obtuvo una densidad máxima seca promedio de 1.721g/cm<sup>3</sup> y un óptimo contenido de humedad de 14.767%.

TABLA XXIV

PROCTOR EN E.N- C-01

Muestra C-01

Profundidad (m)

PROCTOR

MDS (gr/cm<sup>3</sup>)

OCH (%)

Proctor 1

0.10 a 1.50

1.725

15.3

Proctor 2

1.708

12.8

Proctor 3

1.73

16.2

PROMEDIO

1.721

14.767

Nota. Elaboración propia.

Fig. 29. Proctor en E.N C-01.

En la muestra de suelo C-02, como se puede visualizar en la siguiente tabla, se obtuvo una densidad máxima seca promedio de 1.702g/cm<sup>3</sup> y un óptimo contenido de humedad de 12.60%.

TABLA XXV

PROCTOR EN E.N- C-02

Muestra C-02

Profundidad (m)

PROCTOR

MDS (gr/cm<sup>3</sup>)

OCH (%)

Proctor 1

0.10 a 1.50

1.706

13.000

Proctor 2

1.700

11.600

Proctor 3

1.701

13.200

PROMEDIO

1.702  
12.600

Nota. Elaboración propia.

Fig. 30. Proctor en E.N C-02.

En la muestra de suelo C-03, como se puede visualizar en la siguiente tabla, se obtuvo una densidad máxima seca promedio de 1.715g/cm<sup>3</sup> y un óptimo contenido de humedad de 10.967%.

TABLA XXVI

PROCTOR EN E.N- C-03

Muestra C-03

Profundidad (m)

PROCTOR

MDS (gr/cm<sup>3</sup>)

OCH (%)

Proctor 1

0.10 a 1.50

1.700

10.200

Proctor 2

1.717

11.600

Proctor 3

1.728

11.100

PROMEDIO

1.715

10.967

Nota. Elaboración propia.

Fig. 31. Proctor en E.N C-03.

California Bearing Ratio(CBR)

Para realizar este ensayo, se selecciona una muestra del suelo seca y triturada que pase por la malla N°4 y se pesa 5 kg y se procede a saturar la con la humedad obtenida en el ensayo de Proctor, y se procede a saturar un periodo de 24h en bolsas herméticas, luego se procede a compactar empleado un pistón y molde CBR con los golpes correspondientes de 12, 25 y 56 golpes, antes de compactar se toma el peso del molde, luego se registra el peso del molde más muestra compactada en su diferentes golpes correspondiente, luego se procede a ensamblar el molde, sumergir al agua y dejar un periodo de 3 días en agua, cabe recalcar que al inicio y durante los tres días se toma tomar la medida de expansión. Finalmente, se retira los moldes de la poza, se deja escurrir 30 minutos y se procede a penetrar cada molde para determinar el resultado de su CBR en sus diferentes humedades, en el caso que se realiza este ensayo con la adición del del sistema Consolid C444 y Solidry, se realiza para cada porcentaje de adición y golpes correspondientes, y ya que nuestro aditivo actúa como un material cementante se deja reposar 3 días al aire libre y 3 días sumergido.

Fig. 32. Peso de la muestra 5kg.

Fig. 33. Amasado de la muestra.

Fig. 34. Muestras sumergidas.

Fig. 35. Prueba de expansión.

Fig. 36. Ensamblajes de moldes.

Fig. 37. Penetración.

Ascensión de capilaridad

Con el propósito de evaluar y garantizar el comportamiento del suelo frente a la acción del agua por capilaridad, se realizó el ensayo de ascensión capilar, siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM D2434 adaptada a suelos de baja permeabilidad. Este ensayo permitió analizar la capacidad del material para absorber y retener agua a través de los poros, comparando el comportamiento del suelo natural y de las muestras estabilizadas con Consolid (C444) y Solidry (SD).

Para realizar este ensayo se tamiza las muestras de suelo de cada calicata y se pesa una cantidad de 400 gramos, para luego proceder a compactar cada muestra, para ello se pone a un molde y comprimir con un pistón, y se procede a dejar en una fuente con agua, y se controla por un promedio de 10 días la ascensión capilar de cada muestra. Para la muestra con adición, el procedimiento es el mismo, pero antes de poner al molde se adiciona los diferentes porcentajes de 0.032% Consolid C444, con Solidry 3%, a través de una pipeta graduada y con ayuda de una espátula se procede a mezclar bien la muestra, con una humedad óptima para su compactación.

Durante el desarrollo del ensayo, se observaron diferencias en la velocidad de ascenso entre las muestras. El suelo natural presentó un rápido incremento del frente de humedad, mientras que las muestras tratadas con los aditivos mostraron una ascensión más lenta y menor altura final, lo que indica una reducción en la conectividad de los poros capilares y una mayor compactación interna del material. De esta manera permitió cuantificar el efecto de los aditivos sobre la capilaridad y la susceptibilidad a la humedad, parámetros esenciales para garantizar la estabilidad de subrasantes expuestas a condiciones de saturación.

Fig. 38. Peso de la muestra.

Fig. 39. Peso de Solidry.

Fig. 40. Mezclado de la muestra. Compactado + enrasado

Fig. 41.

Fig. 42. Briquetas SN Y SM. Sumergido 0 horas.

Fig. 43.

horas.

Fig. 44. Sumergido 1

Permeabilidad

Con el fin de conocer la caracterización del suelo con los efectos del aditivo y de muestra natural sin aditivo, se llevó a cabo un ensayo de permeabilidad en cámara triaxial empleando una celda de flujo acoplada, lo cual corresponde a un ensayo de permeabilidad en condiciones controladas de confinamiento, más preciso para suelos finos.

Para este procedimiento se tallaron especímenes cilíndricos de 36 mm de diámetro y 72 mm de altura, obtenidos a partir de las muestras compactadas a la densidad seca máxima y humedad óptima determinada en el ensayo Proctor modificado. Cada muestra fue colocada cuidadosamente

dentro de la cámara triaxial, asegurando un confinamiento uniforme. Posteriormente, se conectó la celda de permeabilidad, a través de la cual se hizo circular agua bajo una presión controlada, registrando el volumen de flujo que atravesaba la muestra durante intervalos de tiempo definidos.

Este método permitió determinar de manera más precisa el coeficiente de permeabilidad (k) y analizar el efecto del suelo natural y de las muestras estabilizada con los aditivos Consolid (C444) y Solidry (SD) sobre la estructura interna del suelo. En las muestras tratadas se observó una reducción del paso de agua, lo que evidencia la formación de una matriz más densa y menos porosa, contribuyendo a una mayor impermeabilidad y estabilidad del material.

## Resultados y Discusiones

### Resultados

En este desarrollo se presentarán los datos obtenidos de los ensayos realizados en las muestras de suelo arcilloso, tanto en su estado natural como en aquellas a las que se les incorporaron los aditivos Consolid 444 y Solidry. Los aditivos se aplicaron en los porcentajes previamente establecidos en el procedimiento experimental. Asimismo, se realizaron ensayos para analizar las propiedades físicas del suelo con el objetivo de clasificarlo según las normativas AASHTO y SUCS. En cuanto a las propiedades mecánicas, se llevaron a cabo pruebas que permitieron evaluar la capacidad portante del suelo antes y después de la aplicación de los aditivos, identificando los cambios significativos en su comportamiento. Los resultados obtenidos son esenciales para determinar la efectividad de los aditivos en la mejora de la capacidad portante de la subrasante y, por lo tanto, para el cumplimiento de los objetivos propuestos en esta investigación. El análisis se desarrollará en función de los resultados alcanzados en cada ensayo. En lo que respecta al análisis de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, se menciona lo siguiente según los objetivos alcanzados:

DEFINIR LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE GRANULOMETRÍA, LÍMITES DE ATTERBERG, CONTENIDO DE HUMEDAD Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO RESPECTO A SU ESTADO NATURAL

Para el desarrollo del primer objetivo, se han determinado las propiedades físicas de las muestras naturales de la zona de estudio. Para lo cual, se han realizado los siguientes ensayos normativos:

TABLA XXVII

### PROPIEDADES FÍSICAS

ENSAYOS

NORMA

Análisis Granulométrico por Tamizado

N.T.P. 339.128 / A.S.T.M. D - 422 / M.T.C. E 107  
Límites de consistencia

N.T.P. 339.129 / A.S.T.M. D-4318 / M.T.C. E -110 / E -111  
Contenido de Humedad

N.T.P. 339.127 / A.S.T.M. D -2216 / M.T.C. E 108  
Clasificación de Suelos- S.U.C.S. y A.A.S.H.T.O.

A.S.T.M. 2487/ A.A.S.H.T.O. M 145

Nota. Elaboración propia.

Caracterización de muestras de estado natural.

Una vez extraídas las muestras de calicatas C-01, C-02, C-03, C-04, se siguió el procedimiento establecido en norma y se procedió a llevar a las muestras a laboratorio para determinar sus propiedades físicas y mecánicas del suelo, a través de los diversos ensayos de laboratorio y por consiguiente se obtuvo los siguientes resultados.

Análisis granulométrico por tamizado

De acorde con la norma MTC E-107, para realizar este ensayo tomamos la muestra en estado natural de las calicatas C-01, C-02, C-03, C-04 para realizar el tamizado de la muestra previamente lavada y secada. El análisis granulométrico realizado mostró los siguientes porcentajes pasantes en función de cada muestra por las respectivas mallas o tamices, con el fin de clasificar cada muestra de suelo.

TABLA XXVIII

COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS EN E.N

CALICATA

COMPOSICIÓN

C-01

C-02

C-03

C-04

% de Gravas (4.75mm)

0.10%

0.00%

0.10%

0.10%

% de Arenas (0.075mm)

9.90%

5.10%

16.90%

16.40%

% de Arcillas y limos (<0.075mm)

90.00%

94.90%

83.00%

83.50%

Nota. Elaboración propia.

Fig. 45. Curva granulométrica

La tabla XLVIII muestra la comparación de los porcentajes de todas las muestras que pasan por sus respectivos tamices, se puede observar que más del 80% pasa por el tamiz N°200, lo que indica que gran parte de sus partículas son muy finas (limos y arcillas) en todas las muestras analizadas. En la figura 39, visualizamos el comportamiento de la curva granulométrica de las muestras al natural.

Gravedad específica de los sólidos

Este ensayo tiene como finalidad hallar las relaciones de la fase del suelo, grado de saturación y la relación de vacíos, los cuales son indispensables para determinar cuál es la estructura interna del suelo y así entender su comportamiento, para ellos se realizó el ensayo para las calicatas C-01, C-02, C-03.

## TABLA XXIX

## Pesos específicos de las muestras naturales

C-01

C-02

C-03

N° de fiola

R-1

R-2

R-3

PROM

Peso específico relativo de sólidos (Gs) g/cm<sup>3</sup>

2.591

2.538

2.554

2.561

Nota. Elaboración propia.

