



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EFICIENCIA DEL USO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE
SUELOS FINOS ARENOSO LIMOSO EN LA CIUDAD DE
YUNGUYO 2023**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. CARLOS HUMBERTO CHINO PEÑA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



CARLOS HUMBERTO CHINO PEÑA

EFICIENCIA DEL USO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS ARENOSO LIMOSO EN LA CIUDAD DE YUNGU...

- Tesis de pregrado
- Tesis de pregrado
- Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:414434074

165 Páginas

Fecha de entrega
9 dic 2024, 7:19 p.m. GMT-5

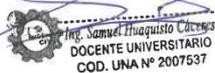
32,357 Palabras

Fecha de descarga
9 dic 2024, 7:30 p.m. GMT-5

167,631 Caracteres

Nombre de archivo
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA FOR....pdf

Tamaño de archivo
3.6 MB



Ing. Samuel Huaguisto Cáceres
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2007537

Vgo


Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910546
12 DIC 2024
SUBDIRECTOR INV - EDC





12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 10% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Ing. Samuel Triguero Cáceres
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2007537

VOBO

12 dic 2024

Ing. Jaime Medina Luiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 310545
SUBDIRECTOR INU - EDIC





DEDICATORIA

La presente tesis de investigación se lo dedico en primer lugar a **Dios**.
por haber ayudado espiritualmente y dar fuerzas. A él rindo con mucha bondad eterna y mucha alegría y confianza a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis queridos padres.

Andrés y Estefanía, por todo el amor y cariño que me dieron, siempre estuvieron a mi lado apoyándome a lograr mis objetivos, impulsándome a convertirme en un hombre de bien.

A mi hermana **Beatriz**, por estar conmigo y apoyándome siempre.

CHINO PEÑA Carlos Humberto



AGRADECIMIENTOS

Primero lugar agradezco a **Dios** Padre eterno, por haber dado la vida, sabiduría divina, inteligencia, salud y sus palabras. Estoy muy agradecido por estar a mi lado y muy feliz de haber cuidado todo este tiempo de mi vida, y me fortaleció de haber concluido mis estudios universitarios.

A mi escuela profesional de Ingeniería Civil, por haber brindado una formación académica de excelencia que ha sido fundamental para mi desarrollo profesional.

A mis jurados de tesis, **M.Sc. Emilio Castillo Aroni, M.Sc. Gino Frank Laque Córdova e Ing. Nicolás Lusa Flores**, por compartir sus conocimientos, experiencia, aprendizaje.

A mi asesor de tesis, **Dr. Samuel Huaquisto Cáceres**, por su apoyo para poder realizar este trabajo.

A mis queridos padres, por su fortaleza, apoyo constante, valores y principios, que me educaron a mi formación profesional a lo largo de estos años de estudio y haber contribuido en cumplir este objetivo.

CHINO PEÑA Carlos Humberto



ÍNDICE DE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE DE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
RESUMEN	20
ABSTRACT.....	21
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2.1. Problema general.....	23
1.2.2. Problema específico	23
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.3.1. Hipótesis general.....	23
1.3.2. Hipótesis específica.....	24
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	25
1.5.1. Objetivo general	25
1.5.2. Objetivos específicos	25

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	26
2.1.1.	Antecedentes internacionales	26
2.1.2.	Antecedentes nacionales	28
2.1.3.	Antecedentes locales	31
2.2.	BASES TEÓRICAS	33
2.2.1.	Suelo.....	33
2.2.2.	Subrasante	34
2.2.3.	Estabilización de suelos	35
2.2.4.	Estabilización mecánica	35
2.2.5.	Estabilización química	37
2.2.6.	Estabilización con aditivo Terrasil	41
2.2.7.	Estudio de suelos en laboratorio	47
2.2.8.	Estudios de tránsito	63
2.2.9.	Pavimento.....	64
2.2.10.	Diseño de pavimentos flexibles empleando AASHTO 93.....	65
2.2.11.	Numero de estructura	73

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	76
3.2.	MATERIALES A UTILIZAR	77
3.2.1.	Suelo.....	77
3.2.2.	Terrasil	78
3.3.	LUGAR DEL MATERIAL A UTILIZAR	79
3.3.1.	Lugar de la muestra de suelo.....	79
3.3.2.	Lugar de obtención del Terrasil	79



3.4.	ENSAYO DE LABORATORIO DE LA SUBRASANTE PARA USO VÍAS DEL SUELO NO TRATADO	79
3.4.1.	Gravedad específica	80
3.4.2.	Análisis granulométrico	81
3.4.3.	Análisis granulométrico por hidrómetro	83
3.4.4.	Contenido de humedad.....	84
3.4.5.	Límite líquido.....	85
3.4.6.	Límite plástico.....	86
3.4.7.	Índice de plasticidad.....	87
3.4.8.	Clasificación de suelos	87
3.4.9.	Ensayo de proctor modificado	88
3.4.10.	Ensayo de valor de soporte california (CBR)	89
3.4.11.	Ensayo de expansión	90
3.4.12.	Ensayo de compresión no confinada (UCS)	91
3.5.	ENSAYO DE LABORATORIO DE LA SUBRASANTE ESTABILIZADO CON TERRASIL PARA USO DE VÍAS DEL SUELO TRATADO	91
3.5.1.	Ensayo de límites de consistencia	92
3.5.2.	Ensayo de valor de soporte california (CBR)	95
3.5.3.	Ensayo de compresión no confinada (UCS)	100
3.6.	DISEÑO ESTADÍSTICO	102
3.6.1.	Método de ANOVA	102
3.6.2.	Método de Tukey	103

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	RESULTADOS DE LOS ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA	104
-------------	--	------------



3.7.1.	Resultados del ensayo de límite líquido.....	104
3.7.2.	Resultados del ensayo de límite plástico.....	107
3.7.3.	Resultados del ensayo del índice de plasticidad	108
4.2.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA	109
4.3.	RESULTADOS DEL ENSAYO DEL VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR).....	111
4.4.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DEL VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR).....	112
4.5.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXPANSIÓN.....	115
4.6.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXPANSIÓN	115
4.7.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS).....	117
4.8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS).....	118
4.9.	RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO VEHICULAR.....	121
4.9.1.	Estudio de tráfico vehicular	121
4.9.2.	Recopilación de información	122
4.9.3.	Conteo de tráfico vehicular	122
4.9.4.	Factor de corrección	124
4.9.5.	Cálculo del índice medio diario anual (IMDa)	125
4.9.6.	Clasificación vehicular promedio	127
4.9.7.	Crecimiento de tasa anual	128



4.10. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO	
VEHICULAR	129
4.11. RESULTADOS DEL DISEÑO DE ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE	
TIPO DE SUELO NO TRATADO	130
4.11.1. Diseño de pavimento flexible.....	130
4.11.2. Diseño (ESALs)	130
4.11.3. Módulo de resiliencia	130
4.11.4. Confiabilidad.....	131
4.11.5. Coeficiente estadístico de desviación estándar normal.....	131
4.11.6. Desviación estándar combinada.....	131
4.11.7. Índice de servicialidad presente	131
4.11.8. Número estructural.....	133
4.11.9. Determinación del espesor de las capas estructurales del pavimento ...	133
4.12. DISCUSIÓN DEL RESULTADOS DEL DISEÑO ESPESOR DE LA	
CARPETA EN ESTE TIPO DE SUELO NO TRATADO.....	135
4.13. RESULTADOS DEL DISEÑO ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE	
TIPO DE SUELO AL INCORPORARLE 0.30 Lt/m³ DE TERRASIL.....	136
4.13.1. Diseño de pavimento flexible.....	136
4.13.2. Diseño (ESALs)	136
4.13.3. Módulo de resiliencia	136
4.13.4. Confiabilidad.....	137
4.13.5. Coeficiente estadístico de desviación estándar normal.....	137
4.13.6. Desviación estándar combinada.....	137
4.13.7. Índice de servicialidad presente	137
4.13.8. Número estructural.....	138



4.13.9. Determinación del espesor de las capas estructurales del pavimento ...	139
4.14. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL DISEÑO ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE TIPO DE SUELO AL INCORPORARLE 0.30 Lt/m³ DE TERRASIL.....	141
4.15. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	144
4.15.1. Prueba de anova límite de consistencia.....	144
4.15.2. Prueba de anova para (CBR).....	146
4.15.3. Prueba de anova para expansión	148
4.15.4. Prueba de anova para (UCS)	151
4.16. ANÁLISIS DE VIABILIDAD COSTO ECONÓMICA	153
4.16.1. Mejoramiento de la subrasante con material de cantera	153
4.16.2. Mejoramiento de la subrasante con dosificación de 0.30 Lt/m ³ de Terrasil	154
V. CONCLUSIONES.....	158
VI. RECOMENDACIONES	160
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161
ANEXOS.....	163

TEMA: ESTABILIDAD DE SUELOS

ÁREA: TRANSPORTES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: TRANSPORTE Y GESTIÓN VIAL

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 17 de diciembre de 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Normas de las características de la sub-rasante	34
Tabla 2 Compuesto químico del terrasil	42
Tabla 3 Descripción y características del terrasil	43
Tabla 4 Plasticidad y clasificación.....	57
Tabla 5 Lectura de carga de ensayo	60
Tabla 6 Firmeza del suelo	63
Tabla 7 Magnitud de ejes equivalentes para tipo circulación	68
Tabla 8 Factor de confiabilidad en porcentaje	69
Tabla 9 Coeficiente estadístico de desviación estándar normal.....	70
Tabla 10 Circulación según servicialidad inicial	71
Tabla 11 circulación según servicialidad final.....	72
Tabla 12 Coeficiente de la capa estructural para pavimentos.....	74
Tabla 13 Coeficiente de la capa estructural para pavimentos.....	74
Tabla 14 Coeficiente de la capa estructural para pavimentos.....	74
Tabla 15 Resultados de las propiedades de la muestra de suelo natural.....	78
Tabla 16 Compuesto químico terrasil	78
Tabla 17 Descripción y características del terrasil	79
Tabla 18 Resistencia a la comprensión no confinada	91
Tabla 19 Dosificación de límite de consistencia.....	92
Tabla 20 Dosificación con terrasil para CBR	96
Tabla 21 Dosificación de terrasil para UCS	100
Tabla 22 Resultados total del límite líquido	104
Tabla 23 Resultados total del límite plástico	108



Tabla 24	Resultados total de índice de plasticidad	108
Tabla 25	Resultados total de límites de consistencia.....	109
Tabla 26	Descripción de las características del IP	110
Tabla 27	Resultado total del terrasil y CBR	111
Tabla 28	Normas de las características de la sub rasante	114
Tabla 29	Resultados total del tiempo y expansión.....	115
Tabla 30	Resultados total de compresión no confinada.....	117
Tabla 31	Resultados total de terrasil y UCS	118
Tabla 32	Normas de consistencia del suelo	119
Tabla 33	Ubicación del proyecto	122
Tabla 34	Estudio de conteo de tráfico semanal	123
Tabla 35	Factores estacionales.....	124
Tabla 36	Determinación del IMDa	125
Tabla 37	Carretera de bajo volumen de tránsito y ancho de calzada.....	126
Tabla 38	Porcentaje de incidencia del IMDa.....	127
Tabla 39	Proyección de tráfico a 10 años	128
Tabla 40	Resumen para el diseño del pavimento.....	133
Tabla 41	Resumen para el diseño del pavimento.....	139
Tabla 42	Prueba de anova índice de plasticidad	144
Tabla 43	Prueba post hoc de tukey para límite de consistencia.....	145
Tabla 44	Prueba de anova para CBR	147
Tabla 45	Prueba post hoc de tukey para CBR	148
Tabla 46	Prueba de anova para expansión	149
Tabla 47	Prueba post hoc de tukey para expansión	150
Tabla 48	Prueba de anova para UCS	151



Tabla 49	Prueba post hoc de tukey para UCS.....	152
Tabla 50	Recursos y precios unitarios uso de material de cantera	154
Tabla 51	Recursos y precios unitarios uso de aditivo Terrasil	155



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Repulsión gotas de agua sobre tensión superficial por interacciones	45
Figura 2 Comportamiento de las gotas de agua sobre suelos tratados con terrasil.....	46
Figura 3 Aditivo estabilizador químico terrasil de 20 litros	47
Figura 4 Localización geográfica del estudio	76
Figura 5 La muestra de suelo es extraída a un lado Km 01+000 de la carretera Yunguyo - Puno	77
Figura 6 Ensayo gravedad específica	81
Figura 7 Granulométrico. (a) Tamizado. (b) Lavado de la muestra en el tamiz N° 200	82
Figura 8 Representación gráfica curva granulométrica del suelo natural.....	82
Figura 9 Ensayo granulométrico por hidrómetro. (a) Control (b) Reposo de la muestra	83
Figura 10 Representación gráfica de la curva granulométrica por hidrómetro del suelo natural	84
Figura 11 Grafica de contenido de humedad.....	85
Figura 12 Grafica de limite líquido	86
Figura 13 Contenido de humedad vs densidad seca	88
Figura 14 Expansión y tiempo	90
Figura 15 Ensayo LC. (a) Dosificación con Terrasil en la muestra. (b) Curado de 14 días de la muestra dentro de una bolsa hermética.....	93
Figura 16 Ensayo LL. (a) Dosificación con terrasil en la muestra (b) Ensayo cuchara casagrande.....	94



Figura 17	Ensayo LP. (a) Muestra de suelo seco de los bastones de 3.2 mm (b) Bastones de diámetro 3.2 mm son pesado en la balanza	95
Figura 18	Ensayo CBR (a) Preparación del terrasil (b) Combinación de la muestra de suelo y agua.....	96
Figura 19	Ensayo CBR (a) División en cinco partes iguales la muestra (b) Muestra en proceso de enrasar	97
Figura 20	Muestras compactado por 14 días de curado	98
Figura 21	Donde los moldes de CBR son sumergidos en tanque de agua por 96 hs y se hacen la lectura con el dial para medir hinchamiento	98
Figura 22	Ensayo CBR. (a) Se retira el agua del molde durante 15 minutos. (b) El molde de suelo compactado es sometida al ensayo de penetración.....	99
Figura 23	Ensayo UCS. (a) Curado de los 14 días en bolsa hermética (b) Remoldeo del espécimen (c) Especimen sometidas a ensayo de penetración	101
Figura 24	Dosificación de 0.00 Lt/m ³ de terrasil (suelo natural)-límite liquido.....	105
Figura 25	Dosificación de 0.30 Lt/m ³ de terrasil-limite liquido.....	105
Figura 26	Dosificación de 0.50 Lt/m ³ de terrasil-limite liquido.....	106
Figura 27	Dosificación de 0.75 Lt/m ³ de terrasil-limite liquido.....	106
Figura 28	Dosificación de 1.00 Lt/m ³ de terrasil-limite liquido.....	107
Figura 29	Resumen de grafica total de los límites de consistencia	109
Figura 30	Resumen de la gráfica total del terrasil y CBR	113
Figura 31	Representación gráfica de la comparación de la capacidad de soporte al 100 %	113
Figura 32	Resumen de la gráfica total tiempo y expansión.....	116
Figura 33	Resumen de la gráfica total de terrasil y UCS	118
Figura 34	Ubicación dosificación de terrasil y UCS en consistencia del suelo.....	119



Figura 35	Gráfica de número de vehículos por día.....	124
Figura 36	Gráfica del IMDa por tipo de vehículos.....	126
Figura 37	Distribución en altura de las capas	134
Figura 38	Distribución en altura de las capas	140
Figura 39	Análisis comparativo de las dos muestras.....	142
Figura 40	Análisis comparativo de la estructura del pavimento.....	143
Figura 41	Análisis costo por m ³ de subrasante	156
Figura 42	Análisis por km de subrasante.....	156



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Dosificación 0.00 Lt/m ³ de terrasil-suelo no tratado	163
ANEXO 2 Dosificación de 0.30 Lt/m ³ de terrasil-suelo tratado	163
ANEXO 3 Dosificación de 0.50 Lt/m ³ de terrasil-suelo tratado	163
ANEXO 4 Dosificación de 0.75 Lt/m ³ de terrasil-suelo tratado	163
ANEXO 5 Dosificación de 1.00 Lt/m ³ de terrasil-suelo tratado	163
ANEXO 6 Estudio de trafico	163
ANEXO 7 Ejes equivalentes.....	163
ANEXO 8 Diseño del pavimento flexible para suelo no tratado.....	163
ANEXO 9 Diseño del pavimento flexible para dosificación de 0.30 Lt/m ³ de terrasil- suelo tratado	163
ANEXO 10 Ficha técnica del terrasil	163
ANEXO 11 Análisis de costos unitario	163
ANEXO 12 Panel fotográfico.....	163



ACRÓNICOS

CBR:	California Bearing Ratio
MTC:	Ministerios de Transportes y Comunicaciones
NTP:	Norma Técnica Peruana
AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials
SUCS:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
LL:	Límite Líquido
LP:	Límite Plástico
IP:	Índice de Plasticidad
ASTM:	American Society for Testing Materials
MDS:	Máxima Densidad Seca
CHO:	Contenido de humedad óptimo
UCS:	Resistencia a la compresión no confinada
IMDS:	Índice medio diario semanal
IMDa:	Índice medio diario anual
ESALs:	Ejes equivalentes
SN:	Numero estructural
DG:	Diseño geométrico
NF:	Nivel freático



RESUMEN

Esta tesis aborda la estabilización de suelos con la adición de aditivos químicos, específicamente Terrasil, para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos finos arenosos limosos, caracterizados por una baja resistencia de soporte, evidenciada en valores reducidos de CBR, entre otros parámetros. El objetivo principal es determinar la influencia del Terrasil en la estabilización de suelos de subrasante. La muestra de estudio fue obtenida de una sola calicata ubicada en el Km 01+000 de un tramo de la carretera Yunguyo – Puno. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo y experimental, utilizando técnicas como la observación y el análisis, cumpliendo con las normas estandarizadas para cada ensayo. El estudio probó la hipótesis de que la estabilización con Terrasil mejora significativamente las propiedades del suelo. Para ello, se utilizaron diferentes dosificaciones de Terrasil (0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³) sometidas a un curado de 14 días. Los resultados demostraron una disminución en el índice de plasticidad, un incremento en la capacidad de soporte CBR, una mejora en el control de la expansión del suelo y un aumento en la resistencia a la compresión no confinada (UCS). Con una dosificación asumida de 0.30 Lt/m³, el CBR alcanzó un 36.78%, permitiendo el diseño de un pavimento con un espesor de 5 cm, base granular de 15 cm y subbase granular de 15 cm. Además, los cálculos arrojaron un número estructural (SN) de 2.210 y un valor de ejes equivalentes (ESAL) de 1,409,163.56 y se viabilizarán los costos económicos.