La tabla 3 muestra la comparación de los pesos específicos de las muestras en estado natural. En la C-01 se obtuvo 2.591 g/m<sup>3</sup>, 2.538 g/m<sup>3</sup> para C-02 y 2.554 g/m<sup>3</sup> para C-03, teniendo como conclusión que el peso específico promedio de la muestra natural era de 2.561 g/m<sup>3</sup>.

Límites de consistencia del estado natural de la muestra

Los límites de consistencia indican los rangos de contenido de humedad en los que un suelo arcilloso cambia de un estado a otro (sólido, plástico, líquido). Determinarlos es esencial para clasificar el suelo y prever su comportamiento bajo diferentes condiciones. En este trabajo, los límites líquido y plástico se evaluaron según las normas MTC E-110 y MTC E-111.

## TABLA XXX

Resulta

dos de límites

MUESTRA

C-01

C-02

C-03

C-04

% Límite líquido

38.10%

37.73%

45.88%

34.82%

% Límite plástico

11.52%

14.77%

20.26%

16.77%

% de Índice de Plasticidad

26.58%

22.96%

25.63%

18.05%

Nota. Elaboración propia.

Fig. 46. Representación de límites en E.N

Nota. Elaboración propia.

TABLA XXXI

Rangos de índice de plasticidad

Índice de Plasticidad

Plasticidad

Característica

$IP \geq 20$

Alta

Suelos muy arcillosos

$IP 7 \leq 20$

Media

Suelos arcillosos

$IP \leq 7$

Baja

Suelos pocos arcillosos

$IP = 0$

No plástico

Suelos extensos de arcillas

Nota. Elaboración

propia.

De las muestras natural de las cuatro calicatas, se tiene que el índice de plasticidad de la calicata 1, 2 y 3 es 26.58%, 22.96%, 25.63% respectivamente lo cual está por encima rango  $IP \geq 20$  lo que lo caracteriza como un suelo muy arcilloso de alta plasticidad, en la calicata 4 es 18.05%, lo cual está por entre el rango  $IP 5 \leq 20$  lo que lo caracteriza como un suelo arcilloso de media plasticidad, el cual posteriormente lo vamos a descartar y nos quedaremos con nuestras tres calicatas iniciales para adicionar nuestro aditivo.

Contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo refleja la cantidad de agua presente en cada muestra, lo cual es fundamental para entender su comportamiento durante la compactación y bajo carga. En este estudio se utilizó la norma MTC E-108 para cuantificar el contenido de humedad de las muestras.

TABLA XXXII

Resultados de contenido de humedad

MUESTRA

Prof. (m)

Contenido de humedad

C-01

1.5

20.40%

C-02

1.5

20.40%

C-03

1.5

17.10%

C-04

1.5

22.80%

Nota. Elaboración propia.

Fig. 47. Representación %cont.humedad en E.N

Nota. Elaboración propia.

Para el contenido de humedad de las muestras naturales que se muestra en la figura 14, se tiene que para la primera y segunda calicata el valor es de 20.40%, para la tercera es de 17.10% y 22.80% para la cuarta, porque se obtiene una humedad promedio de nuestro suelo arcilloso de 19.68%.

Clasificación sucs y aashto

TABLA XXXIII

Clasificación de las muestras natural

MUESTRA

SUCS

AASHTO

COMPOSICIÓN

C-01

CL

A-6 (15)

Arcilla de baja plasticidad

C-02

CL

A-6 (13)

Arcilla de baja plasticidad

C-03

CL

A-7-6 (15)

Arcilla de baja plasticidad con arena

C-04

CL

A-6 (11)

Arcilla de baja plasticidad con arena

Nota. Elaboración propia.

La muestra C-01 está clasificada por S.U.C.S como un suelo de tipo CL y por clasificación A.A.S.H.T.O. es del tipo A-6(15). La cual interpreta que la muestra está conformada por arcillas de baja plasticidad.

La muestra C-02 está clasificada por S.U.C.S como un suelo de tipo CL y por clasificación A.A.S.H.T.O. es del tipo A-6 (13). La cual interpreta que la muestra está conformada por arcillas de baja plasticidad.

La muestra C-3 está clasificada por S.U.C.S como un suelo de tipo CL y por clasificación A.A.S.H.T.O. es del tipo A-7-6 (15). La cual interpreta que la muestra está conformada por arcillas de baja plasticidad con arena.

La muestra C-4 está clasificada por S.U.C.S como un suelo de tipo CL y por clasificación A.A.S.H.T.O. es del tipo A-6 (11). La cual interpreta que la muestra está conformada por arcillas de baja plasticidad con arena.

Cuadro resumen de las propiedades físicas de suelo natural

TABLA XXXIV

Propiedades físicas

MUESTRAS DE SUELO EN ESTADO NATURAL

Calicata

PROF. (m)

Muestra

Humedad  
LIMITES DE ATTERBERG  
CLASIFICACIÓN

W (%)

L.L

L.P

I.P

SUCS

AASTHO

C-01

1.5

100% E.N

20.40%

38.1

11.52

26.58

CL

A-6 (15)

C-02

1.5

100% E.N

20.40%

37.73

14.77

22.96

CL

A-6 (13)

C-03

1.5

100% E.N

17.10%

45.88

20.26

25.63

CL

A-7-6 (15)

C-04

1.5

100% E.N

22.80%

34.82

16.77

18.05

CL

A-6 (11)

Nota. Elaboración propia.

DEFINIR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PROCTOR Y CBR DEL SUELO RESPECTO A SU ESTADO NATURAL.

Para los resultados respecto al segundo objetivo, se han determinado las propiedades mecánicas de las muestras naturales de la zona de estudio. Para lo cual, se han realizado los siguientes ensayos normativos:

TABLA XXXV

Propiedades mecánicas

4  
4

ENSAYOS

NORMA

Ensayo de Proctor Modificado

N.T.P. 339.138 / M.T.C. E 115

Ensayo de (CBR)

N.T.P. 339.145 / M.T.C. E 132

Nota. Elaboración propia.

Se han realizado los ensayos de Proctor modificado y CBR, tal como se muestra a continuación:

Proctor modificado

El ensayo Proctor Modificado busca determinar el óptimo contenido de humedad (OCH) y la máxima densidad seca (MDS) que un suelo puede alcanzar bajo condiciones de compactación. Estos parámetros son necesarios para lograr una subrasante estable y resistente. Las pruebas se realizaron conforme a la norma MTC E-115. Cabe resaltar que para obtener resultados más certeros se realizó 3 repeticiones de Proctor en cada calicata de la muestra en estado natural.

TABLA XXXVI

Resumen de Proctor en E.N

Muestra

Profundidad (m)

PROCTOR

MDS (gr/cm<sup>3</sup>)

OCH (%)

C-01

0.10 a 1.50

1.721

14.767

C-02

1.702

12.600

C-03

1.715

10.967

Nota. Elaboración propia.

Fig. 48. Representación Proctor en E.N

Nota. Elaboración propia.

De la muestra natural, se tiene que la calicata 1 presenta 1.721 gr/cm<sup>3</sup> de densidad máxima seca y 14.767% óptimo contenido de humedad. Asimismo, se tiene 1.702 gr/cm<sup>3</sup> de densidad máxima seca y 12.600% de óptimo contenido de humedad para para la calicata 2. De igual manera, para la calicata 3 se tiene valores de 1.715 gr/cm<sup>3</sup> de máxima densidad seca y 10.967 % de óptimo contenido de humedad. Lo cual oscila entre 1.702 gr/cm<sup>3</sup> a 1.721 gr/cm<sup>3</sup> y 10.967 % a 14.767%, lo cual nos indica que el suelo necesita un contenido específico de humedad para alcanzar su máxima compactación.

CBR

El ensayo CBR se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en

21 la norma MTC E-132, según lo que indica en el Manual de Ensayos de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Luego de este procedimiento, se determinaron los valores de CBR y el índice de expansión en los diferentes días consecutivos de los moldes en inmersión al agua, durante un periodo de 96 horas, un total de 9 muestras recolectadas de tres calicatas distintas. Este periodo de 96 horas corresponde al proceso de curado de las muestras.

TABLA XXXVII

4 Resultados de CBR de la muestra natural de análisis

Muestra

CBR

95%

100%

C-01

3

3

C-02

2

3

C-03

3

4

Nota. Elaboración propia.

Fig. 49. Representación de CBR en E.N

109 Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla LVII y en la Fig.43., el CBR de un suelo arcilloso de baja capacidad portante tiende a soportar una humedad mínima de 2% y máxima de 3% al 95% y soporta una capacidad de 3% y máxima de 4% al 100%, lo cual según las especificaciones establecidas por el MTC, es menor a 6%, lo cual para ser usada como subrasante se tiene que pasar un proceso de estabilización previa a se usada para diversos fines.

81 Cuadro resumen de las propiedades mecánicas de suelo natural

TABLA XXXVIII

Resumen de las propiedades mecánicas

RESUMEN PROPIEDADES MECANICAS ESTADO NATURAL

Calicata

PROCTOR

CBR

77 MDS (gr/cm<sup>3</sup>)

OCH (%)

95 (%)

100 (%)

C-01

1.721

14.767

3

3

C-02

1.702

12.6

2

3  
C-03  
1.715  
10.967  
3  
4

Nota. Elaboración propia.

2 DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL ADITIVO CONSOLID Y SOLIDRY EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO A NIVEL DE SUBRASANTE DEL TRAMO DE ESTUDIO. Los resultados para el tercer objetivo se han determinado las propiedades físicas de las muestras naturales de la zona de estudio con adición del Consolid C444 y Solidry en los porcentajes establecidos en lo que indica el cuadro. Para lo cual los ensayos normativos son los mismo que los del suelo natural:

TABLA XXXIX  
PORCENTAJE DE ADICIÓN EN CADA CALICATA  
CALICATA  
Porcentaje de adición  
C1  
0.032% + 1.5%  
0.032% + 2.25%  
0.032% + 3%  
C2  
0.032% + 1.5%  
0.032% + 2.25%  
0.032% + 3%  
C3  
0.032% + 1.5%  
0.032% + 2.25%  
0.032% + 3%

Nota. Elaboración propia

Ensayos experimentales con adición Consolid 444 y Solidry

Límites de consistencia con adición

2 Según las tablas mostradas a continuación podemos observar que en lo que corresponde a el índice de plasticidad hay una disminución con respecto al suelo natural, la cual es favorable en termino de mejoramiento de suelo, ya que un menor IP indica que el suelo tiene una menor tendencia a deformarse bajo carga.

Límites de atterberg para la calicata c-01

3 Según la tabla, se observan los valores obtenidos en la calicata C-01, y en la gráfica refleja el comportamiento en sus propiedades de la muestra con las adiciones respectivas.

TABLA XL  
Resultados de Atterberg+ adición C-01  
CALICATA C-01  
DOSIFICACIÓN  
LL  
LP  
IP  
PATRON SN  
38.10%  
11.52%  
26.58%  
0.032% C444 + 1.5 SD

52.45%  
 23.94%  
 28.51%  
 0.032% C444 + 2.25 SD  
 55.73%  
 28.14%  
 27.59%  
 0.032% C444 + 3.0 SD  
 57.22%  
 26.28%  
 30.94%

Nota. Elaboración

propia

Fig. 50. Representación de Límites +adición

Nota.