Palabras Clave: Arenoso, Estabilidad de suelos, Limoso, Subrasante, Terrasil.



ABSTRACT

This thesis addresses the stabilization of soils with the addition of chemical additives, specifically Terrasil, to improve the geotechnical properties of fine sandy silty soils, characterized by low bearing strength, evidenced by reduced CBR values, among other parameters. The main objective is to determine the influence of Terrasil on the stabilization of subgrade soils. The study sample was obtained from a single test pit located at Km 01+000 of a section of the Yunguyo - Puno highway. The methodology used was quantitative and experimental, using techniques such as observation and analysis, complying with the standardized norms for each test. The study tested the hypothesis that stabilization with Terrasil significantly improves soil properties. For this purpose, different dosages of Terrasil were used (0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ and 1.00 Lt/m³) subjected to a 14-day curing. The results showed a decrease in the plasticity index, an increase in the CBR support capacity, an improvement in the control of soil expansion and an increase in the unconfined compressive strength (UCS). With an assumed dosage of 0.30 Lt/m³, the CBR reached 36.78%, allowing the design of a pavement with a thickness of 5 cm, a granular base of 15 cm and a granular subbase of 15 cm. In addition, the calculations yielded a structural number (SN) of 2,210 and an equivalent axis value (ESAL) of 1,409,163.56 and the economic costs will be made viable.

Keywords: Sandy, Soil stability, Silty, Subgrade, Terrasil.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El transporte es fundamental para el progreso de la humanidad, ya que permite el movimiento de las personas, e impulsando la economía y mejorando la calidad de vida. La construcción de vías de comunicación (carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, etc.). Depende de la calidad y estabilidad del suelo sobre el que se construye. Sin embargo, los suelos inestables pueden provocar deformaciones, agrietamientos y hasta el colapso de las infraestructuras.

La región de Puno se caracteriza por tener suelos arenoso limosos, arcillosos en otros, debido a la normativa nacional, estos materiales no son aptos para su uso como subrasantes. La obtención de canteras con materiales granulares adecuados representa, en efecto, un desafío importante en los proyectos de carreteras debido a diversos factores que impactan mucho en la ejecución de las obras y planificación, que también implica un alto costo. La incapacidad del suelo arenoso limoso es efectivamente, un problema crítico en la construcción de carreteras. Este tipo de suelo tiene características que lo hacen desfavorable para soportar cargas, lo que resulta en asentamientos, deformaciones y agrietamientos en la estructura del pavimento. Estos problemas, si no se abordan correctamente, reducen la funcionalidad y la vida útil.

Con base de ensayos realizados de antecedentes sobre diferentes tipos de suelos, se observó un aumento significativo en el valor del CBR al aplicar estabilizadores combinados. Para un suelo limoso de baja plasticidad (CL), la adición de 0.5 kg/m³ de terrasil más 1% de cemento resultó en un incremento del 170% en el valor del CBR



respecto al estado natural del suelo. Para un suelo limoso de alta plasticidad (ML), con la misma dosificación de 0.5 kg/m³ de terrasil más 1% de cemento, se alcanzó un incremento del 60% en el CBR en comparación con su condición natural (Cristóbal, 2015).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es la mejora de las propiedades geotécnicas para uso de vías, de un suelo fino de consistencia arenoso limoso al incorporar aditivo químico terrasil, carretera Yunguyo – Puno, 2023?

1.2.2. Problema específico

- ¿Cuál será la dosificación óptima del agente estabilizador, terrasil, requerido en un suelo fino arenoso limoso de subrasante?
- ¿Cuál será el comportamiento del índice de plasticidad (IP), expansión, capacidad de soporte (CBR) y resistencia a la compresión no confinada (UCS) de un suelo fino arenoso limoso de subrasante, al incorporarle terrasil, como agente estabilizador?
- ¿Cuál será el espesor de la carpeta en este tipo de suelo al incorporarle terrasil?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

- Con la adición del aditivo químico terrasil, mejora notablemente las propiedades geotécnicas del uso de vías, del suelo fino de consistencia arenoso limoso, carretera Yunguyo – Puno, 2023.



1.3.2. Hipótesis específica

- Con la adición de distintas dosificaciones óptimas del agente estabilizador, terrasil, requerido en un suelo fino arenoso limoso de subrasante, se encuentra entre los parámetros de 0.20 kg/m^3 a 2.00 kg/m^3 .
- Los valores de comportamiento índice de plasticidad (IP), expansión, capacidad de soporte (CBR) y resistencia a la compresión no confinada (UCS) de un suelo fino arenoso limoso de subrasante, al incorporarle terrasil, como agente estabilizador, tienen mejora aceptable.
- La incorporación terrasil, tienen mejora los resultados obtenidos del espesor de la carpeta en este tipo de suelo.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio tiene como objetivo abordar problemas críticos asociados a la subrasante de suelo fino arenoso, como la carencia de la capacidad portante del suelo, agrietamientos o hinchamiento por expansión debido a la humedad y contracción durante el periodo de sequedad y humedad debido al impacto ambiental.

Para ello, se propone el uso de un aditivo químico, terrasil, como recurso para estabilizar el suelo, mejorando su resistencia y durabilidad a lo largo de su vida útil. Los aditivos químicos como terrasil representan una solución viable y efectiva para mitigar las deficiencias de los suelos fino arenosos limosos y garantizar un mejor desempeño estructural en proyectos de ingeniería vial. En la actualidad, los suelos fino arenosos limosos presentan un desafío significativo en el ámbito de la ingeniería, ya que muchas veces no se les brinda una solución adecuada. Es común que, debido a sus limitaciones, estos materiales sean descartados en el sitio de construcción por no cumplir con los estándares de calidad requeridos.



Esto obliga a los ingenieros a recurrir al transporte de materiales desde canteras, lo que incrementa los costos y el impacto ambiental del proyecto. La implementación de métodos de estabilización, como el uso de aditivos químicos, podría ser una alternativa eficiente para optimizar el uso de estos suelos in situ, reduciendo la dependencia de materiales externos.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

- Determinar la mejora de las propiedades geotécnicas para uso de vías, de un suelo fino de consistencia arenoso limoso incorporando aditivo químico terrasil, carretera Yunguyo – Puno, 2023.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la dosificación óptima del agente estabilizador, terrasil, requerido en un suelo arenoso limoso de subrasante.
- Analizar el comportamiento del índice de plasticidad (IP), expansión, capacidad de soporte (CBR) y resistencia a la compresión no confinada (UCS) de un suelo fino arenoso limoso de subrasante, al incorporarle terrasil, como agente estabilizador.
- Determinar cuál será el espesor de la carpeta en este tipo de suelo al incorporarle terrasil.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes internacionales

César Antonio Vinueza Elizalde (2014), el proyecto de tesis tiene como objetivo principal ofrecer un criterio adecuado de la estabilización de suelos de los tipos limo orgánico arenoso (OL) y limo arenoso (OM), utilizando cemento, cal, emulsión asfáltica y terrasil como estabilizantes. La investigación está diseñada para ser una referencia práctica, permitiendo a los profesionales adaptar las especificaciones según las características del suelo en sus proyectos. Los suelos estudiados fueron de limo orgánico arenoso (OL) y limo arenoso (OM), se utilizó una combinación de estabilizantes de cemento, cal, emulsión asfáltica y terrasil. El diseño del pavimento se basó en el uso de emulsión catiónica CSS-1H-P, una emulsión de rotura lenta que permite una mejor integración en el proceso de estabilización. El diseño estructural del pavimento se desarrolló en función del CBR de la subrasante, un indicador crítico para determinar la capacidad de soporte del suelo.

Rodríguez (2016), en esta investigación de tesis para optar por el título de Ingeniero Civil por la Universidad Técnica de Ambato, se llevó a cabo un análisis comparativo entre la compactación y la humedad de la subrasante natural y la subrasante tratada con el producto químico biodegradable terrasil, en la vía ecológica del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos, Ecuador, con una longitud de 3 km + 822 m. Se realizaron calicatas cada 500 metros a lo largo de la vía, las



muestras obtenidas fueron sometidas a los siguientes ensayos: límites de Atterberg (límites líquido y plástico), humedad óptima, densidad máxima, ensayo de compactación (proctor modificado) y CBR (California Bearing Ratio). Se incorporaron porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% de terrasil al suelo para evaluar su efecto en las propiedades geotécnicas y mecánicas. En el ensayo de proctor modificado, el suelo tratado con terrasil presentó mejores resultados en comparación con el suelo natural y con el suelo mejorado mediante el uso de material pétreo como subbase y base. El incremento del CBR, la capacidad de soporte del suelo, mejorado con terrasil aumentó un 14% después de 7 días del tratamiento, la humedad disminuyó en un 27.86%, mejorando la estabilidad del suelo. El investigador concluyó que el uso de material granular para mejorar la estructura de la vía resulta ser más costoso económicamente en comparación con el uso de terrasil.

La aplicación de terrasil elimina la necesidad del transporte de material, lo cual reduce significativamente los costos. Según Calbrand (2010), el transporte de material incluye el retiro del suelo natural y su reemplazo por suelos de mejores características, lo cual representa un costo considerable.

Odebrecht Angola (2013), el proyecto realizado por Odebrecht Angola (2013), en la obra Catata-Luvua, Lunda Norte, destacó el uso de la nanotecnología terrasil para la estabilización e impermeabilización de suelos tipo arena limosa roja. Este proyecto incluyó un tramo de distancia de 150 m de largo x 10 m de ancho y 25 cm a 30 cm de espesor en la capa de subrasante, con una dosificación de 1.00 kg/m³ de terrasil. Los ensayos realizados son CBR, mejora significativa de la capacidad de soporte, compresión no confinada incremento de resistencia a



la carga y la permeabilidad, reducción notable. Donde llegaron a concluir que la mejora es con dosificaciones de 1.00 Kg/m³ de terrasil.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Cristóbal Calderón, Miguel Ángel (2015), en el proyecto del corredor vial EMP. PE 04-B, donde se utilizó suelo granular GM, el CBR mejoró en un 160% (de 46.80% a 74%) con la dosificación de 1.00 kg/m³ de terrasil. En el proyecto con suelos limosos CL y ML, como los aeródromos de San Lorenzo y Sepahua, se lograron mejoras en el CBR de hasta un 170% y 60% respectivamente, con la adición de 0.50 kg/m³ de terrasil y un 1% de cemento en peso del suelo.

Gutiérrez Rosales, Jessica Milagros y Cerón Rivera, Eduardo César. (2020), el presente estudio aborda una problemática común en proyectos de ingeniería civil: la diversidad y calidad de los suelos en zonas de construcción, especialmente aquellos con baja capacidad de soporte, como se evidencia en valores bajos de CBR (California Bearing Ratio). Este caso particular se centra en el almacén Logisminsa de concentrados mineros, ubicado en el distrito de Ventanilla, donde las condiciones del terreno plantean desafíos significativos debido a la condición no adecuado de la capacidad de soporte del valor de CBR, exposición a altas cargas concentradas y distribuidas por los concentrados mineros y el tránsito de vehículos industriales. Para mitigar estos problemas, se plantea utilizar aditivo terrasil en diferentes porcentajes de dosificaciones, como estrategia de estabilización de la estructura de la capa de pavimento. Esta propuesta tiene como objetivo evaluar el impacto del terrasil, mejorar el CBR, incrementar la capacidad de soporte del terreno, cumplir con los estándares del manual de carreteras (MTC, 2014) y para vehículos industriales, donde se ha



optimizado el diseño del pavimento con la reducción del espesor de la losa de concreto al incorporar terrasil, buscando un diseño más eficiente y económico.

Fredy Roland Hidalgo Reategui y José Hidalgo Reategui (2018), en este proyecto de investigación se analizaron los resultados del suelo con la incorporación de proes y terrasil para estabilizar el suelo. El estudio se centró en determinar la efectividad de ambos aditivos a través de porcentajes graduales de adición, evaluando su impacto en las propiedades mecánicas del suelo, especialmente en el CBR (California Bearing Ratio). Proes, se observó un desempeño consistente, logrando mejores resultados en el CBR tanto al 95% como al 100% de la MDS. Terrasil, aunque mostró resultados positivos, se detectó una variación en el comportamiento del suelo al aumentar la dosificación del aditivo.

Se trabajó principalmente con suelos arcillosos, seleccionados por su baja capacidad de soporte inicial y su necesidad de estabilización. Se realizaron pruebas de laboratorio para analizar el resultado mecánico de los suelos tratados con cada aditivo, se midieron los índices de plasticidad, MDS y la capacidad de soporte del suelo a través de los valores de CBR.

Cristóbal (2015), en su trabajo de tesis, realizado para optar por el título de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), investigó la influencia de la estabilización de suelos con terrasil en las propiedades mecánicas de los suelos plásticos utilizados como estructura y subrasante en caminos no pavimentados de la selva peruana. Donde se determinaron la clase de los suelos, humedad y como el Proctor modificado, CBR (California Bearing Ratio) y compresión no confinada.



Los resultados principales son mejorar la capacidad de soporte con la adición de terrasil; mejoró significativamente el CBR de los suelos plásticos estudiados, superando el 100% del valor obtenido en los suelos naturales. En algunos casos, el aumento en el CBR alcanzó hasta un 170%, según lo reportado por Cristóbal (2015). La eficiencia del terrasil dependió de la naturaleza del suelo y del porcentaje del aditivo utilizado. Los suelos tratados con terrasil cumplieron con las especificaciones técnicas exigidas en las normas peruanas (EG, 2018). Ensayos complementarios, se prepararon muestras para evaluar el efecto del curado de diferentes tiempos (4, 7, 15 y 30 días). Estos curados se asentaron al aire libre, estas pruebas ayudaron a identificar cómo evoluciona la resistencia del suelo estabilizado con el tiempo. Combinación con otros estabilizantes, además de usar terrasil como único aditivo, se probó su combinación con cemento Portland, lo que también mostró mejoras considerables en las propiedades mecánicas. Comparado con otros aditivos como PROES, ISS 2500 y PERMAZYME, el terrasil presentó ventajas en términos de costo y eficacia, debido a su baja dosificación requerida.

Franco V., José Luis y Vargas L, Margareth Wendy (2021), la investigación que menciona compara el diseño estructural del pavimento, es organizado en el sector de la Villa Judicial – Distrito de Huanchaco – Trujillo – La Libertad. El análisis busca resultados, cuál es el más eficiente en términos de costo, durabilidad y eficiencia en función del tráfico vehicular esperado y las características del suelo en la zona. Los estudios realizados fueron lo primero los ensayos iniciales, ensayo del conteo vehicular y ensayo de suelos, lo segundo es el diseño estructural de pavimentos según AASHTO 93, tercero es diseños y



comparación de los tres tipos de pavimento, el cuarto el diseño geométrico y el quinto elaboración de presupuesto.

Colana A., Roció Y. Y Torres C., Yoel S. (2023), la siguiente investigación presentada la utiliza el diseño no experimental de base descriptivo, aplicando normativas y manuales de diseño vial para obtener conclusiones fundamentadas. El objetivo fue diseñar una carretera de bajo volumen de tránsito considerando las condiciones del tráfico vehicular y las características del suelo en la zona. IMDa se determinó en función del conteo de tráfico de 0 a 350 vehículos por día, de 1.35% de tasa de crecimiento anual. Según la normativa y el volumen de tránsito proyectado para 10 años, la carretera fue clasificada como de bajo volumen de tránsito, el suelo se clasificó como granular (SW-SC-SM), con presencia de arena bien graduada y contenidos de limo y arcilla, CBR del suelo obtuvieron valores de 10.65% a 11.85%, se calculó SN de 1.830 y pavimento de espesor de 5 cm, base granular espesor de 15 cm de espesor y, subbase granular espesor de 15 cm. El diseño cumplió con la normativa vigente del MTC y la metodología de AASHTO 93, lo que garantiza la confiabilidad del diseño propuesto.

2.1.3. Antecedentes locales

Fabiola N. Ramos Quispe (2022). El presente proyecto de tesis se centró en determinar los resultados de la incorporación de terrasil, un producto nanotecnológico, sobre la subrasante de un suelo fino de consistencia blanda. El estudio, se realizó de una calicata ubicada en la carretera (Puno y Moquegua) en el km 11+ 400. Inicialmente, se analizaron las propiedades geotécnicas del suelo en su estado natural, considerando los siguientes ensayos: humedad, granulométrico, límites de Atterberg, ensayo de compactación, CBR y



compresión no confinada. Posteriormente, se dosificaron con: 0.20 Lt/m³, 0.80 Lt/m³, 1.40 Lt/m³ y 2.00 Lt/m³ de terrasil, calculadas en función del peso seco del suelo. Estas dosis se mezclaron con agua, tomando como resultado el CHO determinado en el ensayo proctor modificado. Con un periodo de curado de 7 días. Finalmente, se evalúan las propiedades geotécnicas del suelo estabilizado, analizando específicamente los límites de Atterberg, CBR y compresión no confinada.

Dante Salas Mercado (2018), en su trabajo de tesis, tenía como principal objetivo evaluar las propiedades de los materiales utilizados en la carretera Puno – Tiquillaca – Mañazo, enfocándose en mejorar la condición del pavimento, que presentaba un alto grado de deterioro en ese momento. Se determinó un valor de 39.58% de CBR al 100% de la máxima densidad seca de suelo sin tratar, inferior al mínimo exigido por la norma, clasificando al material como de calidad regular. Condiciones limitantes, se estableció que los materiales a tratar deberían tener un LL menor de 30%. El terrasil mostró efectos positivos en las propiedades del suelo se redujo la humedad óptima entre un 1% y un 2%, incrementó la densidad del suelo, optimizando su compactación y las dosificaciones aplicadas fueron de 5 gr y 10 gr de terrasil por kilo de suelo. Adición de cemento (4%), incrementó el CBR al 100% MDS a 64.87%, logrando optimizar significativamente la capacidad del suelo. Luego, añadiendo terrasil (10 gr/kg), alcanzó un CBR al 100% MDS de 61.37%, también mostrando resultados positivos, aunque levemente inferiores al uso de cemento.

Hidalgo Bruna, Mario (2022), la investigación tiene como propósito estabilizar el suelo con terrasil para mejorar la carretera afirmada Patapampa – Apissi, ubicada en Arapa, Azángaro, Puno, durante el año 2022. Se empleó una



metodología de enfoque cuantitativo y un diseño experimental con nivel explicativo. La población analizada corresponde a un tramo de 5 km de longitud, tomando muestras representativas en dos calicatas situadas en el km 1+000 y el km 4+000. En el estudio se aplicaron tres dosificaciones: 0.4 Lt/m³, 0.7 Lt/m³ y 1.5 Lt/m³ de terrasil.

Donde el índice de plasticidad disminuyó con el aumento de la dosificación de terrasil, calicata N° 01, de 10.18% a 8.75%, calicata N° 02, de 10.28% a 9.12%. También se observaron variaciones mínimas en el CHO y MDS calicata N° 01, contenido de humedad, entre 10.00% a 10.60% y densidad seca máxima entre 2.050 gr/cm³ a 2.026 gr/cm³, calicata N° 02, contenido de humedad entre 9.40% a 11.50% y densidad seca máxima entre 2.082 g/cm³ a 2.065 g/cm³. A medida que aumentó la dosificación de terrasil, se observó un incremento en los valores de CBR al 95%, donde la calicata N° 01, de 35.1% a 37.0% y calicata N° 02, de 35.31% a 34.5%.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Suelo

Suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta de partículas sólidas, junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas (Braja M. Das, 1999).

2.2.1.1. Arena

La arena es un material compuesto principalmente de cuarzo y feldespatos, que, debido a su tamaño de partículas y características de drenaje, se comporta de manera eficiente en diversas aplicaciones de

ingeniería y construcción. El diámetro de las partículas de arena varía de 0.06 mm a 2 mm (Braja M. Das, 1999).

2.2.1.2. Limo

El limo es un material compuesto principalmente de fracciones finas de cuarzo y minerales en forma de escamas, como la mica. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,002 mm a 0,06 mm (Braja M. Das, 1999).

2.2.2. Subrasante

La subrasante es fundamental en la ingeniería de pavimentos, ya que actúa como la base natural que recibe las cargas que son transmitidas de la parte superior de la capa de la estructura. Sus propiedades, como la capacidad de soporte y la estabilidad, influyen directamente en el diseño y espesor de las capas estructurales del pavimento.

Por lo tanto, la evaluación del estudio del CBR de la subrasante es esencial e importante para diseñar la carpeta del pavimento, que sea capaz de soportar las cargas y las condiciones ambientales específicas del lugar donde se construye (Montejo, 2002).

Tabla 1

Normas de las características de la sub-rasante

Sub-rasante	CBR
Sub-rasante inadecuada (S0)	$(\text{CBR}) < 3\%$
Sub-rasante insuficiente (S1)	$3\% \leq (\text{CBR}) < 6\%$
Sub-rasante regular (S2)	$6\% \leq (\text{CBR}) < 10\%$
Sub-rasante buena (S3)	$10\% \leq (\text{CBR}) < 20\%$
Sub-rasante muy buena (S4)	$20\% \leq (\text{CBR}) < 30\%$
Sub-rasante excelente (S5)	$30\% \leq (\text{CBR})$

Nota: Manual carretera (MTC, 2014)



2.2.3. Estabilización de suelos

Es el mejoramiento sus características del suelo, en condición físicas, mecánicas y químicas para que sea más adecuado para el uso previsto, especialmente en aplicaciones de ingeniería como la construcción de carreteras, cimientos y infraestructuras. La estabilización del material de suelo implica alterar sus propiedades físicas y químicas para aumentar su resistencia y durabilidad. Esto puede implicar diferentes técnicas y procesos, como la adición de material cemento, cal, cenizas volantes, entre otros, combinado con el material suelo natural para mejorar sus características mecánicas, entre otras.

En resumen, la estabilización del suelo busca mejorar sus propiedades para cumplir con los requisitos de ingeniería necesarios para su uso como base o cimentación de una estructura determinada (Montejo, 2002).

2.2.4. Estabilización mecánica

Es un proceso de estabilización que tiene como objetivo mejorar sus propiedades físicas del suelo mediante métodos que no implican el uso de agentes químicos. Este enfoque utiliza métodos físicos para modificar la estructura y composición del suelo, logrando incrementar su capacidad de carga, resistencia y estabilidad general. Entre las técnicas más comunes se encuentra.

2.2.4.1. Compactación:

Este método implica la aplicación de presión sobre el suelo para reducir su volumen y aumentar su densidad. Se utiliza maquinaria pesada, como compactadoras de rodillo, para compactar las capas de suelo en incrementos (Braja M. Das, 2013).



2.2.4.2. Vibroflotación

La vibroflotación es un método que utiliza vibraciones para mejorar las características del suelo. Se insertan vibradores en el suelo, que generan vibraciones y ayudan a compactar el suelo, especialmente útil en suelos granulares (Braja M. Das, 2013).

2.2.4.3. Voladura

En este método, se utilizan explosivos para romper y compactar el suelo. La explosión genera energía que compacta y estabiliza el suelo, especialmente efectiva en suelos rocosos o con presencia de rocas grandes (Braja M. Das, 2013).

2.2.4.4. Compactación dinámica

Este método implica el uso de maquinaria pesada, como martillos vibratorios o pilotes de caída libre, para aplicar cargas dinámicas al suelo, la energía generada durante este proceso compacta y estabiliza el suelo. Cada uno de estos métodos tiene sus aplicaciones específicas dependiendo de las características del suelo y los requisitos del proyecto de construcción o ingeniería.

La elección del método adecuado depende de factores como la composición del suelo, la carga que soportará la estructura y las condiciones del sitio (Braja M. Das, 2013).

2.2.4.5. Drenaje

El drenaje es un conjunto de métodos, son diseñados para el control de aguas superficiales y subterráneas. Por ejemplo, tenemos.



Drenes verticales de arena: consisten en la instalación de tubos verticales rellenos de arena o material granular en el suelo. Estos drenes permiten que el agua se mueva más rápidamente hacia abajo reduciendo la presión en el suelo y mejorando su capacidad de soporte.

Drenes horizontales: se utilizan en terrenos con capas de suelo permeables y no permeables, los drenes horizontales se colocan a lo largo de la interfaz entre estas capas para permitir que el agua fluya lateralmente y se aleje del área de interés.

Zanjas de drenaje: son excavaciones lineales que se construyen a lo largo de una carretera u otra estructura para capturar y dirigir el agua lejos del área circundante, estas zanjas pueden estar revestidas con material filtrante para evitar la erosión del suelo.

Pozos de drenaje: se utilizan en excavaciones profundas para controlar el nivel freático y reducir la presión del agua en el suelo circundante, los pozos de drenaje suelen estar equipados con bombas para extraer el agua de forma continua.

Es importante seleccionar la técnica de drenaje adecuada según las características del suelo, la geometría del sitio y los requisitos del proyecto para garantizar una efectiva mejora del terreno (Lambe & Whitman, 2004).

2.2.5. Estabilización química

En el cual se aplican ciertos aditivos química para mejorar sus propiedades y comportamiento del suelo, esto es especialmente útil en suelos problemáticos, como arcillas dispersivas o suelos arcillosos difíciles de compactar.



En el caso de arcillas dispersivas, la estabilización química busca floccular las partículas de arcilla, es decir, agruparlas en estructuras más grandes y estables, esto ayuda a reducir su capacidad de expansión y contracción, así como su plasticidad, lo que mejora la estabilidad del suelo y evita problemas como la erosión y el agrietamiento.

En suelos arcillosos difíciles de compactar, el uso de aditivos químicos puede mejorar significativamente su comportamiento, esto facilita la densificación del suelo durante el proceso de compactación, lo que resulta en una mayor resistencia y estabilidad.

En resumen, la estabilización química del suelo es una herramienta útil para modificar sus propiedades y mejorar su comportamiento en diversas aplicaciones de ingeniería civil y construcción (Braja M. Das, 2013).

2.2.5.1. Estabilización con cal

Es comúnmente utilizada en la ingeniería civil para estabilizar el suelo. Efectivamente, la adición de cal es uno de los métodos más comunes y eficaces para mejorar las propiedades del suelo, especialmente aquellos con alta plasticidad, como las arcillas. Además, la cal puede reducir la susceptibilidad del suelo a los efectos del agua, lo que se refleja en una disminución de la expansión.

Esta técnica es especialmente efectiva en suelos cohesivos, donde la presencia de agua puede causar problemas de expansión y contracción al agregar cal, se estabilizan las partículas del suelo, lo que reduce estos problemas y mejora la capacidad del suelo para soportar cargas.



Además, la cal se puede utilizar en combinación con otros estabilizantes para obtener resultados aún más efectivos. Esta práctica se conoce como estabilización química y puede adaptarse a las necesidades específicas de cada proyecto.

En resumen, la estabilización con cal es una técnica versátil y efectiva para mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos y garantizar la estabilidad de las estructuras construidas sobre ellos (Montejo, 2002).

2.2.5.2. Estabilización con cemento

El proceso de estabilización del suelo con cemento ha sido fundamental en la ingeniería civil, especialmente en la construcción de infraestructuras.

Es efectiva en una variedad de condiciones, incluyendo suelos arenosos y arcillosos. Sin embargo, como mencionas, la eficacia puede variar según las propiedades geotécnicas específicas del suelo. Por ejemplo, efectivamente, la estabilización con cemento es una técnica ampliamente utilizada en suelos, especialmente en suelos arcillosos, y es particularmente eficaz cuando el suelo tiene características específicas como (LL) menor a (45-50) y un (IP) inferior a (25). Estas características del suelo influyen en su capacidad para mezclarse y reaccionar con el cemento de manera que mejore su resistencia y estabilidad.

La aplicación controlada de suelo y cemento, Carolina del Sur, marcó un hito en el desarrollo de técnicas de estabilización del suelo y



cemento, las bases para su uso generalizado en la construcción de infraestructuras modernas (Braja M. Das, 2013).

2.2.5.3. Estabilización con asfalto

Los asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas y alquitrán pueden proporcionar una serie de beneficios, depende del tipo de suelo y las condiciones del proyecto determinado.

El caso de suelos arenosos sin plasticidad, el asfalto actúa como un agente aglutinante, ayudando a unir las partículas de arena y proporcionando cohesión al suelo. Exactamente. Al combinar la dispersión de las partículas de arcilla mediante aditivos químicos con la fricción natural del suelo, se mejora la interacción entre las partículas, lo que aumenta la estabilidad del terreno.

Cuando se trata de suelos cohesivos, como los arcillosos, el uso de asfalto como estabilizante tiene un efecto diferente pero igualmente beneficioso. El asfalto tiene la capacidad de agrupar las partículas de arcilla, llenando los espacios vacíos entre ellas. Esto tiene un efecto de impermeabilización, ya que reduce la permeabilidad del suelo, impidiendo que el agua ingrese o salga fácilmente. Además, esta acción de impermeabilización protege el suelo tratado de los efectos adversos del agua, como la erosión y la expansión y contracción asociada con los ciclos de humedad y sequedad.

En resumen, el uso de productos bituminosos para estabilizar suelos ofrece una variedad de beneficios, incluida la mejora de la estabilidad, la capacidad de carga y la impermeabilización del suelo, lo que



contribuye a la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de las estructuras y carreteras construidas sobre estos suelos (Montejo, 2002).

2.2.5.4. Estabilización de suelos con ceniza volante

Esta ceniza, rica en componentes como sílice, alúmina y varios óxidos y álcalis, posee propiedades puzolánicas que le permiten reaccionar con la cal viva. La compactación del suelo estabilizado con ceniza y cal es un paso crucial en el proceso. Se debe llevar a cabo en condiciones controladas, asegurándose de que el suelo tenga la humedad adecuada para lograr una compactación óptima. La cantidad de humedad necesaria puede variar según las características del suelo y el clima local, por lo que es importante realizar pruebas de compactación para determinar la cantidad óptima de humedad para obtener la densidad deseada.

Una vez compactado, el suelo estabilizado con ceniza y cal puede proporcionar una base sólida y duradera para la construcción de carreteras, lo que ayuda a mejorar la resistencia al desgaste y la durabilidad de la carretera en general. Además, esta técnica también puede contribuir a la gestión sostenible de los residuos industriales, al reutilizar las cenizas volantes como un material de construcción útil en lugar de desecharlo (Braja M. Das, 2013).