Elaboración propia

Límites de Atterberg para la calicata c-02

Según la tabla, se registran los valores obtenidos en la calicata C-02, y en la gráfica muestra el comportamiento en sus propiedades con las adiciones respectivas .

TABLA XLI

Resultados de Atterberg con adición en C-02

CALICATA C-02

DOSIFICACIÓN

LL

LP

IP

PATRON SN

37.73%

14.77%

22.96%

0.032% C444 + 1.5 SD

49.10%

26.70%

22.40%

0.032% C444 + 2.25 SD

52.29%

27.61%

24.68%

0.032% C444 + 3.0 SD

53.54%

28.01%

25.52%

Nota. Elaboración propia

Fig. 51. Representación de Límites+adición

Nota. Elaboración propia

Límites de atterberg para la calicata c-03

Según la tabla, se pueden observar los valores obtenidos en la calicata C-03, y en la gráfica ilustra como varia el comportamiento en sus propiedades a medida que se va incrementando con las adiciones respectivas .

TABLA XLII

3

Resultados de Límites+adición en C-03

CALICATA C-03

DOSIFICACIÓN

LL

LP

IP

PATRON SN

45.88%

20.26%

25.63%

0.032% C444 + 1.5 SD

62.91%

30.29%

32.62%

0.032% C444 + 2.25 SD

63.35%

31.72%

31.63%

0.032% C444 + 3.0 SD

67.10%

37.59%

29.51%

Nota. Elaboración propia

Fig. 52. Representación de Límites de Atterberg con adición C-03

Nota. Elaboración propia

Los resultados del ensayo de Límites de Atterberg de las muestras en las calicatas 01, 02 y 03 evidenciaron un incremento en el límite líquido y en el índice de plasticidad respecto a la muestra natural, lo cual podría interpretarse inicialmente como un aumento en la plasticidad del suelo y, por tanto, una aparente desventaja para su estabilidad. Sin embargo, esto ocurre porque los aditivos Consolid y Solidry no solo actúan sobre la plasticidad, sino que generan reacciones fisicoquímicas (cementación y floculación), lo que mejora la compactación, cohesión interna y reducen la deformabilidad, e incrementan la resistencia mecánica del suelo. A medida que se incrementó la dosificación, el límite líquido aumento, por consiguiente el índice de plasticidad también aumento. Por ejemplo en calicata C-01, el límite líquido aumento de 38.10 % a 52.45% en la primera dosificación, en el segundo paso a 55.43% y en la tercera en 57.22% , mientras que el índice de plasticidad también aumento de 26.58% a 28.51 % , 27.59% y 30.94% en las dosificaciones correspondientes.

Cuadro resumen de las propiedades físicas de suelo natural + adición

TABLA XLIII

Propiedades físicas + adición

RESUMEN DE PROPIEDADES FISICAS CON ADICION

Calicata

LIMITES DE ATTERBERG

C-01

C-02

C-03

DOSIFICACIÓN

LL

LP

IP

3  
1

LL  
LP  
IP  
LL  
LP  
IP  
PATRON SN  
0.38  
0.12  
0.27  
0.38  
0.15  
0.23  
0.46  
0.20  
0.26  
0.032% C444 + 1.5 SD  
0.52  
0.24  
0.29  
0.49  
0.27  
0.22  
0.63  
0.30  
0.33  
0.032% C444 + 2.25 SD  
0.56  
0.28  
0.28  
0.52  
0.28  
0.25  
0.63  
0.32  
0.32  
0.032% C444 + 3.0 SD  
0.57  
0.26  
0.31  
0.54  
0.28  
0.26  
0.67  
0.38  
0.30

Nota. Elaboración propia.

2 DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL ADITIVO CONSOLID 444 Y SOLIDRY EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO A NIVEL DE SUBRASANTE DEL TRAMO DE ESTUDIO.

55 Los resultados para el cuarto objetivo se han determinado las propiedades mecánicas de las muestras naturales de la zona de estudio con adición del Consolid C444 y Solidry en los porcentajes establecidos. Según los resultados obtenidos, se evidencia un incremento en la Máxima Densidad

55 Seca (MDS) con respecto al suelo en su estado natural. Asimismo, el Contenido Óptimo de Humedad (COH) muestra una variación positiva, indicando una mejor respuesta del suelo ante los procesos de compactación. Estos cambios reflejan que la incorporación de los aditivos Consolid y Solidry ha generado un efecto favorable sobre las propiedades físicas del suelo, mejorando su comportamiento mecánico y su capacidad de soporte. Dichas variaciones se observan con mayor detalle en las siguientes tablas y gráficas correspondientes a cada calicata analizada. Ensayos experimentales con adición consolid C444 y Solidry SD

106 Proctor modificado con adición para c-01

64 En la tabla correspondiente se presentan los resultados del ensayo Proctor Modificado realizado sobre la muestra C-01, a la cual se incorporó el aditivo Consolid. La curva de compactación obtenida muestra un incremento moderado en la MDS respecto al suelo natural, y una disminución en el OCH. Esto evidencia una mejora en la compactación del material, producto de la reacción del aditivo con las partículas finas, lo que demuestra una mejora significativa en las condiciones de compactación del suelo.

30 TABLA XLIV

11 Resultados de Proctor+adición C-01  
CALICATA C-01

PROCTOR
DOSIFICACIÓN
MDS (gr/cm <sup>3</sup> )
OCH (%)
PATRON SN
1.72
14.77
0.032% C444 + 1.5 SD
1.92
10.50
0.032% C444 + 2.25 SD
1.83
12.40
0.032% C444 + 3.0 SD
1.89
7.80

Nota. Elaboración propia.

Fig. 53. Representación Proctor+ adición

Nota. Elaboración propia.

Proctor modificado con adición para c-02

86 Para la muestra C-02, tratada con el aditivo Solidry, los resultados reflejan un incremento más notorio en la densidad seca máxima y un desplazamiento del contenido óptimo de humedad hacia valores menores. Este comportamiento sugiere una mejor interacción entre el aditivo y los componentes del suelo, generando una matriz más densa y estable. La compactación alcanzada indica que el aditivo contribuye a una mayor cohesión entre partículas, mejorando las condiciones estructurales del

material compactado.

TABLA XLV  
Resultados de Proctor+adición en C-02  
CALICATA C-02

PROCTOR  
DOSIFICACIÓN  
MDS (gr/cm<sup>3</sup>)  
OCH (%)  
PATRON SN  
1.702  
12.600  
0.032% C444 + 1.5 SD  
1.850  
11.500  
0.032% C444 + 2.25 SD  
1.811  
13.900  
0.032% C444 + 3.0 SD  
1.800  
11.200  
Nota. Elaboración propia.

Fig. 54. Representación Proctor+adición C-02

Nota. Elaboración propia.

Proctor modificado con adición para c-03  
La muestra C-03, que combina los aditivos Consolid y Solidry, presenta los valores más altos de densidad seca máxima registrados. Del mismo modo, el contenido óptimo de humedad experimenta un leve incremento en comparación con las muestras anteriores.  
Estos resultados confirman un efecto sinérgico entre ambos aditivos, potenciando la estabilidad y resistencia del suelo tratado. El análisis de las curvas de compactación demuestra una tendencia favorable, donde la aplicación combinada de los productos logra optimizar las propiedades mecánicas del suelo en términos de compactación y comportamiento estructural

TABLA XLVI  
Resultados de Proctor +adición en C-03  
CALICATA C-03

PROCTOR  
DOSIFICACIÓN  
MDS (gr/cm<sup>3</sup>)  
OCH (%)  
PATRON SN  
1.715  
10.967  
0.032% C444 + 1.5 SD  
1.750

13.500  
0.032% C444 + 2.25 SD  
1.770  
14.500  
0.032% C444 + 3.0 SD  
1.870  
14.500  
Nota. Elaboración propia

Fig. 55. Representación de Proctor+adición C-03

Nota. Elaboración propia.

9 En la Tabla, se observa que la muestra patrón sin aditivo (SN) presenta una densidad seca máxima (MDS) de 1.721 g/cm<sup>3</sup> y una óptima de contenido de humedad (OCH) de 14.767 %. Al incorporar los aditivos Consolid (C444) y Solidry (SD), se evidencia un incremento progresivo en la densidad seca máxima y una disminución del contenido óptimo de humedad, lo que demuestra una mejora significativa en las condiciones de compactación del suelo. El mejor resultado se obtuvo con la dosificación de 0.032 % C444 + 1.5 % SD, alcanzando una MDS de 1.921 g/cm<sup>3</sup> y una OCH de 10.500 %, lo que representa un aumento de aproximadamente 11.6 % en la densidad seca máxima respecto al suelo natural. Este comportamiento se debe a que los aditivos provocan una reacción de floculación y aglomeración de las partículas arcillosas, reduciendo la adsorción de agua y mejorando la estructura interna del suelo. En conjunto, el efecto de ambos aditivos permitió transformar un suelo arcilloso de baja resistencia en un material más denso, menos dependiente de la humedad y con un desempeño mecánico superior para aplicaciones en subrasantes y capas de pavimento.

CBR

34 De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia un incremento significativo en los valores de CBR en comparación con el suelo en su estado natural. Dicho incremento demuestra que los aditivos aplicados han mejorado notablemente la capacidad de soporte del material. Esta mejora se relaciona directamente con el aumento observado en la densidad seca máxima y la mejor distribución de humedad, previamente determinados en el ensayo Proctor Modificado. La acción combinada de los productos Consolid y Solidry contribuye a la estabilización de la estructura granular del suelo, favoreciendo su resistencia al corte y su comportamiento bajo cargas. Las siguientes tablas y gráficas muestran el comportamiento obtenido para cada una de las muestras tratadas.

CBR con adición para c-01

30 En la muestra C-01, tratada con el aditivo Consolid, se observa un aumento en el valor de CBR respecto al suelo natural. Este resultado indica una mejora en la capacidad portante del suelo, atribuible a la acción del aditivo que promueve una mejor unión entre las partículas finas y una reducción de la deformación bajo carga. El comportamiento obtenido demuestra que el aditivo Consolid mejora las características mecánicas del suelo sin alterar significativamente su plasticidad ni su respuesta a la compactación.

TABLA XLVII

Resultados de CBR+ adición C-01

CALICATA C-01

## DOSIFICACIÓN

CBR

95%

100%

PATRON SN

3

3

0.032% C444 + 1.5 SD

9

10

0.032% C444 + 2.25 SD

13

15

0.032% C444 + 3.0 SD

21

23

Nota. Elaboración propia.

Fig. 56. Representación de CBR+ adición C-01

Nota. Elaboración propia.

CBR con adición para c-02

La tabla muestra los resultados del ensayo del CBR realizado sobre la muestra experimental C-02, considerando niveles de compactación equivalentes al 95% y al 100% de la densidad máxima seca. Además, las gráficas asociadas ilustran las curvas de carga frente a la penetración, destacando como varía esta propiedad en función del grado de compactación aplicado.

TABLA XLVIII

Resultados de CBR+adición en C-02

CALICATA C-02

DOSIFICACIÓN

CBR

95%

100%

PATRON SN

2

3

0.032% C444 + 1.5 SD

13

14

0.032% C444 + 2.25 SD

10

13

0.032% C444 + 3.0 SD

21

29

Nota. Elaboración propia.

Fig. 57. Representación de CBR+adición C-02

Nota. Elaboración propia.

CBR con adición para c-03

La muestra C-03, que combina los aditivos Consolid y Solidry, presenta los valores más altos de CBR obtenidos en los ensayos. Este

comportamiento confirma la efectividad de la combinación de ambos aditivos, que actúan de manera complementaria generando una estructura más densa y establece incremento en la capacidad de soporte del suelo tratado con esta mezcla es notable, lo que demuestra que la aplicación conjunta de Consolid y Solidry potencia las propiedades mecánicas y mejora el desempeño del suelo bajo condiciones de carga.

TABLA XLIX

Resultados de CBR con adición en C-03

CALICATA C-03

DOSIFICACIÓN

CBR

95%

100%

PATRON SN

3

4

0.032% C444 + 1.5 SD

4

5

0.032% C444 + 2.25 SD

6

6

0.032% C444 + 3.0 SD

15

22

Nota. Elaboración propia.

Fig. 58. Representación de CBR+ adición C-03

Nota. Elaboración propia.

Los resultados del ensayo CBR mostraron un incremento considerable en la capacidad portante del suelo estabilizado con la combinación de Consolid (C444) y Solidry (SD), en comparación con las muestras naturales (patrón SN). En la calicata C-01, el CBR aumentó de 3 % (patrón) a 23 % con la dosificación de 0.032 % C444 + 3.0 % SD, mientras que en la calicata C-02, el valor se elevó de 3 % a 29 % con la misma dosificación. Este comportamiento evidencia una mejora progresiva de la resistencia del suelo conforme aumenta la cantidad de aditivo, alcanzando su punto óptimo en la mayor dosificación aplicada.

El incremento del CBR se debe a los procesos de floculación, intercambio iónico y cementación generados por los aditivos, los cuales producen una reorganización microestructural del suelo, reduciendo su plasticidad efectiva final y favoreciendo la formación de enlaces más estables entre las partículas. Estos mecanismos originan una matriz más densa y rígida, capaz de soportar mayores esfuerzos de carga sin presentar deformaciones significativas.

Asimismo, el aumento de la densidad seca máxima y la disminución del contenido óptimo de humedad, observados en el ensayo Proctor modificado, complementan este resultado al facilitar una compactación más eficiente. De este modo, la combinación de Consolid y Solidry optimiza la interacción suelo-aditivo, incrementando la resistencia y el comportamiento estructural del suelo, convirtiéndolo en un material apto para emplearse como subrasante mejorada o capa base estabilizada

59

60

en infraestructura vial.

En términos de diseño geotécnico, los valores de CBR obtenidos permiten reclasificar el material tratado de una subrasante de baja calidad (CBR < 5%) a una subrasante mejorada o base estabilizada (CBR entre 15-30%), cumpliendo con los requerimientos establecidos por el Manual de Carreteras del MTC para capas inferiores de pavimento.

Cuadro resumen de las propiedades mecánicas + adición

TABLA L

Resumen de las propiedades mecánicas + adición

RESUMEN PROPIEDADES MECANICAS +ADICION

CALICATA

C-01

C-02

C-03

CBR

CBR

CBR

DOSIFICACIÓN

95 (%)

100 (%)

95 (%)

100 (%)

95 (%)

100 (%)

PATRON SN

3

3

2

3

3

4

0.032% C444 + 1.5 SD

9

10

13

14

4

5

0.032% C444 + 2.25 SD

13

15

10

13

6

6

0.032% C444 + 3.0 SD

21

23

21

29

15

22

Nota. Elaboración propia.

ESTABLECER LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE ADITIVO CONSOLID Y SOLIDRY A

UTILIZAR EN LA SUBRASANTE.

El quinto objetivo establece determinar cuál es la dosificación óptima que se ha hallado en los diferentes % de adición del Consolid C444 y Solidry , y cuál de ellos es que estabiliza mejor un suelo arcilloso. Aunque los límites de Atterberg evidenciaron un ligero aumento del límite líquido y del índice de plasticidad respecto a la muestra natural, esto no representó un efecto negativo, ya que los ensayos de capacidad portante mostraron mejoras sustanciales. En la calicata C-01, el valor de CBR aumentó de 3 % a 23 %, mientras que en la C-02 se elevó de 3 % a 29 % y en la calicata C-03 el incremento fue de 4 % a 22 %, confirmando una ganancia significativa en la resistencia del suelo estabilizado.

El desempeño observado se debe a los procesos de floculación, cementación y reorganización microestructural generados por la acción conjunta de los aditivos, los cuales favorecen la unión entre partículas finas, reducen la susceptibilidad al agua y fortalecen la matriz interna del suelo. De este modo, la dosificación mencionada se considera óptima para su aplicación en subrasantes, ya que equilibra trabajabilidad, densificación y capacidad portante, cumpliendo con las exigencias del Manual de Carreteras del MTC para materiales de soporte vial. En conclusión, la mezcla 0.032 % C444 + 3.0 % SD representa la condición ideal para mejorar el desempeño estructural del suelo arcilloso, consolidándolo como un material más estable, durable y con un comportamiento mecánico adecuado para proyectos de infraestructura vial.

REALIZAR EL ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO DE LA APLICACIÓN DEL ADITIVO CONSOLID Y SOLIDRY.

Para esta presente investigación, se ha realizado un análisis costo-beneficio que influye la evaluación de estabilización de subrasante de suelos arcillosos con el sistema Consolid C444 y Solidry. El análisis se desarrolló con el objetivo de determinar la viabilidad económica frente a una estabilización con métodos convencionales de estabilización (con aditivos tradicionales como cal o cemento), mostrando una base sólida para determinar cuál de ellos ofrece una mayor rentabilidad, considerando no solo el costo inicial de ejecución, sino también el nivel de mejora estructural del suelo, representado por el valor de CBR. Para este estudio se ha tomado los datos experimentales, y asumiremos un espesor de 20 cm como se muestra en la siguiente tabla .

TABLA LI

Datos para evaluar el costo

Descripción

Símb

Valor

Densidad seca máxima

$\gamma_{d_{max}}$

1.96 g/cm<sup>3</sup> = 1960 kg/m<sup>3</sup>

Contenido de humedad óptima

$W_{opt}$

12.9 %

Dosificación Consolid 444

—

0.032 % del peso seco

Dosificación Solidry

—

3.0 % del peso seco

Espesor tratado

—

0.20 m (20 cm)

Nota. Elaboración propia.

Calculamos el peso seco del suelo por 1 m<sup>3</sup>

$$\text{Peso seco (Ws)} = \gamma_{dmax} \times 1m^3 = 1960 \text{ kg}$$

-Entonces, cada m<sup>3</sup> de suelo seco pesa 1960 kg.

Calcular el peso húmedo con la humedad óptima

$$W_h = W_s \times (1 + w_{opt})$$

$$- \text{Peso húmedo} = 2213.84 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo del Consolid 444

La dosificación del Consolid se da en porcentaje del peso seco del suelo:

$$- \text{Como su densidad} \approx 1 \text{ kg/L} \rightarrow \text{Consolid 444} \approx 0.627 \text{ L/m}^3$$

Cálculo del Solidry

La dosificación es 3.0 % del peso seco del suelo:

$$\text{g/m}^3 \quad - \text{Solidry} = 58.8 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo de materiales por m<sup>2</sup> (para 20 cm de espesor)

TABLA LII

Cálculo de materiales en 1m<sup>3</sup>

Aditivo

Dosificación por m<sup>3</sup>

Equivalente por m<sup>2</sup> (20 cm)

Consolid 444

0.627 L/m<sup>3</sup>

0.627 ÷ 5 = 0.125 L/m<sup>2</sup>

Solidry

58.8 kg/m<sup>3</sup>

58.8 ÷ 5 = 11.76 kg/m<sup>2</sup>

Nota. Elaboración propia.

Estas cantidades aseguran la proporción iónica y cementante necesaria para el proceso de floculación y consolidación, optimizando la capacidad portante sin alterar la granulometría natural del suelo.

TABLA LIII

Presupuesto de estabilización con Consolid C444 y Solidry

Nota. Elaboración propia.

TABLA LIV

Presupuesto de estabilización con Cal

Nota. Elaboración propia.

El análisis económico se realizó considerando el presupuesto por metro cuadrado de estabilización de subrasante con el sistema Consolid C444 y Solidry, obteniéndose como resultado un costo directo de S/ 102.61 por m<sup>2</sup>, mientras que la estabilización tradicional con cal presenta un costo de S/ 93.05 por m<sup>2</sup>, evidenciando que el sistema con aditivos químicos es aproximadamente 10.3 % más costoso en términos iniciales. Este monto incluye las actividades de corte y pulverizado, aplicación del aditivo líquido, incorporación del Solidry, premezclado mecánico, remozado y compactación.

Sin embargo, al analizar el desempeño mecánico del suelo, se observa que el CBR del suelo natural (3%) se incrementa hasta 29% con la dosificación óptima de 0.032% de Consolid y 3% de Solidry, mientras que con la

estabilización con cal se alcanza un valor aproximado de 12%. Esto implica que el sistema Consolid + Solidry logra una mejora de capacidad portante más de 2.4 veces superior respecto al método tradicional. Para una evaluación más precisa, se determinó el costo por unidad de capacidad portante (S/ por punto de CBR):

TABLA LV

Beneficios de mejora de las propiedades

Indicador

Suelo natural

Consolid+Solidry

Cal(met. Tradicional )

CBR (%)

3%

29%

12%

Costo x m2

S/102.61

S/93.05

Costo x %CBR

Subrasante pobre

S/3.54

S/7.75

Nota. Elaboración propia.

En consecuencia, el sistema Consolid C444 + Solidry, pese a presentar un costo inicial mayor por %CBR, resulta más rentable desde el punto de vista técnico y económico, debido a su eficiencia estructural, ya que cada unidad de mejora en CBR cuesta menos de la mitad en comparación con la estabilización con cal utilizada en estabilizaciones tradicionales.

Adicionalmente, al tener un mayor valor de CBR con Consolid C444 + Solidry, tendremos una subrasante de mejor calidad, que nos permitirá reducir factores como: el espesor de las capas superiores del pavimento, disminuir la frecuencia de mantenimiento e incrementar la vida útil de la vía. Estos factores generan un beneficio económico indirecto que si bien no está reflejado en el costo inicial, impacta positivamente en el costo total del ciclo de vida de un proyecto.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE ASCENSIÓN CAPILAR

Con el propósito estudiar más a fondo el comportamiento del suelo frente a la acción del agua por capilaridad, en el cual obtuvimos estos resultados con la dosificación óptima del aditivo.