2.2.6. Estabilización con aditivo Terrasil

Exacto. En conclusión, el aditivo químico terrasil utiliza un órgano-silano iónico que actúa de manera eficaz para estabilizar suelos problemáticos, especialmente en suelos arcillosos. Sus principales propiedades son, reducción de

la humedad, reducción de la expansión, eliminación de la capacidad de absorción y solubilidad en agua.

Generando una mejoría en cualquier tipo de suelo, condicionando al material que se comporte en cualquier situación en condiciones secas. (OptimaSoil, 2014).

A medida que el terrasil entra en contacto con los silicatos, los grupos silanol se enlazan con los minerales del suelo, formando enlaces estables. Por lo que, dependiendo de las características del suelo, este puede adquirir la capacidad de repeler la humedad y ser impermeable (Brem Enviromental Solutions, 2015).

También se trata de un organosilano de quinta generación que hoy en día utilizan mucho, facilitando la evaporación de la humedad del estudio donde se realizar.

2.2.6.1. Características físicas del aditivo Terrasil

La nanotecnología terrasil es un compuesto químico, consiste en el estabilizar el suelo así mejorar la estructura y las características del suelo, optimizando su comportamiento sin causar efectos adversos significativos. Este producto actúa modificando la estructura interna del suelo y promoviendo beneficios clave para diversas aplicaciones de ingeniería.

Tabla 2

Compuesto químico del terrasil

Compuesto del aditivo terrasil	
Organosilano iónico	65 % a 70 %
Alcohol bencilo	25 % a 27 %
Etanodiol	3 % a 5 %

Nota: Ficha Técnica Brem environmental solutions

Tabla 3

Descripción y características del terrasil

Características físicas y químicas	
Apariencia	Líquido
Aspecto	Rojo oscuro
Señal inflamación	> 90 grados Celsius (envase cerrado)
Señal ebullición	200 grados Celsius
Cualidad fulminante	Fulminante(no)
Viscosidad	1.02 gr/m ³ a 1.06 gr/m ³
Solubilidad	Mezclable con agua
PH (Disolución al 10%)	Neutra (ligeramente ácida)
Viscosidad (25°C)	100 cps a 500 cps

Nota: Ficha Técnica Brem environmental solutions

2.2.6.2. Dosificación

El parámetro indicado para el terrasil por Brem Environmental Solutions S.A.C. varían entre 0.2 Lt/m³ y 2 Lt/m³. Sin embargo, la solución definitiva se determina por medio de ensayos de laboratorio para el material en específico a mejorar sus propiedades (Brem Enviromental Solutions, 2015).

2.2.6.3. Beneficios

El uso de terrasil como aditivo estabilizador en suelos ofrece una amplia gama de beneficios: Mejora la resistencia y capacidad de soporte del suelo, aumenta el CBR. Reduce la plasticidad del suelo, haciéndolo más fácil de manejar y compactar. Disminuye el hinchamiento y mejora la estabilidad volumétrica. Permite la expulsión controlada de agua (transpiración), lo que ayuda a mantener un equilibrio en el contenido de humedad sin saturar el suelo, mejora el módulo resiliente, aumentando la capacidad del suelo para resistir cargas dinámicas, reduce el consumo de agua en la compactación, lo que mejora la eficiencia del proceso.

2.2.6.4. Modo de ejecución

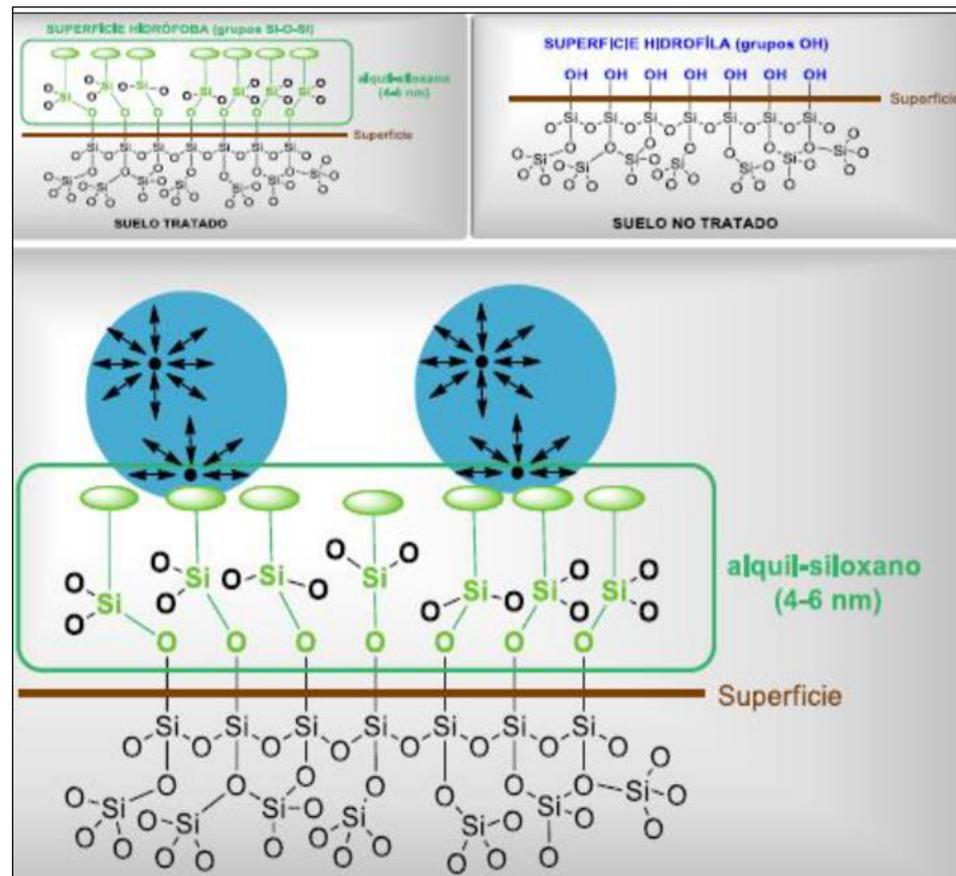
Terrasil es un aditivo eficaz que transforma las propiedades de los suelos, especialmente en aquellos con alta plasticidad o problemas de retención de agua, mejorando su rendimiento en aplicaciones de ingeniería civil y construcción.

Donde su función principal es impermeabilizar superficies de suelo tiene grupos silanol (Si-OH), que reaccionan con el silicio o silicatos presente en el suelo tratado, cambiando su superficie de suelo y originando la formación de enlaces de tipo siloxano (Si-O-Si), y generando así una membrana hidrofóbica y a consecuencia de ello las moléculas de agua son rechazadas por el suelo tratado, de esta manera se encuentra impermeabilizado la superficie de suelo tratado.

Los enlaces de tipo siloxano (Si-O-Si) son los más fuertes que existen en la naturaleza. Tiene como energía de enlace de 453 kJ/mol, lo que te determina durabilidad y fortaleza de las moléculas y cuando reaccionen con el agregado, no se produce el rompimiento del enlace, una vez que los compuestos que contienen siloxano, como los aditivos basados en terrasil, reaccionan con el agregado mineral del suelo, forman una red de enlaces estables que refuerzan la matriz del suelo, Dado que los enlaces Si-O-Si son altamente resistentes a fuerzas externas y procesos de degradación química, el suelo estabilizado mantiene sus propiedades mecánicas durante períodos prolongados, incluso en condiciones ambientales adversas, se puede ver en la figura 1.

Figura 1

Repulsión gotas de agua sobre tensión superficial por interacciones



Nota: Ficha Técnica Brem environmental solutions

La tensión superficial y las interacciones de polaridad entre el agua y el suelo son claves para entender cómo el agua se comporta sobre el suelo especificado, debido a que las superficies polares del suelo pueden interactuar con el agua, pero no pueden romper sus moléculas completamente (por la falta de enlaces de hidrógeno completos), el agua permanece adherida a la superficie del suelo en forma de gotas.

Esta interacción tiene un impacto significativo en la hidrodinámica del suelo y al ser controlada por aditivos como terrasil, puede mejorar la estabilidad del suelo y reducir su susceptibilidad a la humedad, estos conceptos son interpretados en la figura 1.

Figura 2

Comportamiento de las gotas de agua sobre suelos tratados con terrasil



Nota: Referencia de la ficha técnica Brem environmental solutions

En la figura 2, el uso de terrasil en la estabilización de suelos crea una superficie hidrófoba, lo que se refleja visualmente en el comportamiento de las gotas de agua, que permanecen sobre el suelo sin ser absorbidas, mostrando una repelencia completa.

2.2.6.5. Uso de terrasil en mejoramiento de vías

La aplicación de terrasil durante el tiempo de regado, seguida de un período de secado y posteriormente regar nuevamente, es una técnica efectiva para lograr un alto grado de compactación del suelo.

Este proceso permite alcanzar un grado de compactación superior al 95%, lo que es esencial para obtener una base sólida y resistente en proyectos de construcción y pavimentación y con el segundo regado se aseguran las micro fisuras en la superficie del suelo llegando a un 100 % de compactación (Brem Enviromental Solutions, 2015).

2.2.6.6. Presentación del aditivo Terrasil

Terrasil es un estabilizador de apariencia líquido que es soluble en agua, que se encuentran en distintos tipos de contenido, siendo el más utilizado el de 20 litros.

Figura 3

Aditivo estabilizador químico terrasil de 20 litros



Nota: Elaboración propia.

En la figura 3, se puede ver el contenido del aditivo químico terrasil de 20 litros, donde su presentación de la ficha técnica del aditivo terrasil está ubicado en el anexo 10.

2.2.7. Estudio de suelos en laboratorio

El primer paso en el proceso de estabilización y mejora de la subrasante es realizar un análisis detallado de sus propiedades mecánicas. Esto se logra mediante la toma de muestras representativas del suelo en el área donde se



ejecutará el proyecto, y mediante la realización de ensayos geotécnicos en laboratorio.

2.2.7.1. Contenido de humedad

El cálculo de la humedad de material de suelo es crítico en numerosos campos, desde la agricultura hasta la construcción. El proceso que has descrito es estándar en muchos laboratorios para evaluar la cantidad de agua presente en muestras de suelo.

El procedimiento implica secar muestra al horno a 105°C de temperatura, hasta que se elimina toda el agua libre del suelo. Esto se llama "peso constante". Una vez alcanzado este estado, el peso de la muestra seca se compara con el peso original de la muestra húmeda para determinar el contenido de humedad (Bowle, 1981).

Equipos:

- Recipientes en acero inoxidable o aluminio.
- Horno de temperatura constante 100 más/menos 5 °C
- Balanzas capacidad mínima 200 gr con una precisión - 0.01 gr.
- Muestra suelo representativo adecuadamente sin perder contenido de humedad.

Ecuación del C.H (%):

$$W (\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

W: C.H. En porcentaje (%).



W_w : Masa del suelo con húmedo.

W_s : Masa del suelo sin humedad.

2.2.7.2. Gravedad específica

La muestra se seca en un horno hasta obtener una masa constante, y se seleccionamos una muestra representativa, aproximadamente de 50 a 65 gr (MTC, 2000).

Determinar la masa del picnómetro limpio, seco y calibrado M_p . Luego se coloque la muestra en el picnómetro, se pesa la muestra y el picnómetro M_t . Determine la masa de espécimen seco al horno M_o . Llene el picnómetro con agua destilada hasta un nivel ligeramente superior al que se requiere para cubrir el suelo y sumergir la muestra de suelo por lo menos durante 12 horas.

Luego remueve el aire atrapado llene el picnómetro con agua destilada a la misma temperatura hasta la marca, luego seca con una tela limpia y seca, luego determine la masa del picnómetro lleno con suelo y agua M_b , se inserta un termómetro en agua y se determina la temperatura, el peso de la botella de gravedad específico y el líquido (M_a) y la temperatura (T_b), (MTC E 113, 2017).

Equipos:

- Picnómetro o frasco volumétrico de 250 o 500ml.
- Termómetro graduado en mediciones de 0.1°C.
- Pipeta.
- Mortero y mango.



- Aparato para la remoción de aire atrapado: mechero Bunsen o bomba de vacío.
- Balanza con sensibilidad de 0.01gr.
- Tamiz N° 8 (2.36mm), También puede usarse la N° 4 (4.75mm).
- Horno de temperatura constante de 110 más/menos 5 °C.
- Agua purificada.
- Muestra suelo secada al horno, tamizado malla N° 8.

Gs de la muestra fino se determina mediante de:

$$Gs(tb) = \frac{Mo}{Mo + Ma - Mb}$$

Donde:

Mo: Masa seco.

Ma: Masa del picnómetro y agua.

Mb: Masa del picnómetro, agua y suelo.

Tb: Temperatura °C.

Los valores de la gravedad específicas Gs, se basaron a una temperatura de aguas ah 20 °C.

$$Gs (20 °C) = K* Gs(tb)$$

Donde K factor de corrección de acuerdo a la tabla presentada

2.2.7.3. Análisis granulométrico

Preparación de los tamices: Primero, necesitarás una serie de tamices de diferentes tamaños de malla de 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8, N°10, N°16, N°20, N°30, N°40, N° 50, N°60, N°100, N°140 y N° 200. Estos tamices generalmente están hechos de acero



inoxidable y están calibrados según las normas ASTM o ISO. Como mencionaste, la serie suele ir desde tamices con aberturas grandes hasta tamices con aberturas muy pequeñas, como el tamiz número 200.

Preparación de la muestra: Lo primero es elegir una muestra adecuado y representativa y analizarlo correctamente, pero lo suficientemente pequeña como para pasar por los tamices más finos. Es importante homogeneizar la muestra para obtener resultados precisos.

Tamizado: Ordenar de manera adecuado los tamices de manera descendente según su número de malla. Asegúrate de que cada tamiz esté completamente asegurado y no haya fugas de material. Luego, somete la pila de tamices a agitación mecánica o manual durante un tiempo determinado para asegurar que todas las partículas de suelo pasen a través de los tamices adecuados.

Pesado de los retenidos: Después de la agitación, retira cada tamiz y pesa el material retenido en cada uno. Es importante anotar el peso de cada fracción retenida con precisión.

Cálculo de los porcentajes pasantes y acumulativos: Con los pesos de los retenidos en cada tamiz, puedes calcular los porcentajes de material que pasa a través de cada tamiz y los porcentajes acumulativos. Estos cálculos se realizan peso de los retenidos en cada tamiz entre en peso total y por 100.

Representación gráfica: Finalmente, puedes representar estos datos en un gráfico conocido como "curva granulométrica". En el eje adyacente se ubica tamaños moléculas de partículas (escala logarítmica) y en el eje



de las ordenadas se colocan los porcentajes pasantes o acumulativos. Conecta los puntos correspondientes a cada tamaño de partícula para obtener la curva granulométrica (MTC E 107, 2017).

Equipos:

- Balanzas calibradas.
- Tamices de mallas metálicas calibradas con aberturas de diferentes tamaños.
- Horno de temperatura constante de 110 más /menos 5 °C.
- Usos metal hermético y secador.
- Brocha y cepillo, para limpiar los tamices.
- Tamización mecánica.

2.2.7.4. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro

El tamaño de la muestra utilizada en el análisis por hidrómetro depende del tipo de suelo que se va a analizar, ya que las propiedades de los diferentes suelos afectan la cantidad de material necesaria para realizar el ensayo de manera precisa, para suelos arenosos: Se recomienda una muestra de 75 a 100 gr de peso seco y para limos y arcillas: Se recomienda una muestra de 50 a 60 gr de peso seco (MTC E 109, 2017).

Equipos:

- Las balanzas con diferentes sensibilidades.
- Malla de N°10 (2 mm) y N°200 (74 μm o 0.074).
- Un aparato agitador, ya sea mecánico o neumático
- Hidrómetro graduado, se identifica como 152 H.
- Cilindro de vidrio estándar.



- Termómetro con una apreciación de 0.5 °C.
- Horno de temperatura constante de 110 más /menos 5 °C
- Cronometro o reloj.
- El hexametafosfato de sodio es un agente dispersante.
- Agua destilada.

Profundidad efectiva L, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L = Hr + \frac{1}{2} \left(h - \frac{Vb}{A} \right)$$

Donde:

L: Profundidad efectiva.

Hr: Distancias correspondiente a la lectura R.

h: medida del punto inferior del bulbo hasta punta cuello.

Vb: El volumen picnómetro bulbo.

A: El área graduada del cilindro.