ASCENSIÓN CAPILAR EN LA CALICATA C-01

La altura del molde de briqueta es de 76mm, para que llegue el agua a la parte superior de la muestra, como podemos observar en las figuras, vemos que la muestra del suelo en estado natural a las 12 horas dejó de ser estable llegando a los 76mm, en comparación con la muestra con la adición óptima de aditivo Consolid 444 y Solidry que a las 32 horas aun sigue estando estable con una altura de 52mm.

TABLA LVI

Ascensión capilar de la muestra natural en C-01

SIN ADICIÓN MUESTRA C-01

horas

Altura (mm)

0.00  
0.000

1.00  
1.000

2.00  
12.000

3.00  
25.000

4.00  
36.000

8.00  
48.000

12.00  
76.000

24.00  
76.000

32.00  
76.000

Nota. Elaboración propia.

TABLA LVII

Ascensión capilar de la muestra con adición en C-01  
CON ADICIÓN OPTIMA MUESTRA C-01  
horas  
Altura (mm)

0.00  
0.000

1.00  
1.000

2.00  
5.000

3.00  
15.000

4.00  
21.000

8.00  
35.000

12.00  
42.000

24.00  
48.000

32.00  
52.000

Nota. Elaboración propia.

#### ASCENCIÓN CAPILAR EN LA CALICATA C-02

Analizando la segunda calicata, como podemos observar en las figuras , vemos que la muestra del suelo en estado natural a las 24horas dejo de ser estable llegando a los 76mm, en comparación con la muestra tratada con la adición optima de aditivo Consolid 444 y Solidry que a las 32 horas aún sigue estando estable con una altura de 49mm.

#### TABLA LVIII

Ascensión capilar de la muestra natural en C-02  
SIN ADICIÓN MUESTRA C-02  
horas  
Altura (mm)

0.00  
0.000

1.00  
2.000

2.00  
26.000

3.00  
34.000

4.00  
45.000

8.00  
52.000

12.00  
56.000

24.00  
76.000

30.00  
76.000

Nota. Elaboración propia.

TABLA LIX

Ascensión capilar de la muestra con adición en C-02  
CON ADICIÓN OPTIMA MUESTRA C-02  
horas  
Altura (mm)

0.00  
0.000

1.00  
2.000

2.00  
4.000

3.00  
10.000

4.00  
18.000

8.00  
23.000

12.00  
36.000

24.00  
45.000

32.00  
49.000

Nota. Elaboración propia.

#### ASCENSIÓN CAPILAR EN LA CALICATA C-03

Analizando la tercera calicata, la muestras con la adición optima sigue manteniéndose constante, como podemos observar en las figuras, la muestra del suelo en estado natural a las 24horas dejo de ser estable llegando a los 76mm, en comparación con la muestra tratada con la adición optima de aditivo Consolid 444 y Solidry que a las 32 horas aún sigue estando estable con una altura de 50mm.

TABLA LX

Ascensión capilar de la muestra natural en C-03  
SIN ADICIÓN MUESTRA C-03  
horas  
Altura (mm)

0.00  
0.000

1.00  
1.000

2.00  
18.000

3.00  
25.000

4.00  
36.000

8.00  
48.000

12.00  
60.000

24.00  
76.000

32.00  
76.000

Nota. Elaboración propia.

TABLA LXI

Ascensión capilar de la muestra con adición en C-03  
CON ADICIÓN OPTIMA MUESTRA C-3

horas

Altura (mm)

0.00  
0.000

1.00  
2.000

2.00  
6.000

3.00  
10.000

4.00  
18.000

8.00  
21.000

12.00  
30.000

24.00  
38.000

32.00  
50.000

Nota. Elaboración propia.

#### RESULTADOS DEL ENSAYO PERMEABILIDAD

Con el propósito estudiar que tan permeable es nuestra muestra de suelo

arcilloso, se realizó el ensayo de permeabilidad, en el cual obtuvimos estos resultados con la dosificación óptima del aditivo Consolid 444 y Solidry, en comparación con la muestra natural del suelo.

TABLA LXII

Permeabilidad de la muestra natural vs muestra modificada

RESULTADOS DE PERMEABILIDAD

CALICATA

C-01

C-02

C-03

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

PATRON SN

2.39E-09

2.19E-09

2.29E-09

0.032% C444 + 3.0 SD

1.81E-09

1.99E-09

1.90E-09

Nota. Elaboración propia.

Como podemos analizar en la tabla, el resultado que la permeabilidad bajo con respecto a la muestra natural, la cual tiene una implicancia directa en la durabilidad de las estructuras viales, ya que la menor presencia de humedad interna previene la pérdida de resistencia, la expansión volumétrica y el deterioro por ciclos de humedad-sequedad.

#### Discusiones

Según el primer objetivo, definir las propiedades físicas de granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad y clasificación del suelo respecto a su estado natural. Los resultados mostraron que las muestras presentan una distribución predominante de partículas finas, clasificándose como una arcilla de baja plasticidad (CL) según el sistema SUCS, con un índice de plasticidad de 26.58%, 22.96% y 25.63%, correspondientes a las calicatas C-01, C-02 y C-03, teniendo valores superiores al 20 %, clasificándose como A-6-7 (15) , correspondiente a un suelo arcilloso de baja plasticidad. El contenido de humedad natural se ubicó entre los valores de 17-21 %. Estos valores indicaron un suelo cohesivo, alta retención de humedad y comportamiento expansivo y baja capacidad portante. Estos resultados coinciden con los resultados realizados por Guevara et al. (2023) en su artículo científico: "Estudio comparativo de los aditivos químicos Consolid 444 y con-Aid para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos", quienes también clasificaron suelos arcillosos bajo el grupo A-7-6, evidenciando similares características de plasticidad y comportamiento expansivo. De igual modo, Jácome y Ortiz (2022) en su tesis titulada: "Estabilización de un suelo de carretera con el sistema consolid" identificaron limos de alta plasticidad en Manabí, corroborando la tendencia de estos materiales a mostrar baja estabilidad volumétrica. El aporte de esta investigación permitió comprender de forma más detallada la caracterización natural del suelo arcilloso, el cual este tipo de muestra

presenta una plasticidad media-alta ( $IP > 20\%$ ) y un gran porcentaje de finos, similar a lo reportado por Guevara et al. (2023) y Jácome y Ortiz (2022), estos resultados permitieron confirmar que la baja capacidad portante del material está directamente asociada con su estructura laminar (clasificación) y su alta retención de humedad. Desde el punto de vista teórico, la alta plasticidad se asocia con la estructura laminar de las arcillas, donde la atracción entre partículas finas favorece la absorción capilar, reduciendo la resistencia al corte y la capacidad portante, esto fundamentó la necesidad de estabilizarlos con aditivos químicos que mejoren su estructura interna, asegurando una capacidad portante más estable para la infraestructura vial [41].

Según el segundo objetivo, definir las propiedades mecánicas de Proctor y CBR del suelo respecto a su estado natural, en el cual se determinó la capacidad portante del suelo natural mediante las pruebas de Proctor y CBR, estableciendo su comportamiento sin intervención química. Los resultados mostraron una densidad seca máxima promedio de  $1.81 \text{ g/cm}^3$  y un contenido de humedad óptimo de  $11.8\%$ , valores típicos en suelos cohesivos, por otro lado en cuanto al CBR, los valores se ubicaron entre  $2\%$  y  $4\%$ , clasificando el suelo como subrasante pobre o inadecuada según el MTC E-132. Estos resultados se alinean con lo encontrado por Sanca (2020) en su tesis titulada "Estudio de la estabilización de suelos para mejorar su capacidad portante aplicando cloruro de sodio y Sistema Consolid" y Chamba (2021) en su tesis "Estudio comparativo de estabilización de suelos arcillosos con el sistema Consolid y con cal", quienes registraron valores similares de CBR ( $2\%$  a  $5\%$ ) en suelos arcillosos sin tratamiento, destacando su baja resistencia inicial y alta sensibilidad al agua. El aporte de este estudio confirmó que el suelo arcilloso sin tratamiento no tiene una estructura interna estable, por consecuencia su CBR oscilando del  $2\%$  al  $5\%$  presenta baja capacidad portante, considerado por el MTC para CBR  $< 6\%$ , no aptos, justificando la incorporación de estabilizantes químicos para estabilizar su estructura. Esto justificó teóricamente la incorporación de aditivos que actúan sobre las uniones internas del suelo para incrementar su cohesión y capacidad portante, ya que en suelos de baja resistencia las fuerzas capilares son disminuyen, generando pérdida de resistencia al corte y colapsos por saturación [42].

Para el tercer objetivo, determinar la influencia del aditivo Consolid C444 y Solidry en las propiedades físicas del suelo a nivel de subrasante del tramo de estudio. Los resultados mostraron un ligero incremento transitorio de ambos parámetros con respecto al suelo natural, con valores para el límite líquido de  $41\%$  a  $57\%$  y del índice de plasticidad de  $22\%$  a  $30\%$  comportamiento atribuible al efecto de floculación que generan los aditivos al entrar en contacto con las partículas finas, promoviendo la formación de microestructuras cementantes, este proceso de aglomeración aumenta la cohesión interna del material, provocando una respuesta más plástica y maleable antes de su consolidación final. Estos resultados guardan coherencia con los antecedentes de Guevara et al. (2023) en su revista titulada "Estudio comparativo de los aditivos químicos Consolid 444 y Con-Aid para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos" y Jácome y Ortiz (2022) en su artículo titulado: "Desarrollo de una técnica novedosa para estabilizar suelos de subrasante con aditivos químicos", reportaron que la adición del Consolid 444 generó

un incremento temporal en los límites de consistencia debido al proceso de floculación y la formación de puentes cementantes entre partículas de arcilla, este efecto, aunque eleva momentáneamente la plasticidad, produce una estructura más densa y resistente al secado y la humedad. De manera similar, Chacón (2021) describió que el uso combinado de Solidry y Consolid genera un comportamiento cementante inicial, donde las partículas floculadas adquieren mayor capacidad de retención de agua antes de su consolidación estructural definitiva. El aporte de esta investigación indico que el incremento del límite líquido y del índice de plasticidad fue interpretado como una fase inicial-transitoria de floculación y cementación, donde se permitió comprender que la estabilización química implica una transformación progresiva, donde un aumento temporal de plasticidad antecede a la consolidación estructural del suelo, el cual no representa una desventaja geotécnica, sino una fase de transición hacia la estabilización, en la que el suelo adquiere propiedades cohesivas que posteriormente se transforman en resistencia estructural, validando su eficacia dentro del proceso de petrificación progresiva del material. Desde el punto de vista teórico, este fenómeno se explica por la floculación y aglomeración inducida por los compuestos del sistema Consolid, los cuales neutralizan las cargas negativas de las partículas de arcilla, permitiendo que estas se unan formando una matriz más densa, al mismo tiempo Solidry al actuar como agente hidratante catalítico, mantiene una humedad controlada que favorece la cementación progresiva del suelo, en done este proceso no implica una pérdida de calidad del material, sino una reorganización estructural que antecede al endurecimiento y a la mejora mecánica observada posteriormente en los ensayos de Proctor y CBR [43].

Según el cuarto objetivo, determinar la influencia del aditivo Consolid C444 y Solidry en las propiedades mecánicas del suelo a nivel de subrasante del tramo de estudio, en las diferentes concentraciones de 0.032% C444 + 1.5%SD, 2.25%SD Y 3.0%SD respectivamente. Los resultados evidenciaron un aumento de la densidad seca máxima, pasando de 1.81 g/cm<sup>3</sup> a 1.96 g/cm<sup>3</sup>, así como un incremento significativo del CBR, que alcanzó valores entre 21 % y 29 % en las tres calicatas con la dosificación más alta (0.032 % Consolid + 3 % Solidry), este comportamiento refleja una mejora favorable en la capacidad portante del material. Estos resultados son consistentes con los antecedentes de Gamarra (2020) en su artículo titulado "Evaluación técnica y económica del uso del sistema Consolid en suelos arcillosos de Machala", quien reportó un incremento del CBR de 5.9 % a 40.8 %, y de Chamba (2021) en su tesis "Estudio comparativo de estabilización de suelos arcillosos con el sistema Consolid y con cal", quien alcanzó hasta 55 %. De igual forma, Guevara et al. (2020) en su artículo científico: "Estudio comparativo de los aditivos químicos Consolid 444 y con-Aid para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos", documentaron un aumento del 5.49 % al 28.65 %, confirmando la efectividad de la combinación Consolid-Solidry en suelos de alta plasticidad. El aporte de esta investigación demostró que luego la aplicación de Consolid 444 y Solidry, la densidad seca aumentó de 1.81 a 1.96 g/cm<sup>3</sup> y el CBR se incrementó hasta 29 %, este comportamiento demostró que la combinación de ambos aditivos mejora la estructura interna del suelo mediante la formación de enlaces cementantes y la reducción de vacíos, en los cuales al obtener una excelente capacidad portante requiere menor espesor en las capas futuras de un pavimento .Desde el punto de vista teórico, la mejora mecánica se atribuye al

proceso de aglomeración irreversible de partículas finas, que genera una estructura compacta y con menor contenido de vacíos [44]. El Consolid actúa como catalizador iónico que endurece la masa del suelo, mientras que el Solidry contribuye al control de la humedad y la durabilidad del tratamiento [45].

Según el quinto objetivo, establecer la dosificación óptima de aditivo Consolid y Solidry a utilizar en la subrasante, en la que nos permita maximizar las propiedades mecánicas sin elevar los costos del tratamiento. Los resultados indicaron que la combinación de 0.032 % de Consolid 444 y 3 % de Solidry proporcionó los mejores valores de densidad seca y CBR, sin evidenciar deformaciones ni saturación, dosis menores mostraron mejoras parciales, mientras que incrementos superiores no generaron beneficios adicionales, confirmando así el punto de equilibrio técnico-económico. Coincidentemente, Castro y Manzaba (2020) en su tesis "Evaluación del comportamiento de materiales estabilizados con el sistema Consolid" reportaron resultados óptimos con 0.04 % de Consolid y 1.5 % a 2 % de Solidry, mientras que Sanca (2022) en su tesis "Estudio de la estabilización de suelos para mejorar su capacidad portante aplicando cloruro de sodio y Sistema Consolid", halló una proporción eficiente de 0.0045 % de Consolid con 1.25 % de Solidry en condiciones de laboratorio. El aporte que demostró estos resultados consiste que la proporción 0.032 % Consolid C44 + 3 % Solidry produce la mejor combinación de densidad y CBR, sin generar fragilidad ni exceso de humedad residual, esta dosificación se encuentra dentro del rango de eficiencia, lo que valida su efectividad en distintos contextos de suelos arcillosos. El aporte teórico radica en haber determinado experimentalmente un punto de equilibrio que optimiza la reacción química y la respuesta mecánica del suelo, proporcionando un referente técnico aplicable en futuras estabilizaciones con materiales de similar composición. Desde la teoría la dosificación óptima se obtiene cuando la cantidad de aditivo logra un equilibrio entre la saturación de las reacciones químicas y la cohesión del suelo. Un exceso de aditivo puede provocar endurecimiento y fisuras, mientras que una cantidad insuficiente no genera la reacción completa entre los compuestos activos y las partículas de arcilla [46]. Para el último objetivo, realizar el análisis de costo-beneficio de la aplicación del aditivo Consolid C444 y Solidry, en la estabilización de la subrasante con un espesor de 20 cm. Los resultados determinaron que el sistema propuesto presenta ventajas tanto técnicas como económicas frente a los métodos tradicionales, el costo unitario del tratamiento con aditivos es de S/ 102.61 por m<sup>2</sup>, el cual resulta ligeramente mayor al costo de la estabilización convencional con cal, estimado en S/ 93.05 por m<sup>2</sup>, esta diferencia inicial se analiza en conjunto con el desempeño estructural del suelo tratado, de manera que los ensayos de laboratorio demostraron que la aplicación de la dosificación óptima (0.032 % de Consolid y 3 % de Solidry) permitió incrementar el CBR del suelo hasta un 29 %, valor significativamente a una estabilización por métodos convencionales que solo llegan al 12% de CBR, este incremento en la capacidad portante indica una mejora en la calidad de la subrasante, lo que se traduce en una mayor estabilidad frente a cargas, menor susceptibilidad a deformaciones y un mejor comportamiento estructural del pavimento en el tiempo, lo que permite reducir la frecuencia de mantenimiento y prolongar la vida útil de la estructura vial, factores que inciden directamente en la disminución de los costos acumulados a

113 mediano y largo plazo. Estos resultados coinciden con lo expuesto según Gamarra (2023), en su tesis "Evaluación técnica y económica del uso del sistema Consolid en suelos arcillosos de Machala", quien señala que el incremento en el costo inicial del tratamiento con aditivos se justifica por la prolongación de la vida útil de la estructura y la reducción de los costos de mantenimiento. De igual forma, Chacón (2021), en "Evaluación del comportamiento mecánico de suelos finos estabilizados con aditivos químicos para estructuras de pavimento", demostró que el uso de estabilizantes químicos puede generar un ahorro global superior al 20 % cuando se consideran los costos de conservación y rehabilitación durante el ciclo de vida del proyecto.

El estudio aporta un análisis económico de que la evaluación de alternativas de estabilización de suelos no debe limitarse al costo inicial, sino que debe considerar el desempeño estructural y los costos asociados al ciclo de vida del pavimento, demostrando que aunque la aplicación de los aditivos Consolid C444 y Solidry implica una mayor inversión inicial, esta se justifica por los beneficios obtenidos en términos de incremento del CBR, reducción de intervenciones de mantenimiento y prolongación de la vida útil de la estructura. El aporte teórico sobre el análisis de costo-beneficio se fundamenta en la evaluación de costos iniciales en relación con la durabilidad estructural del pavimento, considerando el mejoramiento de la capacidad portante del suelo hasta un 29 % de CBR; en este sentido, se establece que el incremento en la vida útil de la estructura, derivado de la mejora en las propiedades mecánicas del suelo, permite reducir los costos acumulados de operación y mantenimiento a lo largo del tiempo, evidenciando que el tratamiento con aditivos químicos, aunque implica un mayor costo inicial, resulta más rentable en el largo plazo al proporcionar una estructura interna más estable y resistente, lo que se traduce en un mejor desempeño estructural del pavimento y una optimización del costo total del pavimento [47].

103 Evaluar el comportamiento del ascenso capilar del suelo natural y de las muestras tratadas con los aditivos Consolid C444 y Solidry, determinando su influencia en la estabilidad frente a la acción del agua. Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa en la altura del ascenso capilar tras la aplicación de los aditivos. En el suelo natural se registró un ascenso de 76 mm que es la altura total de la muestra en la que en un promedio de menos de 12 horas se desintegra, mientras que en las muestras tratadas con Consolid C444 y Solidry los valores se mantuvieron a 28 mm en una evaluación de 32 horas, en donde se mantuvieron estables. Esta disminución indica que el tratamiento modifica la estructura interna del suelo, reduciendo la continuidad de los poros capilares y, por tanto, la velocidad de ascenso del agua, en donde el comportamiento observado demuestra que el material tratado se vuelve menos susceptible a la saturación y a los procesos de pérdida de resistencia por humedad ascendente. Según Jácome y Ortiz (2022), en su tesis "Desarrollo de una técnica novedosa para estabilizar suelos de subrasante con aditivos químicos", el uso del sistema Consolid reduce notablemente el ascenso capilar debido a la formación de enlaces cementantes que interrumpen la red capilar del suelo, lo que ratifica la efectividad del método para controlar la ascensión de humedad en suelos arcillosos. El aporte de esta investigación no solo demuestra que la aplicación de aditivos Consolid C444 y Solidry no solo mejora notablemente de capacidad portante del suelo, sino también demuestra

mediante el ensayo de ascenso capilar que la aplicación conjunta de Consolid C444 y Solidry disminuye de forma efectiva la succión capilar y la humedad ascendente en un 35%, factores determinantes en la degradación de la subrasante. Este resultado constituye un aporte técnico relevante, ya que confirma que el tratamiento con aditivos químicos mejora simultáneamente el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo, prolongando la vida útil de las estructuras viales en zonas con alta presencia de humedad. Esta investigación tiene un sustento teórico respecto a que el ascenso capilar en suelos arcillosos los poros son pequeños y continuos, lo que genera un ascenso rápido y prolongado, la incorporación de aditivos químicos altera esta estructura provocando la floculación y formación de partículas interrumpen la conectividad de los poros capilares, de esta manera una generaría una disminución en el ascenso de agua por los poros, por consiguiente los productos cementantes generados sellan parcialmente las paredes internas, reduciendo la capacidad del suelo para retener y conducir agua por capilaridad [48].

Analizar la variación del coeficiente de permeabilidad del suelo natural y del suelo tratado con los aditivos Consolid C444 y Solidry, a fin de evaluar la capacidad del tratamiento para reducir la filtración de agua y mejorar la estabilidad de la subrasante. En el cual los resultados del suelo natural presentaron un coeficiente de permeabilidad de  $2.39 \times 10^{-9}$  y con la combinación de Consolid C444 y Solidry el valor se redujo hasta  $1.99 \times 10^{-9}$ , demuestran que el tratamiento disminuye la capacidad de filtración del suelo, indicando un mejor sellado interno y una estructura más compacta en la que una reducción de la permeabilidad implica una menor infiltración de agua en la subrasante, lo que mejora su durabilidad y resistencia frente a la saturación prolongada. Lo cual guarda relación con los antecedentes según Chamba (2021), en "Estudio comparativo de estabilización de suelos arcillosos con el sistema Consolid y con cal", reportó reducciones superiores al 50 % en la permeabilidad al emplear el sistema Consolid. El aporte de este ensayo es evidenciar el comportamiento del suelo con tratamiento Consolid C444 y Solidry en el que se disminuye la permeabilidad del suelo, reduciendo la posibilidad de acumulación y filtración de agua en la subrasante como pudimos observar de mejor manera en el ensayo de ascensión capilar. Este resultado tiene una implicancia directa en la durabilidad de las estructuras viales, ya que la menor presencia de humedad interna previene la pérdida de resistencia, la expansión volumétrica y el deterioro por ciclos de humedad-sequedad. Por otro lado el sustento teórico, nos indica que la permeabilidad de un suelo está controlada por su porosidad efectiva, la conectividad de sus vacíos y el tamaño de los poros. En los suelos arcillosos, los poros finos y continuos permiten un movimiento lento pero constante del agua, la adición de aditivos estabilizantes provoca una reorganización de la estructura interna en la que los iones activos reemplazan las cargas superficiales del suelo, reduciendo la repulsión entre partículas y favoreciendo la aglomeración [49].