Peso de la muestra seca se calcula mediante de:

$$W_s = \frac{\text{masa del suelo húmedo}}{1 + \frac{\text{humedad}(w)}{100}}$$

La humedad (w) contenido de agua en la muestra de suelo.

La corrección por temperatura es un ajuste que se realiza en las
mediante una fórmula:

$$C_t = (\gamma_w 20 - \gamma_w T - \alpha (T - 20)) 10^3 \text{ gr/cm}^3$$

Donde:

T: T. de la suspen. en °C.

$\gamma_w 20$: P. U. Agua a 20 °C.



γ_w : Peso unitario del agua a T °C.

α : C. D. volumétrico del H. ($\alpha = 2,5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$).

Corrección por defl. se calcula de la siguiente fórmula:

$$C.\text{defl.} = r^{\circ} + C.\text{men.} \pm C.\text{temp.}$$

Donde:

r° : L. H. En agua

Cm: C. menisco.

Ct: C. temperatura.

Diámetro de partícula de suelo se determina mediante de:

$$D(\text{mm}) = k \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

L: P. Efec. cm.

t: T. Trans. min.

$$k = \sqrt{\frac{30u}{g(y_s - \gamma_w)}}$$

Donde:

g: A. Grav.: 980,7 cm/s².

u: C. Visco. Agua poises.

y_s : P. U. Sól. Suel. gr/cm².

γ_w : Pesos unitarios agua Desti. T. gr/cm³.

k: Función del peso específico y T. Tabla.

Porcentaje más fino se calcula mediante la siguiente fórmula:

Para hidrómetro 152 H.



$$P. + \text{fino} = \frac{100a}{W_o} * (R - Cd \pm Ct)$$

Donde:

Gs: P. E. Solidos.

Wo: Peso de la muestra del suelo secado al horno.

(R – Cd ± Ct): Hidrómetro C. menisco – C. Defloculante y punto cero, +

(S.A) C. temperatura.

2.2.7.5. Límites de consistencia

Propiedades fundamentales en la caracterización del material de suelos, particularmente en relación con su contenido de humedad.

Estos límites se definen mediante ensayos de laboratorio y son fundamentales para comprender cómo el suelo se comporta bajo diferentes condiciones (Braja M. Das, 2011).

2.2.7.6. Límite líquido

El estado plástico pasa a un estado líquido, se conoce como límite líquido (LL), cuando comienza a fluir bajo un esfuerzo mínimo. Se determina mediante del método de Casagrande (Braja M. Das, 2011).

Equipos:

- Destinatarios metálicos o de porcelana.
- Espátula o cuchara.
- Aparato de copa de Casagrande.
- Acanalador o ranurador.
- Recipientes.
- Balanza de presión de 0.01 gr.



- Malla N°40.
- Horno de temperatura constante de 110 más /menos 5 °C
- Agua purificada.
- Muestra secada al aire y tamizado por malla N° 40.

2.2.7.7. Límite plástico

Cuando el suelo de estado semisólido pasa a un estado plástico se conoce como el límite plástico (LP), es decir, cuando deja de comportarse como un sólido, pero aún no fluye. Se determina utilizando el ensayo del método de la copa de Casagrande (Braja M. Das, 2011).

Equipos:

- Recipiente y espátula
- Balanza con precisión a 0.01gr.
- Malla N° cuarenta.
- A. Desti. Purificada.
- Recipientes o tara adecuados.
- Vidrio grueso esmerilado.
- Horno de temperatura constante de 110 más/menos 5 °C.
- Muestra secada al aire y tamizado por malla N° 40.

2.2.7.8. Índice de plasticidad

Es la desigualdad del límite líquido (LL) y entre límite plástico (LP). Indica la plasticidad del suelo, es decir, la capacidad del suelo para deformarse sin fracturarse (Braja M. Das, 2011).

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad.

LL: Límite líquido.

LP: Límite plástico.

Tabla 4

Plasticidad y clasificación

ÍP	Maleabilidad	Condición
$20 < IP$	Alta	Muy arcilloso el suelo
$7 < IP \leq 20$	Media	Arcilloso el suelo
$7 > IP$	Baja	Poco arcilloso el suelo
$0 = IP$	(NP)	Suelos no arcillosos

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)

2.2.7.9. Proctor modificado

La compactación del material de suelo mediante el ensayo proctor modificado es muy importante las propiedades geotécnicas, especialmente para resistir cargas superficiales y su resistencia a la deformación. La determinación de la MDS en asociado al CHO permite establecer las condiciones ideales de compactación para lograr la máxima densidad seca, lo que a su vez optimiza la capacidad portante y la estabilidad.

La realización del ensayo compactación de proctor modificada se realiza con el molde estándar metal, 943.3 cm³ de volumen, utilizando el método (A) y (B), y para el molde de 2124 cm³ de volumen, utilizando el método (C), por lo tanto, se compactado el suelo en cinco capas iguales y proporcionadas por un igual con el martillo de peso 44.5 N (peso de 4.536 kg) y donde caída libre es de 457.2 mm de altura. El número de golpes de martillo para cada capa es de 25 para el método A, 25 para el método B, y 56 golpes para el método C. La energía de compactación por unidad de



volumen de suelo en la prueba modificada es 2696 kN-m/m³ (Braja M. Das, 2013)

Equipos:

- Moldes para el método A y B, de 4 pulg. o método C, de 6 pulg.
- Martillo de compactación manual o mecánico de 44.5 N.
- Cuchara para extracción de material.
- Balanza de precisión 0.1 gr y de 0.01 gr.
- Horno estándar para el secado a 110 más/ menos 5 °C.
- Regla metálica acerado.
- Tamiz: N° 4 o (4.75 mm), N° 3/8" o (9.5 mm) y N° 3/4" o (19.0 mm).
- Probeta graduada de vidrio de 1000 mililitros y 100 mililitros.

2.2.7.10. Valor de soporte california (CBR)

El CBR, es un ensayo estándar utilizada a determinar la resistencia del suelo, esta prueba evalúa la capacidad de soporte relativa del suelo bajo condiciones específicas de compactación y humedad. Preparación de la muestra: Se prepara una muestra representativa del suelo que se va a evaluar, esta muestra se compacta según un método específico para alcanzar una densidad máxima seca. Condición de humedad óptima: La muestra se humedece para alcanzar una humedad óptima, esto se logra mediante un proceso de ajuste de la humedad, que puede requerir agregar agua o permitir que la muestra se seque hasta alcanzar el nivel deseado.

Interpretación del resultado: El CBR se utiliza para evaluar la capacidad de soporte del suelo, valores más altos de CBR indican una mayor resistencia del suelo, el valor de CBR indica la resistencia del suelo



a la penetración bajo una carga determinada, comparada con la resistencia de una muestra estándar de grava, este valor es crucial para determinar la idoneidad de un suelo como material para bases y subbases de pavimentos, cimientos de edificios y otras estructuras que requieran una evaluación de la capacidad de carga del terreno (MTC E 132, 2017).

Equipos:

- Máquina penetración, se debe aplicar una velocidad constante de 1.27 mm/min, debe tener una capacidad superior de 44.5 kN y la mínima es de 44 N.
- Molde diámetro 152.4 mm o de 6” pulgadas.
- Disco de pesas espaciador o anillo de cargas.
- Martillo de compactación o pisón de 10 lb, y la altura de caída 18” pulgadas.
- Vástago puesto en el CBR de plato.
- Dial indicador.
- Sobrecargas, peso típico 4.54 kg (10 libras) anulares y peso típico 2.27 kg (5 libras) ranuradas para CBR.
- Pistón de ensayo de penetración: el área de sección transversal es 19.35 cm² (equivalente a 3 pulgadas cuadradas) de sección circular de acero.
- Aparato de medición balanzas calibrada, horno, mallas, papel filtro, depósito de aguas, cronómetro de medición, dial, probeta vidrio graduada, cámara fotográfica, entre otros.

El número CBR (California Bearing Ratio) se calcula como la relación de la carga unitaria necesaria para que un pistón de penetración (con un área específica de 19.4 cm²) ingrese a una cierta profundidad en el



suelo preparado, en comparación con la resistencia unitaria patrón requerido para penetrar a la misma profundidad en un material de roca triturada (Bowle, 1981).

CBR se calcula como:

$$CBR = \frac{(carga\ unitaria\ del\ ensayo)}{(carga\ unitaria\ patron)} \times 100$$

En este caso, parece que estás describiendo cómo el CBR se calcula utilizando cargas para dos profundidades específicas de penetración: 2.54 mm o 0.1 pulgadas y 5.08 mm o 0.2 pulgadas, estas profundidades son estándar en el ensayo de CBR. La relación carga medida en el suelo es la fuerza (en kN o lb) necesaria para que el pistón penetre la muestra compactada y la carga estándar del material patrón es la fuerza correspondiente para penetrar el material patrón a la misma profundidad. determina el valor del CBR para el suelo en cuestión, las lecturas de carga de puede ver en la tabla 5.

Tabla 5

Lectura de carga de ensayo

Milímetros	Pulgadas
0.63	0.025
1.27	0.050
1.90	0.075
2.54	0.100
3.17	0.125
3.81	0.150
5.09	0.200
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Nota: Manual de ensayo de Materiales (MTC, 2017)



El procedimiento descrito es típico en ensayos de laboratorio para determinar el índice de soporte califonia CBR de un suelo. Aquí hay una descripción de los pasos:

Preparación del espécimen: Se prepara una muestra representativa del suelo que se desea evaluar, esta muestra se moldea en una forma específica y se compacta según un estándar definido.

Saturación del espécimen: La muestra compactada se sumerge en tanque de agua en este caso 96 horas o 4 días. Durante este tiempo, el suelo se satura completamente de agua, la sobrecarga aplicada emula el peso del pavimento que se tendrá en el lugar donde se utilizará el suelo.

Registro de la expansión: Durante el período de saturación, se registran mediciones de la expansión del suelo en momentos aleatorios utilizando un deformímetro, esto ayuda a cuantificar cómo cambia el volumen del suelo bajo condiciones de saturación, es importante anotar la lectura del deformímetro, la fecha y la hora de cada medición.

Penetración del espécimen: Después de las 96 horas de saturación, se somete el espécimen a una prueba de penetración, luego se lectura y se mide la resistencia, utiliza para calcular el índice de soporte califonia CBR del suelo bajo condiciones de saturación completa.

Este procedimiento es esencial para calcular la capacidad de un suelo para soportar cargas superficiales de estructuras, bajo condiciones de saturación. Es fundamental en el diseño de pavimentos, ya que permite garantizar la estabilidad y durabilidad.

2.2.7.11. Compresión simple

Este ensayo, se aplican cargas axiales gradualmente a una muestra de suelo, ya sea en forma de cilindro o prisma, hasta que la muestra llega a fallar. La carga máxima que la muestra puede soportar antes de la falla se registra como la resistencia a la compresión simple.

Es importante tener en cuenta si las muestras están en estado inalterado o remoldeadas, ya que esto puede influir en los resultados del ensayo debido a posibles cambios en la estructura del suelo. Las muestras inalteradas conservan principio del formulario las características naturales del suelo tal como se encuentran en la naturaleza, mientras que las muestras remoldeadas pueden haber sido sometidas a algún tipo de manipulación que altera su estructura original (MTC E 121, 2017).

Donde la relación de la longitud y el diámetro de la muestra de espécimen deben ser suficientemente grande para evitar interferencias de planos potenciales de falla a 45° y también suficientemente corta para no obtener falla de columna (Bowe, 1981).

La relación L/d en el rango de $2 < L/d < 3$ es típicamente utilizada para satisfacer criterios específicos en pruebas geotécnicas y diseños estructurales.

Equipos:

- Máquina de carga para compresión uniaxial.
- Dial para indicador de carga a 0.0001” pulgadas
- Balanza calibrada.
- Molde inalteradas, remoldeadas para la muestra suelo.

- Equipo de laboratorio para determinar la densidad y humedad.

En la tabla 6, se tiene una guía de la norma técnicas peruana sobre cómo se interpreta los resultados (MTC E 121, 2017).

Tabla 6

Firmeza del suelo

Firmeza del suelo	Resistencia (UCS)	
	kg/cm ²	(kPa)
Muy blanda	< 0.25	(< 25)
Blanda	0.25 - 0.50	(25 - 50)
Mediana	0.50 - 1.00	(50 - 100)
Firme	1.00 - 2.00	(100 - 200)
Muy firme	2.00 - 4.00	(200 - 400)
Dura	> 4.00	(> 400)

Nota: Manual de ensayo de Materiales (MTC, 2017)

2.2.8. Estudios de tránsito

El estudio de tránsito es fundamental en el diseño de pavimentos debido a que proporciona datos cruciales para estimar la carga que soportará la estructura. El índice medio diario anual (IMDa) es el parámetro principal obtenido de estos estudios, el cual indica la cantidad de vehículos que circulan o se espera que circulen sobre el pavimento en un día promedio.

Para obtener el IMDa, se realizan conteos de vehículos clasificados según su tipo, que incluyen automóviles simples, camionetas, buses y camiones, estos últimos diferenciados por el número de ejes que tienen. Es importante clasificar correctamente los vehículos porque la carga que transmiten al pavimento varía según su tamaño y número de ejes.

Según Montejo, efectivamente existen dos métodos principales para estimar el volumen de tránsito o IMDa (Índice Medio Diario Anual) de la vía que



se va a diseñar: Estudio directo en la ubicación de la nueva vía, este método consiste en realizar un estudio de tránsito directamente en el sitio donde se planea construir la nueva vía. Utilizar los valores de tránsito en una vía alterna a la que se pretende diseñar, en caso de que no sea posible o práctico realizar un estudio directo en el sitio, se puede recurrir a este método, que implica tenga características similares a la vía que se va a diseñar (por ejemplo, tipo de carretera, ubicación geográfica, tipo de tráfico, etc.) o utilizar los datos de tránsito de la vía alterna para estimar el IMDa de la nueva vía (Montejo, 2002).

2.2.9. Pavimento

Exactamente, la estructura de un pavimento está determinado para soportar las cargas generadas por el tráfico vehicular.

La subrasante o terreno de fundación, juega un papel crucial en esta resistencia debe tener propiedades mecánicas adecuadas, como resistencia a la compresión y estabilidad, para sostener las capas superiores del pavimento y distribuir las cargas de manera uniforme, la selección y preparación adecuada del material de subrasante es fundamental para garantizar la durabilidad y el rendimiento del pavimento (Montejo, 2002).

2.2.9.1. Pavimentos flexibles

También denominados pavimentos asfálticos, están conformados por una carpeta asfáltica apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub base (Minaya y Ordoñez, 2006)



2.2.9.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos de concreto son comúnmente denominados rígidos, precisamente por la naturaleza de la losa de concreto que los compone.

La losa de concreto distribuye y disipa los esfuerzos de carga de manera eficiente, lo que significa que menos esfuerzos se transmiten a las capas inferiores del pavimento y, finalmente, a la subrasante. Esta capacidad de absorción de esfuerzos es una de las ventajas clave de los pavimentos de concreto en comparación con los pavimentos flexibles, que distribuyen los esfuerzos de manera diferente debido a su naturaleza menos rígida (MTC, 2014).

2.2.9.3. Pavimentos semirrígidos

En resumen, los pavimentos semirrígidos son más adecuados para tráfico intensos y condiciones donde se requiere una mayor resistencia estructural, mientras que los adoquines de concreto son más apropiados para áreas urbanas o pobladas con tráfico más ligero, ofreciendo además una apariencia estética distintiva (MTC, 2014).

2.2.10. Diseño de pavimentos flexibles empleando AASHTO 93

Es un procedimiento se refiere modelos que fueron determinados en fusión de los pavimentos, donde se calcularon cargas de los vehiculares y resistencia de la subrasante.

El número de estructuras es esencialmente una medida de la capacidad estructural del pavimento para resistir las cargas aplicadas por el tráfico, para

calcular generalmente se tienen en cuenta varios factores, como el tipo de suelo de la subrasante, el volumen y la composición del tráfico esperado, así como las características de los materiales de construcción utilizados en las capas del pavimento (MTC, 2014).

La ecuación de diseño empírico utilizada en la metodología AASHTO 93 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) se aplica para el diseño de pavimentos flexibles y se enfoca en determinar el número de repeticiones de carga o el número de estructuras de tráfico (también conocido como número de cargas equivalentes de 80 kN, o ESALs, por sus siglas en inglés) que una carretera debe soportar durante su vida útil.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Donde:

SN: N. Estructural.