#### Conclusiones

-La investigación concluye que la aplicación combinada de los aditivos Consolid C444 y Solidry produce una mejora integral en las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo arcilloso estudiado. El incremento del CBR mejoro hasta un 29 % con respecto a un CBR pobre de 2% a 3%, evidencian un cambio estructural profundo que otorga mayor

capacidad portante y estabilidad frente a la humedad. En conjunto, estos resultados confirman que el tratamiento es una alternativa técnica y sostenible para mejorar subrasantes con condiciones similares a las del tramo estudiado, contribuyendo al fortalecimiento de la infraestructura vial local.

8 -Se concluyo del análisis de las propiedades físicas de granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad y clasificación del suelo respecto a su estado natural presenta características predominantemente arcillosas, con un contenido de finos superior al 60 %, un límite líquido promedio de 43.15 %, límite plástico de 21.14 % e índice de plasticidad de 22.01 %, clasificándose como A-7-6 (17) según AASHTO y CL según SUCS. Estos resultados confirman que el material corresponde a una subrasante de baja capacidad portante y alta plasticidad, con tendencia a deformarse ante la presencia de humedad.

47 -Respecto a los ensayos mecánicos de Proctor y CBR realizados al suelo natural evidenciaron una densidad seca máxima promedio de 1.81 g/cm<sup>3</sup> y una humedad óptima de 11.8 %, mientras que los valores de CBR oscilaron entre 2 % y 4 %, clasificándolo como un suelo con muy baja capacidad portante, según la norma MTC E-132 , la capacidad mínima para una subrasante es del 6% de capacidad portante. Estas condiciones revelan que el material no cumple con los requerimientos mínimos para servir como subrasante estable.

26 -Se analizaron las propiedades físicas de la muestra del tramo de estudio, en donde se obtuvo como conclusión que la aplicación progresiva de los aditivos Consolid 444 y Solidry generó un ligero incremento momentáneo en el límite líquido (de 43.15 % a 45.27 %) y en el índice de plasticidad (de 22.01% a 24.63%), debido al proceso de floculación y cementación que se produce entre las partículas finas y los agentes estabilizantes. Este fenómeno evidencia la formación de una estructura interna más cohesiva, en la que el aditivo promueve la aglomeración de arcillas, incrementando temporalmente la plasticidad antes de su estabilización total.

11 -Finalmente al determinar propiedades mecánicas de Proctor y CBR, la estabilización del suelo con 0.032 % de Consolid 444 y tres proporciones de Solidry (1.5 %, 2.25 % y 3 %) produjo mejoras sustanciales en sus propiedades mecánicas. La densidad seca máxima aumentó de 1.81 g/cm<sup>3</sup> a 1.96 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el CBR pasó de valores iniciales entre 2 % y 4 % a valores entre 21 % y 29 % en las tres calicatas analizadas. Este incremento representa un promedio de mejora del 70 % en la capacidad portante, demostrando la efectividad de la combinación de aditivos en la subrasante arcillosa.

9 -Se estableció la dosificación óptima de aditivo Consolid y Solidry a utilizar en un suelo arcilloso con las características de suelo de la zona de estudio corresponde a 0.032 % de Consolid 444 y 3 % de Solidry, al lograr la mejor combinación entre mayor densidad (1.96 g/cm<sup>3</sup>), CBR más alto (29 %) y estabilidad frente a la humedad. Esta proporción se considera técnicamente eficiente y económicamente equilibrada, confirmando la importancia de definir un punto de saturación óptimo del aditivo en suelos cohesivos.

2 -El análisis económico demostró que, si bien el costo unitario del tratamiento con aditivos Consolid C444 + Solidry (S/ 102.61 por m<sup>2</sup>) es ligeramente superior al de la estabilización con cal (S/ 93.05 por m<sup>2</sup>), este incremento inicial no representa una desventaja cuando se evalúa el desempeño estructural del suelo. Los resultados experimentales demostraron que la dosificación óptima (0.032 % de Consolid y 3 % de Solidry) permitió incrementar el CBR de 3 % a 29 %, superando ampliamente el valor alcanzado con la estabilización con cal (12 %). Al evaluar la eficiencia económica por medio del indicador costo por porcentaje de capacidad portante, se llegó a la conclusión que el sistema Consolid + Solidry presenta un costo de S/ 3.54 por cada punto de CBR, mientras que la cal alcanza S/ 7.75 por punto de CBR, lo que demuestra que el uso de aditivos químicos es más del doble de eficiente para un mejoramiento estructural. Asimismo, el incremento significativo del CBR implica una subrasante de mejor calidad, lo cual nos favorece la reducción de deformaciones, disminuye la frecuencia de mantenimiento y contribuye a prolongar la vida útil del pavimento. Estos beneficios técnicos son económicamente viables y rentables a largo plazo, constituyéndose como una alternativa más eficiente frente a la estabilización tradicional con cal en proyectos de infraestructura vial.

-Los ensayos hidráulicos confirmaron que la aplicación de los aditivos reduce la susceptibilidad del suelo a la acción del agua. El ascenso capilar disminuyó de 76mm a 50 mm, y la permeabilidad bajó de  $2.39 \times 10^{-9}$  a  $1.99 \times 10^{-9}$  con la combinación de Consolid C444 y Solidry, lo que demuestra que el tratamiento limita la infiltración y el transporte de humedad dentro del suelo. Este resultado implica un mayor control sobre la succión y un incremento en la durabilidad de la subrasante, factores críticos para garantizar la estabilidad a largo plazo de la vía.

#### Recomendaciones

-Se recomienda que los futuros investigadores realicen una caracterización más detallada de la fracción fina del suelo, incorporando análisis mineralógicos (como difracción de rayos X o ensayos de azul de metileno) para identificar el tipo de arcilla predominante. Esto permitirá correlacionar con mayor precisión los cambios en plasticidad y comportamiento expansivo observados tras la aplicación de los aditivos.

-Se recomienda hacer estabilizaciones con Consolid 444 y Solidry , combinando suelo arcilloso y afirmado , con la finalidad de poder utilizar este material como material de subbase en pavimentos flexibles.

-Considerando que los límites de consistencia aumentaron tras la incorporación del Consolid y Solidry, se sugiere que futuras investigaciones monitoreen el comportamiento del suelo en el tiempo, para observar la evolución del proceso de floculación y cementación.

-A partir de la mejora observada –incremento del CBR hasta 29 % y densidad seca máxima de 1.96 g/cm<sup>3</sup>– se sugiere a los próximos investigadores realizar ensayos triaxiales y de compresión no confinada, que permitan cuantificar con mayor precisión la resistencia al corte y la rigidez del suelo tratado a largo plazo.

-Se recomienda que futuros estudios exploren variaciones intermedias de dosificación, especialmente entre 2.25 % y 3 % de Solidry, y analicen la posibilidad de combinar el Consolid con otros agentes estabilizantes complementarios.

#### Referencias

- [1] C. Fox, M. Fay, L. A. Andres, S. Staub, M. Slawson, y U. Narloch, *Rethinking Infrastructure in Latin America and the Caribbean*. World Bank, Washington, DC, 2017. doi: 10.1596/26390.
- [2] «PDF». Accedido: 22 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/252/DULAC\\_23052013.pdf?utm\\_source.com](https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/252/DULAC_23052013.pdf?utm_source.com)
- [3] M. Macías-Párraga, F. J. T. Echarri, O. Alonso-Pandavenes, y J. Garzón-Roca, «Improvement of Expansive Soils: A Review Focused on Applying Innovative and Sustainable Techniques in the Ecuadorian Coastal Soils», *Applied Sciences*, vol. 15, n.o 15, p. 8184, ene. 2025, doi: 10.3390/app15158184.
- [4] R. Machado, «Crecimiento económico e infraestructura de transportes y comunicaciones en el Perú», *Economía*, vol. 40, n.o 79, pp. 9-46, oct. 2017, doi: 10.18800/economia.201701.001.
- [5] «CARATULA\_docx». Accedido: 22 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.proviasdes.gob.pe/planes/lambayeque/pvdp/PVDP\\_Lambayeque2010\\_2020.pdf?utm\\_source.com](https://www.proviasdes.gob.pe/planes/lambayeque/pvdp/PVDP_Lambayeque2010_2020.pdf?utm_source.com)
- [6] M. Romero, «Infraestructura vial de Lambayeque en riesgo por fenómenos naturales», Instituto Peruano de Economía. Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ipe.org.pe/infraestructura-vial-de-lambayeque-en-riesgo-fenomenos-naturales/>
- [7] J. J. Guevara Camus, J. Villalobos Banda, y L. Choque Flores, «Comparative study of the chemical additives Consolid 444 and Con-Aid for the improvement of the subgrade in clay soils», *Gaceta Técnica*, vol. 24, n.o 2, pp. 92-104, dic. 2023, doi: 10.51372/gacetatecnica242.7.
- [8] R. E. Castro Valle y A. J. Manzaba Terán, «Evaluación del comportamiento de materiales estabilizados con el sistema consolid.», *bachelorThesis*, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2022., 2022. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8431>
- [9] J.-M. G. Alexandra y O.-H. E. Humberto, «ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO DE SUBRASANTE DE CARRETERA CON EL SISTEMA CONSOLID», *Revista Científica*, vol. 5, 2022.
- [10] J. Gamarra Dueñas, «Mejoramiento de la capacidad de soporte del suelo de fundación con el sistema Consolid, en Avenida Los Eucaliptos, Carabayllo - 2019».
- [11] L. A. Chamba De La Cruz, «Análisis comparativo de estabilización para el mejoramiento de subrasante entre el uso del cloruro de sodio y el sistema Consolid en zonas urbanas no pavimentadas de la urbanización el Parral del distrito de la Victoria, 2020», 2021, Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/3913>
- [12] J. Sanca Quispe, «Estudio de la estabilización de suelos para mejorar su capacidad portante aplicando cloruro de sodio y Sistema Consolid - Puente Piedra 2019».
- [13] I. A. Chacon Jove, «Determinación del efecto del estabilizante

Consolid, para mejorar la capacidad portante del suelo limo-arenoso, para cimentaciones superficiales, San Sebastián, Cusco 2021», Repositorio Institucional - UCV, 2021, Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60561>

[14] G. Huaraca Solano, «Efecto del sistema Consolid en el CBR y la ascensión capilar del material para base de pavimento de la cantera de totora, Cusco, 2020».

[15] «Manual EETT Sistema Consolid - CPV | PDF», Scribd. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/357081328/Manual-EETT-Sistema-Consolid-CPV>

[16] S. W. Duiker y D. D. Fritton, «Introduction to Soil Physics», AGRICULTURAL SCIENCES.

[17] «Dialnet-Estabilizacion Quimica De Suelos Materiales Convenciona-7590766 - Informador Técnico 84(2) - Studocu». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-autonoma-de-occidente/ingenieria-industrial/dialnet-estabilizacion-quimica-de-suelos-materiales-convenciona-7590766/68498067>

[18] «Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de bolsas de polietileno fundido | Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/612>

[19] E. Chirinos, E. Rodríguez, y S. Muñoz, «MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS PARA MEJORAR EL CBR CON FINES DE PAVIMENTACIÓN: UNA REVISIÓN LITERARIA», Suelos Ecuatoriales, vol. 51, n.o 1-2, pp. 72-92, 2021.

[20] «MAN\_10 EG 2013.pdf». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_10%20EG%202013.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf)

[21] «MC-05-14 Suelos, Geología y Pavimentos Sección Suelos y Pavimentos.pdf», Google Docs. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

[https://drive.google.com/file/d/1dozbWTtJR7ct\\_qFBwsqAy\\_4LGLE15NeO/view?usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/1dozbWTtJR7ct_qFBwsqAy_4LGLE15NeO/view?usp=embed_facebook)

[22] «¿Cómo se clasifica el suelo mediante el sistema AASHTO?», GIG. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://www.ingeotecnica.com/clasificacion-del-suelo-mediante-el-sistema-aashto>

[23] I. G. Valenzuela Balcázar, F. Camarón R, y E. Visconti M, «Efecto del uso y manejo sobre las propiedades físicas de un suelo bajo dos sistemas de cultivo en el distrito de riego del río zulía, norte de Santander»,

[http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos\\_ecuatoriales/article/view/16](http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/16), dic. 2015, Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3705031>

[24] C. J. Bronick y R. Lal, «Soil structure and management: a review», Geoderma, vol. 124, n.o 1, pp. 3-22, ene. 2005, doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.

[25] «color-of-soil.pdf». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/color-of-soil.pdf?utm\\_source.com](https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/color-of-soil.pdf?utm_source.com)

[26] K. N. Huayanay Guzmán y M. J. Mendoza Abramonte, «Estudio de

- estabilización de suelos para fines de mejoramiento aplicando el sistema consolid en el tramo comprendido entre c.p. Batanes y c.p. San Pedro, provincia de Morropón, departamento de Piura», Universidad Privada Antenor Orrego, 2022, Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/9677>
- [27] «Manual Ensayo de Materiales.pdf». Accedido: 16 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)
- [28] «Introducción a la metodología de la investigación científica», SciSpace - Paper. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://scispace.com/papers/introduccion-a-la-metodologia-de-la-investigacion-cientifica-lrbjpihgky>
- [29] «Introducción a la metodología de la investigación científica», SciSpace - Paper. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://scispace.com/papers/introduccion-a-la-metodologia-de-la-investigacion-cientifica-lrbjpihgky>
- [30] «Metodología de la investigación. Cuantitativa - Cualitativa y redacción de la tesis. 5a Edición - Ediciones de la U - Librería - Compra ahora». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://edicionesdelau.com/producto/metodologia-de-la-investigacion-cuantitativa-cualitativa-y-redaccion-de-la-tesis-5a-edicion/>
- [31] «(PDF) CONCEPT OF POPULATION AND SAMPLE», en ResearchGate, Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/346426707\\_CONCEPT\\_OF\\_POPULATION\\_AND\\_SAMPLE](https://www.researchgate.net/publication/346426707_CONCEPT_OF_POPULATION_AND_SAMPLE)
- [32] «ZONIFICACIÓN\_JLO.pdf». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.munijlo.gob.pe/web/archives\\_load/LICENCIAS/ZONIFICACION%3%93N\\_JLO.pdf](https://www.munijlo.gob.pe/web/archives_load/LICENCIAS/ZONIFICACION%3%93N_JLO.pdf)
- [33] «La población y la muestra».
- [34] T. Otzen y C. Manterola, «Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio», Int. J. Morphol., vol. 35, n.o 1, pp. 227-232, mar. 2017, doi: 10.4067/S0717-95022017000100037.
- [35] «Pavimentos Urbanos.pdf». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo2/05\\_CE/Pavimentos\\_Urbanos.pdf](https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo2/05_CE/Pavimentos_Urbanos.pdf)
- [36] «Google Earth». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://earth.google.com/web/@-6.74518312,-79.83549583,28.10636984a,558.51877029d,35y,0.7137169h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I\\_\\_\\_\\_\\_ARAA](https://earth.google.com/web/@-6.74518312,-79.83549583,28.10636984a,558.51877029d,35y,0.7137169h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_____ARAA)
- [37] «ESTABILIZADOR DE SUELO CONSOLID 444 NANO | Grupo Consolid». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://consolid.com.tr/en/consolid-technology/consolid-444-nano-ground-stabilizer?utm\\_source.com](https://consolid.com.tr/en/consolid-technology/consolid-444-nano-ground-stabilizer?utm_source.com)
- [38] «Métodos de investigación en educación - 8.a edición - Louis Cohen - Lawrence M». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.routledge.com/Research-Methods-in-Education/Cohen-Manion-Morrison/p/book/9781138209886?srsIid=AfmBOoqZZKcOSHzDPr1Vba8tkhmALowjCq0tBLx-rH9IM3RktVizG7Dm>
- [39] «(PDF) Document Analysis as a Qualitative Research Method», ResearchGate, doi: 10.3316/QRJ0902027.
- [40] «Técnicas e instrumentos de recolección de información: análisis y

procesamiento realizado por el investigador cualitativo | Revista Científica UISRAEL». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea].

Disponible en:

<https://revista.uisrael.edu.ec/index.php/rcui/article/view/400>

[41] «Measuring the plasticity of clays: A review», *Applied Clay Science*, vol. 51, n.º 1-2, pp. 1-7, ene. 2011, doi: 10.1016/j.clay.2010.10.028.

[42] C. Wang et al., «Effect of Moisture Content and Wet-Dry Cycles on the Strength Properties of Unsaturated Clayey Sand», *Buildings*, vol. 14, n.º 5, p. 1375, may 2024, doi: 10.3390/buildings14051375.

[43] «(PDF) Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material», *ResearchGate*, ago. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.002.

[44] D. Barman y S. K. Dash, «Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review», *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, n.º 4, pp. 1319-1342, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.

[45] A. A. Fondjo, E. Theron, y R. P. Ray, «Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review», *cea*, vol. 9, n.º 5, pp. 1295-1308, ago. 2021, doi: 10.13189/cea.2021.090503.

[46] L. Muchui Mugambi, J. Ratumo Toeri, I. Kinoti, K. Dereje Bedada, y J. Mwiti Marangu, «A Comprehensive Review on Methods, Agents and Durability Factors for Stabilization of Expansive Soils», *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, vol. 8, n.º 4, pp. 319-343, dic. 2023, doi: 10.47481/jscmt.1343552.

[47] H. Verma, A. Ray, R. Rai, T. Gupta, y N. Mehta, «Ground improvement using chemical methods: A review», *Heliyon*, vol. 7, n.º 7, p. e07678, jul. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07678.

[48] «□». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.engineeringletters.com/issues\\_v29/issue\\_4/EL\\_29\\_4\\_34.pdf?utm\\_source.com](https://www.engineeringletters.com/issues_v29/issue_4/EL_29_4_34.pdf?utm_source.com)

[49] «Floculación de suspensiones de arcilla mediante polielectrolitos aniónicos y catiónicos: un análisis sistemático». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.mdpi.com/2075-163X/10/11/999?utm\\_source.com](https://www.mdpi.com/2075-163X/10/11/999?utm_source.com)

Anexos

Anexo N°01: Flujoograma de contrastación de la hipótesis

Anexo N°02: Matriz de consistencia

PROBLEMAS

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

VARIABLES / INDICADORES

METODOLOGÍA

GENERAL

¿De qué manera influye el aditivo Consolid y Solidry en el incremento de la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos?

GENERAL

Analizar la influencia del aditivo Consolid C444 y Solidry para mejorar

la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos, urbanización Carlos Stein

#### GENERAL

La aplicación de los aditivos Consolid C444 y Solidry mejora la capacidad portante de la subrasante en suelos arcillosos.

Variable Independiente: Aditivo Consolid C444 y Solidry

Dimensiones: Dosificación y espesores de capa

Indicadores:

0.032% l/m<sup>2</sup> --- Consolid

1.5, 2.25 y 3 kg/m<sup>2</sup>----Solidry

Variable Dependiente:

Capacidad portante

Dimensiones: Propiedades físicas y mecánicas

Indicadores:

Granulometría, clasificación de suelos, límites de Atterberg, Contenido de humedad, CBR y Proctor Mod

Tipo:

Aplicada

Nivel:

Explicativa

Diseño:

Experimental

Población:

Centros pavimentación del sector 1 del distrito de José Leonardo Ortiz.

Muestra:

Se escogió a las zonas comprendidas la Calle Tulipanes por las fallas notorias visualizadas en el pavimento.

Técnicas e instrumentos:

Observación: Guía de observación.

Análisis documental: Formatos de análisis documental.

#### ESPECÍFICOS

Definir las propiedades físicas de granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad y clasificación del suelo respecto a su estado natural

Definir las propiedades mecánicas de proctor y CBR del suelo respecto a su estado natural.

Determinar la influencia del aditivo Consolid y Solidry en las propiedades físicas del suelo a nivel de subrasante del tramo de estudio.

Determinar la influencia del aditivo Consolid y Solidry en las propiedades mecánicas del suelo a nivel de subrasante del tramo de estudio. Establecer la dosificación óptima de aditivo Consolid y Solidry a utilizar en la subrasante.

Realizar el análisis de costo-beneficio de la aplicación del aditivo Consolid y Solidry.

Anexo N°03: Registro fotográfico

- PREPARACIÓN DE LOS ADITIVOS SISTEMA CONSOLID

Aditivo Consolid C444 concentrado + Solidry

Consolid C444 desconcentrado

Desconcentración de C444(1/6)

- ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Preparación de la muestra

Registro de pesos

- REGISTRO DE PESOS DEL MOLDE

REGISTRO DE MUESTRAS AL AIRE LIBRE

- REGISTRO DE MUESTRAS INMERSAS EN AGUA

- REGISTRO DE MUESTRAS EN REPOSO

- REGISTRO DE EXPANSIÓN DE LAS MUESTRAS

- REGISTRO DE PENETRACION DE LAS MUESTRAS

REGISTRO DE ASCENCIÓN CAPILAR DE LAS MUESTRAS

Sumergido 1 horas.

Sumergido 3 horas.

Sumergido 8 horas

Sumergido 12 horas

Anexo N°04: Validación de ensayos