W_{18} : Numero EE.

Z_R : Desviación normal.

S_o : Error estándar efecto tránsito.

ΔPSI : Variación serviciabilidad.

M_R : M. resiliencia subrasante.

2.2.10.1. Periodo de diseño

Para caminos de bajo volumen de tránsito, es común utilizar un período de diseño de hasta 10 años. Sin embargo, dado que mencionas la posibilidad de períodos de diseño por dos etapas de 10 años o un período de diseño en una etapa de 20 años (MTC, 2014).

2.2.10.2. Transito

El cálculo EE (también conocido como ESALs, por sus siglas en inglés, Equivalent Single Axle Loads) de 8.2 tn (18000 lb o 80 kN) se refiere a la cantidad de repeticiones de carga equivalente de un eje de un vehículo que tiene un peso total de 8.2 tn. Este valor se determina a partir de estudios de tráfico que analizan el tipo y volumen de vehículos que pasarán por la carretera durante su vida útil esperada, esto puede ser importante en el diseño y la evaluación de la resistencia de los materiales utilizados en la construcción de carreteras y pavimentos (MTC, 2014).

2.2.10.3. Módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia (M_R) es el parámetro utilizado con el fin de representar las propiedades geotécnicas de los suelos de la subrasante en el diseño de pavimentos flexibles (Montejo, 2002).

El ensayo de módulo de resiliencia evalúa la capacidad del suelo para recuperar su forma original después de ser sometido a cargas repetidas, esto es crucial en el diseño y la construcción de carreteras y pavimentos, ya que un suelo con alta resiliencia tiende a soportar mejor las cargas del tráfico sin deformarse permanentemente (MTC, 2014).

$$M_R(\text{psi}) = 2555 \times CBR^{0.64}$$

2.2.10.4. Tipo de tráfico

Es el diseño de pavimentos flexibles, los manuales suelen dividir las categorías en función de diversos factores como el volumen de tráfico, estas categorías suelen ser:



Categoría liviana: Caminos de tránsito de valor (75,000 a 1,000,000) EE, en el carril y durante un período de diseño.

Categoría media: Caminos de tránsito de valor (1,000,001 a 30,000,000) EE, en el carril y durante un período de diseño.

Categoría pesada: Caminos que tienen un tránsito mayor a 30,000,000 EE, en el carril y durante un período de diseño (MTC, 2014).
A continuación, se indican los diferentes tipos de tráfico, esto se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7

Magnitud de ejes equivalentes para tipo circulación

Clase de tráfico en función de EE	Condición de tráfico en función en EE
<i>TP5</i>	(> 1000,000 ≤ 150,000) EE
<i>TP6</i>	(> 1500,000 ≤ 3,000,000) EE
<i>TP7</i>	(> 3,000,000 ≤ 5,000,000) EE
<i>TP8</i>	(> 5,000,000 ≤ 7,500,000) EE
<i>TP9</i>	(> 7,500,000 ≤ 10,000,000) EE
<i>TP10</i>	(> 10,000,000 ≤ 12,500,000) EE
<i>TP11</i>	(> 12,500,000 ≤ 15,000,000) EE
<i>TP12</i>	(> 15,000,000 ≤ 20,000,000) EE
<i>TP13</i>	(> 20,000,000 ≤ 25,000,000) EE
<i>TP14</i>	(> 25,000,000 ≤ 30,000,000) EE
<i>TP15</i>	(>30,000,000)

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)

2.2.10.5. Factor de confiabilidad

R, representa la probabilidad de que una estructura cumpla con las expectativas de comportamiento durante su período de diseño, es decir, que resista las cargas y condiciones de servicio según lo previsto. Este enfoque busca garantizar que las estructuras sean lo suficientemente

seguras y confiables para su uso previsto a lo largo de su vida útil (MTC, 2014). A continuación, se indican los factores de confiabilidad para los diferentes tipos de tráfico, esto se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8

Factor de confiabilidad en porcentaje

Clase carretera	Circulación	EE acumulados		Confiabilidad (R)
Carretera bajo volumen de tránsito	TP0	(75,000	150,000)	65%
	TP1	(150,001	300,000)	70%
	TP2	(300,001	500,000)	75%
	TP3	(500,001	750,000)	80%
	TP4	(750,001	1,000,000)	80%
Restos de carretera	TP5	(1,000,001	1,500,000)	85%
	TP6	(1,500,001	3,000,000)	85%
	TP7	(3,000,001	5,000,000)	85%
	TP8	(5,000,001	7,500,000)	90%
	TP9	(7,500,001	10,000,000)	90%
	TP10	(10,000,001	12,500,000)	90%
	TP11	(12,500,001	15,000,000)	90%
	TP12	(15,000,001	20,000,000)	95%
	TP13	(20,000,001	25,000,000)	95%
	TP14	(25,000,001	30,000,000)	95%
	TP15	(>30,000,000)		95%

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014).

2.2.10.6. Desviación estándar normal

Zr, es un parámetro clave en el diseño de pavimentos y representa el valor asociado al nivel de confiabilidad seleccionado en una distribución normal. Este coeficiente indica cuántas desviaciones estándar está un punto de la media en términos de probabilidad, y se relaciona directamente con el nivel de confiabilidad deseado en el diseño (MTC, 2014). A

continuación, se indican la desviación estándar normal para los diferentes tipos de caminos, esto se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9

Coefficiente estadístico de desviación estándar normal

Clase carretera	Circulación	EE acumulados		Desviación estándar normal (Zr)
Carretera bajo volumen de tránsito	TP0	(75,000	150,000)	-0.385
	TP1	(150,001	300,000)	-0.524
	TP2	(300,001	500,000)	-0.674
	TP3	(500,001	750,000)	-0.842
	TP4	(750,001	1,000,000)	-0.842
Restos de carretera	TP5	(1,000,001	1,500,000)	-1.036
	TP6	(1,500,001	3,000,000)	-1.036
	TP7	(3,000,001	5,000,000)	-1.036
	TP8	(5,000,001	7,500,000)	-1.282
	TP9	(7,500,001	10,000,000)	-1.282
	TP10	(10,000,001	12,500,000)	-1.282
	TP11	(12,500,001	15,000,000)	-1.282
	TP12	(15,000,001	20,000,000)	-1.645
	TP13	(20,000,001	25,000,000)	-1.645
	TP14	(25,000,001	30,000,000)	-1.645
	TP15	(>30,000,000)		-1.645

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014).

2.2.10.7.Desviación estándar combinado

So, es un parámetro estadístico utilizado en el diseño de pavimentos, particularmente en la metodología AASHTO 93, para representar la variabilidad conjunta de los diferentes factores que influyen en el desempeño del pavimento. En la realidad la guía AASHTO 93, recomienda adoptar para los pavimentos flexibles, valores de (S_o) comprendidos entre 0.40 y 0.50, en el presente manual (MTC, 2014) se adopta para los diseños recomendados el valor de 0.45.

2.2.10.8. Índice de serviciabilidad inicial según rango de tráfico

Pi, es una métrica que describe la condición funcional de una vía, justo después de su construcción, rehabilitación o reconstrucción. Es un parámetro del diseño de pavimentos, ya que se utiliza para evaluar la calidad y comodidad inicial que el pavimento ofrece a los usuarios.

La serviciabilidad inicial se determina mediante la evaluación de varios parámetros, como la rugosidad, la textura superficial, la uniformidad del pavimento y otros indicadores de calidad. Es importante tener en cuenta la serviciabilidad inicial, como referencia para comparar el estado futuro de la vía a medida que envejece y se somete al desgaste y muchas cosas más (MTC, 2014), esto se puede observar en la tabla 10.

Tabla 10

Circulación según serviciabilidad inicial

Clase carretera	Circulación	EE acumulados		Serviciabilidad inicial (Pi)
Carretera de bajo volumen de tránsito	TP0	(75,000	150,000)	3.80
	TP1	(150,001	300,000)	3.80
	TP2	(300,001	500,000)	3.80
	TP3	(500,001	750,000)	3.80
	TP4	(750,001	1,000,000)	3.80
Restos de carretera	TP5	(1,000,001	1,500,000)	4.00
	TP6	(1,500,001	3,000,000)	4.00
	TP7	(3,000,001	5,000,000)	4.00
	TP8	(5,000,001	7,500,000)	4.00
	TP9	(7,500,001	10,000,000)	4.00
	TP10	(10,000,001	12,500,000)	4.00
	TP11	(12,500,001	15,000,000)	4.00
	TP12	(15,000,001	20,000,000)	4.20
	TP13	(20,000,001	25,000,000)	4.20
	TP14	(25,000,001	30,000,000)	4.20
	TP15	(>30,000,000)		4.20

Nota: Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.

2.2.10.9. Índice de serviciabilidad final según rango de tráfico

Es un término utilizado en el pavimento para describir la condición de una carretera que ha llegado a un punto en el que requiere algún tipo de rehabilitación o reconstrucción para mantener su funcionalidad y seguridad.

Esta condición se determina mediante la evaluación de varios parámetros, como la rugosidad, el agrietamiento, la deformación y otros indicadores de deterioro. Cuando una carretera alcanza su serviciabilidad terminal, se hace necesario tomar medidas para mejorar su estado y prolongar su vida útil (MTC, 2014), esto se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11

circulación según serviciabilidad final

Clase carretera	Circulación	EE acumulados		Serviciabilidad final (Pt)
Carretera de bajo volumen de tránsito	TP0	(75,000	150,000)	2.00
	TP1	(150,001	300,000)	2.00
	TP2	(300,001	500,000)	2.00
	TP3	(500,001	750,000)	2.00
	TP4	(750,001	10,00,000)	2.00
Restos de carretera	TP5	(1,000,001	1,500,000)	2.50
	TP6	(1,500,001	3,000,000)	2.50
	TP7	(3,000,001	5,000,000)	2.50
	TP8	(5,000,001	7,500,000)	2.50
	TP9	(7,500,001	10,000,000)	2.50
	TP10	(10,000,001	12,500,000)	2.50
	TP11	(12,500,001	15,000,000)	2.50
	TP12	(15,000,001	20,000,000)	3.00
	TP13	(20,000,001	25,000,000)	3.00
	TP14	(25,000,001	30,000,000)	3.00
	TP15	(> 30,000,000)		3.00

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)



a. Diferencia de serviciabilidad según rango de tráfico

Se calcula como la desigual de serviciabilidad inicial (P_i) entre serviciabilidad terminal (P_t).

2.2.11. Numero de estructura

Entiendo que estás describiendo un proceso de diseño de pavimentos utilizando la metodología AASHTO 93, representa el número estructural del espesor total del pavimento.

Luego, este número estructural se convierte en el espesor efectivo de cada una de las capas del pavimento (rodadura, base y subbase) utilizando coeficientes de estructura (MTC, 2014). Este cálculo se obtiene de la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 * d_1 + a_2 * d_2 * m_2 + a_3 * d_3 * m_3$$

Donde:

a_1, a_2, a_3 : Factores estructurales de las capas

d_1, d_2, d_3 : Espesores de las capas

m_2, m_3 : Factores de drenaje para las capas de base y subbase,

a. Coeficiente de capa a_i

Es el coeficiente de capa expresa una relación empírica entre el número estructural y el espesor (MTC, 2014). A continuación, se indican coeficiente de capa a_1 , para las diferentes capas superficiales, esto se puede observar en la tabla 12, 13 y 14.

Tabla 12*Coefficiente de la capa estructural para pavimentos*

Capa superficial	Factor	Valor del factor a_i (cm)	Observación
Carpeta asfáltica caliente, módulo elasticidad 2965 Mpa o 430000 PSI a 20°C o 68°F	a_1	0.170 / cm	Para toda clase de tráfico recomendó capa superficial

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)

Tabla 13*Coefficiente de la capa estructural para pavimentos*

Base	Factor	Valor del factor a_i (cm)	Observación
Una base granular con un CBR 80%, compactada al 100% de la MDS mediante proctor modificado	a_2	0.052 / cm	Capa de base recomendada para tráfico ≤ 5000000 EE

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)

Tabla 14*Coefficiente de la capa estructural para pavimentos*

Sub Base	Factor	Valor del factor a_i (cm)	Observación
Una sub base granular con un 40 % CBR, compactada al 100 % de la MDS mediante proctor modificado	a_3	0.047 / cm	Capa de Sub Base recomendada para tráfico $\leq 15'000,000$ EE

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)

b. Coeficiente de drenaje

El coeficiente de drenaje (m_i) en el diseño de pavimentos está relacionado con dos variantes fundamentales:



La calidad del drenaje se refiere a la rapidez con la que el agua se evacua de las capas de las estructuras y la saturación es el porcentaje del periodo en que las capas de las estructuras están expuestas a constante de humedad cercanos a la saturación durante el año.

Sí, en muchos casos, los manuales de diseño de pavimentos, como el manual de carreteras o el AASHTO 1993, simplifican el cálculo asignando un coeficiente de drenaje (m_i) de 1.00 para las capas de base y subbase granular. Esto se aplica principalmente cuando las condiciones de drenaje son consideradas promedio y la exposición a la saturación no es extrema. (MTC, 2014).

El coeficiente de drenaje (m_i) es un factor utilizado en el diseño de pavimentos flexibles para ajustar las propiedades estructurales de las capas de bases y subbases granulares, dependiendo de las condiciones de humedad y drenaje a las que están expuestas durante su vida útil. Este coeficiente refleja la eficacia del sistema de drenaje y la duración durante la cual las capas permanecen en condiciones óptimas.

También está clasificada según el tiempo que tarda en evacuar el agua según eso se clasifica: Excelente de menos de 2 horas para eliminar el agua, buena de 2 a 24 horas, regular de 1 a 7 días y pobre más de 7 días.

Exposición a la saturación: Baja exposición (< 5 % del año) de materiales rara vez saturados, moderada (5 % - 25 % del año) de periodos limitados de saturación y alta (> 25 % del año) de frecuente saturación (MTC, 2014).

CAPÍTULO III

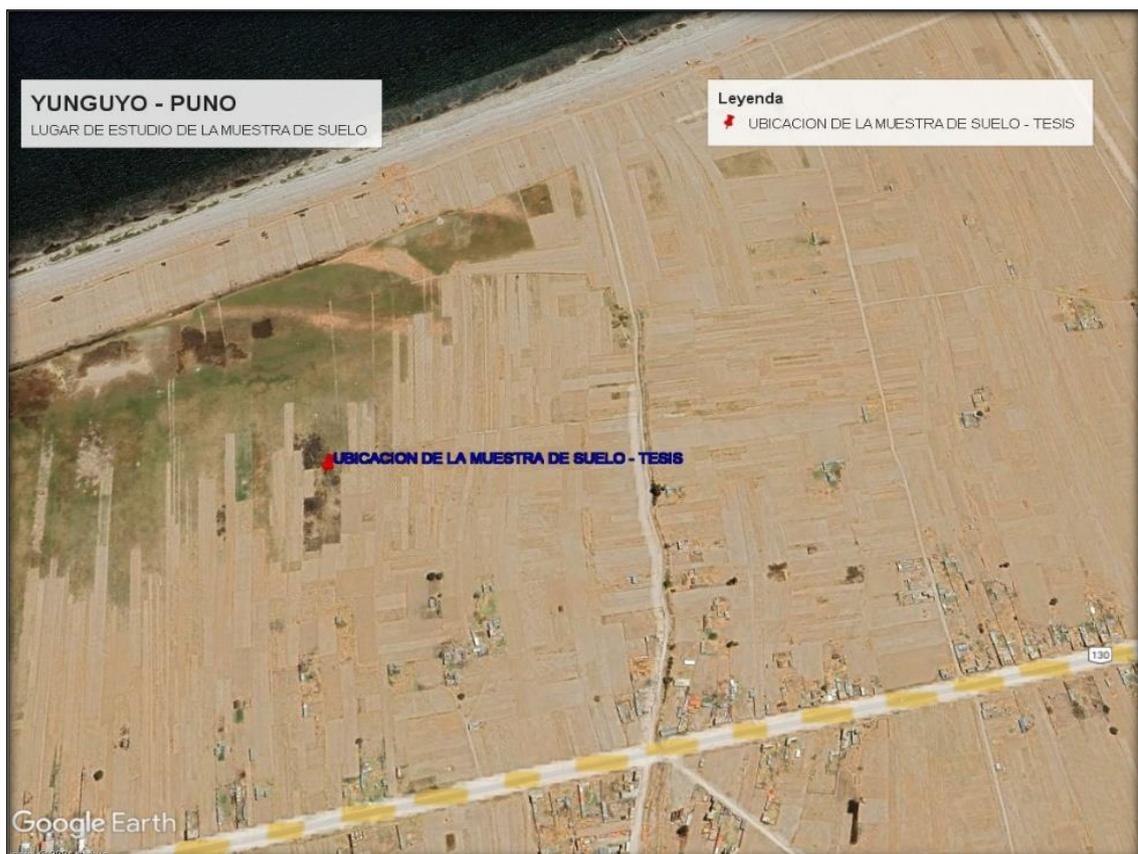
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

La localización del material de suelo, está en el Km 01+000 de la carretera Yunguyo – Puno, ubicado en la provincia de Yunguyo, departamento de Puno, la muestra de suelo se obtuvo de una sola calicata. UTM son: Este: 485958.63 m E, Norte: 8203219.34 m S, Zona: 19 L.

Figura 4

Localización geográfica del estudio



Nota: Google Maps, 2024.

En la imagen de figura 4, se observa el lugar de excavación de muestra de suelo, para mi proyecto de investigación.

Figura 5

La muestra de suelo es extraída a un lado Km 01+000 de la carretera Yunguyo - Puno



Nota: Elaboración propia.

En la imagen de la figura 5, se observa el lugar de donde extrajo el material del suelo natural para los ensayos.

3.2. MATERIALES A UTILIZAR

3.2.1. Suelo

La muestra de suelo es fino arenoso limoso, donde se utilizará para esta investigación, la muestra de suelo se obtuvo de una sola calicata ubicada a un lado del Km 01+000 en la carretera Yunguyo – Puno. La muestra fue extraída de una de 1.5 m de profundidad por debajo del NF del suelo natural, de un aproximado de 120 kg. Se determinó por la cantidad de números de ensayos que realizara, donde presenta las siguientes propiedades geotécnicas que los resultados fueron obtenidos en laboratorio, todo el resultado se ve en la tabla 15.

Tabla 15*Resultados de las propiedades de la muestra de suelo natural*

Propiedades	Resultado
Gravedad específica	2.67 GS
Contenido de humedad	24.18 %
Ensayo de plasticidad	
Límite líquido (LL)	28.78 %
Límite plástico (LP)	22.22 %
Índice de plasticidad (IP)	6.57 %
Clases de suelo	
Suelo SUCS	SM
Suelo AASHTO	A-2-4
Ensayo compactación	
MDS	1.862 g/cc
CHO	12.15 %
Ensayo	
CBR	9.23 %
Expansión	1.26 %
Resistencia a la compresión no confinada, UCS	0.029 kg/cm ²

Nota: Elaboración propia

3.2.2. Terrasil

El uso de terrasil parece ser una solución efectiva para mejorar la calidad y estabilidad del suelo. Al emplear un organosilano iónico, tiene la capacidad prevenir el abultamiento del suelo, rechazar el agua y la absorción excesiva de humedad en el suelo. A continuación, se presenta los compuestos del aditivo químico terrasil, se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16*Compuesto químico terrasil*

Compuesto del aditivo terrasil	
Organosilano Iónico	65 % a 70 %
Alcohol Bencilo	25 % a 27 %
Etanodiol	3 % a 5 %

Nota: Ficha Técnica Brem environmental solutions

3.3. LUGAR DEL MATERIAL A UTILIZAR

3.3.1. Lugar de la muestra de suelo

El material fino arenoso limoso, se extrajo de una sola calicata ubicado en un lado del Km 01+000 de la carretera Yunguyo – Puno.

3.3.2. Lugar de obtención del Terrasil

Fue adquirido (Brem Environmental Solutions S.A.C.) donde es proveedor del aditivo terrasil en el Perú. Se ubica en la capital Lima, en la avenida parque de las leyendas numero 210 la torre A - oficina 802, San Miguel, lima – Perú.

Tabla 17

Descripción y características del terrasil

Las propiedades físicas y químicas	
Apariencia	Líquido
Aspecto	Rojo oscuro
Inflamación	> 90 grados Celsius
Ebullición	200 grados Celsius
Explosiva	Explosivo no
Viscosidad	1.02 gr/cm ³ a 1.06 gr/cm ³
Solubilidad	Mezclable con agua
PH (Disolución al 10 %)	Neutra (ligeramente ácida)
Viscosidad (25°C)	100 cps a 500 cps

Nota: Ficha Técnica Brem environmental solutions

Se observa que la tabla 17, son los valores de la propiedad física y química del terrasil que se utiliza en este proyecto de investigación.

3.4. ENSAYO DE LABORATORIO DE LA SUBRASANTE PARA USO VÍAS DEL SUELO NO TRATADO

Una vez extraído el material de suelo de una sola calicata, se determinaron los ensayos de laboratorio.



3.4.1. Gravedad específica

En este caso se utilizaron una cantidad de material de suelo requerida de 45 gr de muestra seca para cada ensayo que se realizara, donde se hicieron dos ensayos respectivamente. Lo primero es introducir el suelo seco de 45 gr al picnómetro y luego ponemos agua destilada hasta el nivel de 1/3 de altura del picnómetro, luego levemente agitamos y lo dejamos saturar el suelo. Se extrae el aire atrapado luego de la suspensión suelo y agua utilizando una bombilla o puede ser por calentamiento (ebullición) por un tiempo determinado.

Luego llenamos con agua destilada al picnómetro con embudo hasta la marca de calibración, luego ubicamos el picnómetro en un lugar seguro con temperatura constante, luego secamos, y anotamos el peso del picnómetro más suelo fino y el agua en la balanza y colocamos termómetro para saber a qué temperatura esta la suspensión suelo fino y aguas y analizar el ensayo.

Finalmente, determinamos el peso del recipiente con la balanza calibrada, luego transferimos lo la muestras de suelo y aguas del picnómetro y lo pesamos, llevamos al horno para su secado, luego retiramos y deje enfriar luego lo pesamos la masa seca en una balanza calibrada. Esto el mismo procedimiento de ensayo para el otro de masa, calcule y registre la masa seca de los sólidos, Ms. y donde el promedio de los ensayos obtendremos el Gs.

$$\text{Gravedad Especifica} = 2.67$$

Figura 6

Ensayo gravedad especifica



Nota: Elaboración propia

3.4.2. Análisis granulométrico

Este ensayo se utiliza la muestra seca donde es secado al aire libre, donde para tener una muestra de suelo representativa se cuartea en cuarta partes iguales y se obtiene la muestra adecuada, luego se anota el peso de la muestra de suelo, se ubica en un contenedor metálico y se hecha agua para su desilusión después de esto es lavado en el malla N° 200, para calcular la cantidad de material que quedaron retenidos y sobre todo a que identificar la cantidad aproximada de partículas de agregados grueso, agregado finos y limos. Se toma una muestra de 89.49 gr suelo para luego lavarlo y para poder realizar el análisis correspondiente, el procedimiento de basa en la norma (ASTM D, 421), luego eso se izó el lavo correspondiente en tamiz N° 200, luego lo quedo la muestra en malla, se secó en el horno durante 24 horas y después se realizara el tamizado correspondiente por las mallas de 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", N°4, N°8, N°10, N°16, N°20, N°30, N°40, N° 50, N°60, N°100, N°140 y N° 200.

Figura 7

Granulométrico. (a) Tamizado. (b) Lavado de la muestra en el tamiz N° 200

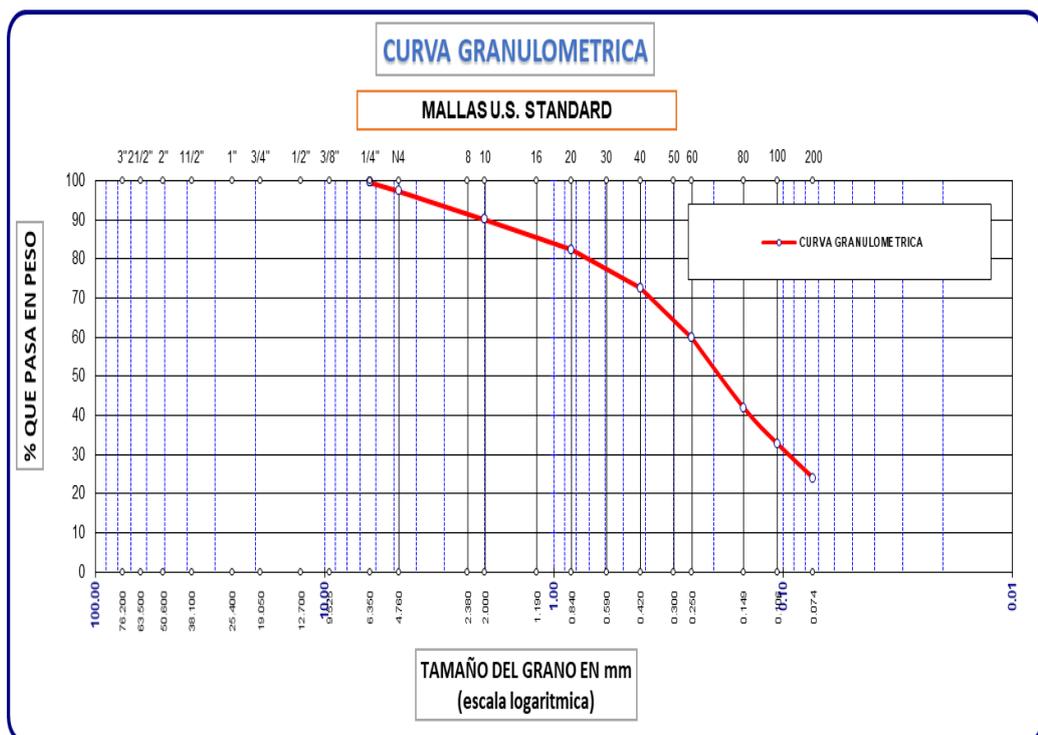


Nota: Elaboración propia.

Se observa que la figura 7, se está realizando la clasificación del suelo mediante las mallas respectivo y lavado de la muestra de suelo, es el resultado es para determinar la curva granulométrica.

Figura 8

Representación gráfica curva granulométrica del suelo natural



Nota: Elaboración propia.

3.4.3. Análisis granulométrico por hidrómetro

Se utiliza la muestra suelo natural, luego se coloca en el horno para el secado, luego 24 de horas se retirar muestra, se tamiza en la malla N° 200 donde luego la muestra seca se coloca en un recipiente metálico. Se toma una muestra seca de 50 gr de suelo según norma (ASTM D, 422), se mezcla con 125 ml de solución de hexametáfosfato de sodio al 4% (NaPO₃) reposando por 24 horas. Luego transfiero la mezcla a la probeta, añadiendo agua hasta 1000 ml y verificar que la temperatura sea igual para ambos recipientes.

Luego colocamos el hidrómetro y el termómetro en el recipiente para determinar las lecturas de ambos y luego usar la palma de la mano se tapa boca de la probeta donde se encuentra la suspensión de suelo y agitar cuidadosamente por un 1 minuto, tomar lecturas de tiempo de 1, 2, 3, 4, 8, 16, 30, 60, 120, 330, 990, 1410 minutos, esto se puede observar en la figura 10.

Figura 9

Ensayo granulométrico por hidrómetro. (a) Control (b) Reposo de la muestra



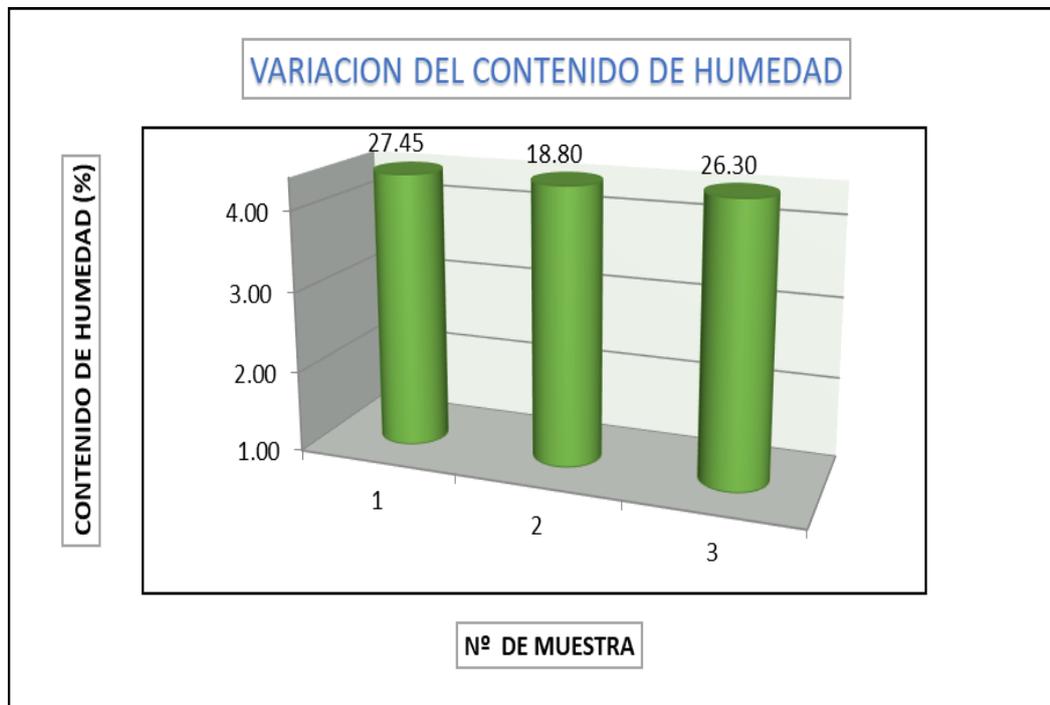
(a)

(b)

Nota: Elaboración propia.

Figura 11

Grafica de contenido de humedad



Nota: Elaboración propia

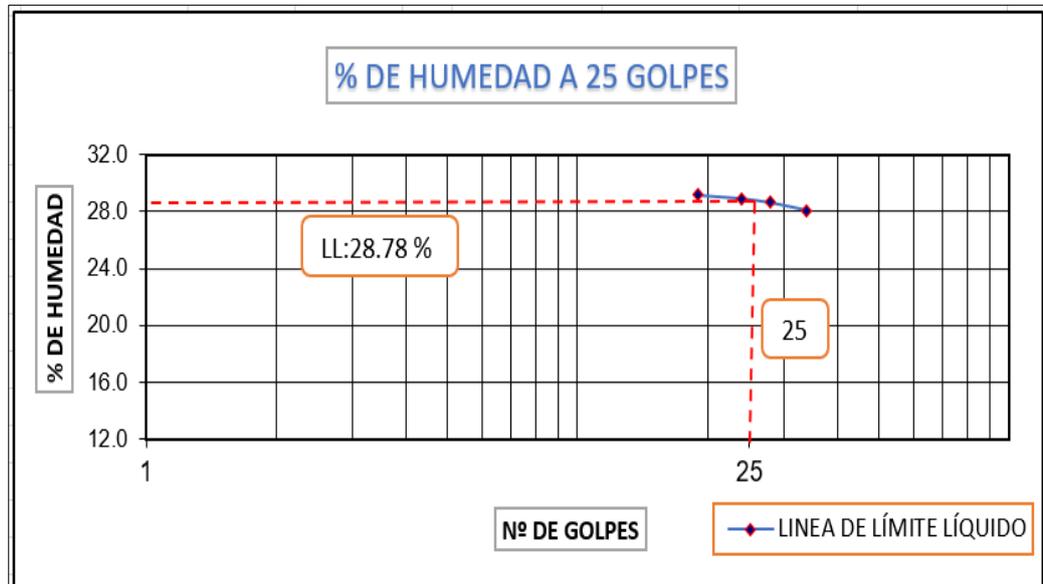
3.4.5. Límite líquido

Para este ensayo se utilizó la malla N° 40, se tamizo una porción de muestra seca, hasta conseguir 300 gr. Luego en el envase de porcelana, se coloca la muestra seca y se mezcla con agua destilada y se amasa con la espátula hasta llegar a una consistencia suave, blanda, de modo que sea uniforme y se humedezca durante las 24 horas, donde lo cubrí con plástico para que mantenga la humedad, luego posterior a esto lo lleve al ensayo de cuchara de casagrande, llenando la pasta de suelo aproximadamente la tercer parte, luego a que esparcir el material de pasta de suelo uniformemente con la espátula dando una forma circular de un 1cm, de altura, donde se hace una ranura de profundidad por el medio con el acanalador estándar y luego se gira la manivela dos vuelta por segundo para luego tener el valor de cantidad de golpes para que la ranura de base de cuchara de

casagrande se cierre, se obtendrá la muestra del suelo húmeda para luego secarlo en horno y obtener su límite líquido.

Figura 12

Grafica de limite líquido



Nota: Elaboración propia

Límite líquido es 28.78%

3.4.6. Límite plástico

En caso de límite plástico se reutilizó el material de suelo que se utilizó en realizar en el límite líquido. El material previamente preparado se somete a un proceso de rolado manual sobre una superficie lisa y no absorbente. Este proceso consiste en hacer rodar el suelo húmedo entre las manos o sobre la superficie con una presión uniforme, para formar bastones delgados. Luego, tenemos que hacer el rolado con la mano a velocidad de 80 a 90 periodos por minuto implica un movimiento repetitivo, los bastones deben tener un diámetro aproximado de 3.2 mm en el momento que comienza a fisuras de la muestra del rolado.

Límite plástico es 22.22%



3.4.7. Índice de plasticidad

El índice de plasticidad se puede considerar las características de los suelos, por lo siguiente los suelos es arcilloso cuando su $Ip = 0$ entonces es no plástico, luego los Suelos poco arcillosos con una plasticidad $IP < 7$ se considera de baja plasticidad, luego los suelos arcillosos cuando su $7 < IP \leq 20$ se considera de media plasticidad y también suelos muy arcillosos cuando el $IP > 20$ se considera de alta plasticidad (MTC, 2014).

Determinación del Índice de Plasticidad:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

- LL: 28.78%
- LP: 22.22%

Índice Plasticidad es 6.57%

3.4.8. Clasificación de suelos

Se determinaron en el ensayo de laboratorio como la muestra designadas, donde curva granulométrica es fundamental para determinar el tipo de suelo para mi proyecto de investigación al cuales son:

Los suelos de clasicacion (USCS) y el suelo (AASHTO), donde se dio por resultado de:

- AASHTO: (A-2-4) grava y arena arcillosa o limosa.
- USCS: Arena limosas, mezclas de arena y limo (SM).

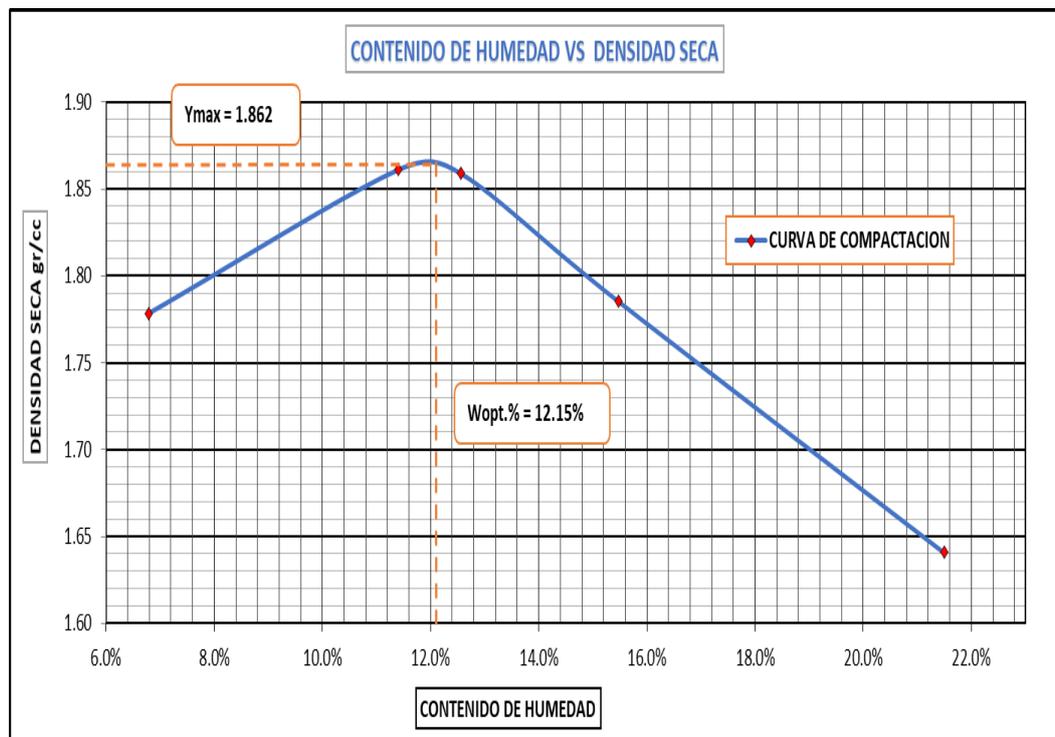
3.4.9. Ensayo de proctor modificado

El procediendo de los resultados se asieron en el laboratorio de mecánica de suelos, para determinar los siguientes ensayos:

Contenido de humedad optimo (CHO) y la máxima densidad seca (MDS), de un suelo natural, cuando se somete a una compactación controlada. El método aplicado es tipo de ensayo A, lo más común es la compactación de proctor modificado, procedimiento 5 capas iguales y 56 golpes por cada capa, estos resultados nos ayudaran para determinar lo siguientes CBR, expansión y comprensión simple, se puede ver en la figura 13.

Figura 13

Contenido de humedad vs densidad seca



Nota: Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 13, la M. densidad seca (MDS): 1.862gr/cc y optima (CHO): 12.15%.



3.4.10. Ensayo de valor de soporte california (CBR)

El proceso se requiere del ensayo de Proctor. A continuación, se prepararon muestras de suelo de 6 kg, es importante asegurarse de que el suelo esté en el estado adecuado, es decir, que haya pasado por un tamiz N.º 4. En la probeta se preparamos la cantidad agua faltante para el contenido humedad óptima. Una vez conocida la cantidad de agua, se agrega a la muestra de suelo y se mezcla hasta homogenizarla completamente. Después de mezclar bien la muestra de suelo con agua, se divide la muestra de suelo en cinco partes equitativo. Después de eso se coloca primero disco espaciador y luego papel filtro por encima se va colocando cada una de las 5 partes de la muestra suelo dentro del molde, compactándolas con 56 golpes por capa con pisón de 4,54 kg y una altura de 457 mm. Después de compactar las 5 capas, se retira el collarín o extensión del molde luego se enrasa, se extrae una porción de la muestra compactada para obtener el contenido de humedad.

El molde se voltea con la muestra de suelo compactada, primero se inserta el papel de filtro y retirando el disco espaciador, se registró el peso de la muestra, después de registrar el peso de la muestra, se coloca un vástago graduable en él se colocan placas de metal de 10 lb (aproximadamente 4,5 kg). El molde con la muestra compactada y las placas de metal se colocan en un tanque de agua, una vez que el molde esté en el agua, coloque un extensómetro o dial para medir la expansión cada 24 horas y registró la lectura con él dial y después de 96 horas, para calcular la expansión de la muestra suelo fino arenoso limoso. El hinchamiento total expresa en porcentaje respecto altura inicial de la muestra. Después de cuatro días se retira el molde del tanque se deja drenar el agua durante 15 minutos, luego el molde con la muestra compactada se coloca en una prensa de penetración luego de asentar el pistón

sobre la muestra, verificando que el dial este en cero antes de aplicar la carga de penetración, donde la velocidad penetración es constante de 1,27 mm/min y se registra las lecturas del dial para penetración de 0.00, 0.63, 1.27, 0.91, 2.54, 3.81, 5.09, 6.35, 7.62 y 8.89 milímetros.

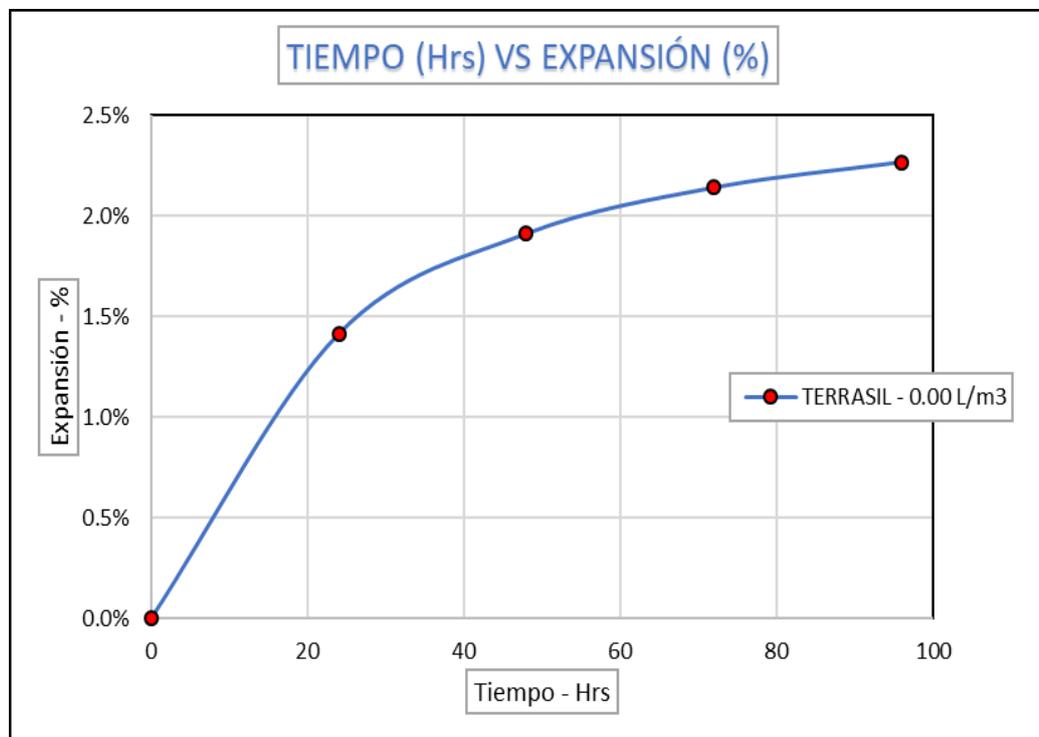
Valor de Soporte (CBR) es: 9.23%

3.4.11. Ensayo de expansión

Cuando mencionas que la expansión total registrada es de 2.27% y corresponde a 2.87 mm de expansión, se trata de un resultado que se calcula comparando el aumento en la altura de la muestra de suelo tras su saturación con agua respecto a su altura inicial, se puede observar en la figura 14.

Figura 14

Expansión y tiempo



Nota: Elaboración propia

3.4.12. Ensayo de compresión no confinada (UCS)

Ensayo de compresión simples se determinó con material de suelo remoldeadas, se utilizaron (CHO) y (MDS), del ensayo de proctor modificado. Para determinar compresión no confinada, del suelo natural se asieron dos muestras de especímenes, la cual se calcula el promedio.

Tabla 18

Resistencia a la compresión no confinada

Espécimen N°	Cohesión C (kg/cm ²)	Promedio C	qu (Kg/cm ²)	Promedio qu
1	0.016	0.019	0.032	0.077
2	0.023		0.045	

Nota: Elaboración propia

3.5. ENSAYO DE LABORATORIO DE LA SUBRASANTE ESTABILIZADO CON TERRASIL PARA USO DE VÍAS DEL SUELO TRATADO

Para determinar la dosificación óptima del aditivo Terrasil para la estabilización de suelos. En este caso, se probaron cuatro dosificaciones de Terrasil: 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, se determinaron los ensayos de laboratorio como: Límites de consistencia (Atterberg), valor de soporte (CBR) y resistencia de la compresión no confinada (UCS).

Los criterios obtenidos en los ensayos realizados a las muestras dosificada se determinarán tras un tiempo de curado de catorce (14) días. En ese lapso tiempo el suelo curado completa su mejora de sus propiedades química. En el caso del ensayo del CBR, después de cumplir el período de curado, las muestras tratadas se sumergieron en agua durante 96 horas (4 días), inmediatamente después de este período de inmersión, se procedió a realizar el ensayo de penetración CBR.

3.5.1. Ensayo de límites de consistencia

La muestra de suelo previamente secada en horno fue tamizada utilizando el tamiz N.º 40, hasta obtener 300 gr de suelo. Para las cuatro dosificaciones distintas, se colocaron en envase aluminio. Luego se añadió aguas y mezcló con el aditivo terrasil en una probeta con su respectiva dosificación.

Luego, se vertió la muestra de suelo con agua y aditivo terrasil en el envase de aluminio que contenía los 300 gr de muestra de suelo, hasta obtener consistencia espesa y uniforme, posteriormente, las muestras tratadas se dejaron curar durante un periodo de catorce (14) días a la intemperie en aire libre, tapado de un plástico hermético, esto para que no pierda contenido de humedad. Y la tabla 19, se observa el diseño de dosificación.

Tabla 19

Dosificación de límite de consistencia

Preparación del terrasil para límites de consistencia					
Químico terrasil	0.30	0.50	0.75	1.00	En Lt/m ³
material suelo	300	300	300	300	En kg
Peso unitario suelto	1862	1862	1862	1862	Datos del proctor Kg/m ³
Humedad natural	0	0	0	0	%
Humedad óptima de compactación	12.15	12.15	12.15	12.15	Datos del proctor %
Agua necesaria	36	36	36	36	En gramos
Cantidad de terrasil necesaria a adicionar al agua	0.05	0.08	0.12	0.16	Datos en gramos
Dosificación de terrasil para riego de sellado	1/300	1/300	1/300	1/300	1 parte de terrasil en 300 parte de agua
Riego de sellado con terrasil	0.01	0.01	0.01	0.01	Dato en Kg/m ² , es decir 3 litros/m ² de la disolución 1/300

Nota: Elaboración propia

Figura 15

Ensayo LC. (a) Dosificación con Terrasil en la muestra. (b) Curado de 14 días de la muestra dentro de una bolsa hermética



(a)

(b)

Nota: Elaboración propia.

3.5.1.1. Limite líquido

Después del curado de catorce (14) días, se izó el ensayo de cuchara de casagrande, dispuesto de esto colocó el suelo la tercera parte. Y esparcí el material de suelo con la cuchara uniformemente formando una sueva pasta circular de un 1cm de profundidad, donde se hace una ranura de profundidad por el medio con el acanalador estándar.

Luego se gira la manivela dos vueltas por segundo para luego tener el valor de número de golpes obtenido para que la ranura se cierre en la base de cuchara de casagrande, se obtendrá la muestra del suelo húmeda para luego secarlo en horno y obtener el límite líquido. A continuación, se indican ensayo límite líquido dosificado, esto se puede observar en la figura 16.

Figura 16

Ensayo LL. (a) Dosificación con terrasil en la muestra (b) Ensayo cuchara casagrande



(a)

(b)

Nota: Elaboración propia.

3.5.1.2. Limite plástico

En caso de limite plástico se reutilizó el material de suelo que se utilizó en realizar en el límite líquido. El material también se curó por catorce (14) días, previamente preparado se somete a un proceso de rolado manual sobre una superficie lisa y no absorbente. Este proceso consiste en hacer rodar el suelo húmedo entre las manos o sobre la superficie con una presión uniforme, para formar bastones delgados o cilindros. Luego, de haber hecho bastones de la muestra de suelo se ase el rolado a velocidad de 80 a 90 periodos por minuto implica un movimiento repetitivo, finalmente, los bastones deben tener un diámetro aproximado de 3.2 mm (1/8 de pulgada) en el momento que se forman fisuras superficiales, esto se puede observar en la figura 17.

Figura 17

Ensayo LP. (a) Muestra de suelo seco de los bastones de 3.2 mm (b)

Bastones de diámetro 3.2 mm son pesado en la balanza



(a)

(b)

Nota: Elaboración propia.

3.5.2. Ensayo de valor de soporte california (CBR)

El ensayo de (CBR) tiene como referencia ensayo compactación proctor de modificado, donde se prepararon la muestra de suelo de 6 kg con un contenido humedad natural de 6.32 % y el molde de CBR, con sus respectivos anillos de extensión. Donde probeta vidrio, se prepara la cantidad de agua necesario faltante para obtener cantidad humedad óptima (CHO) donde se le añade aditivo terrasil para las cuatro dosificaciones correspondiente.

La muestra suelo se preparó y mezcló, en una bandeja metálica con agua (contenido humedad óptima), hasta homogenizar, esta muestra de suelo se prepara para las cuatro dosificaciones correspondiente que son 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, en la tabla 20, podemos ver la cantidad de dosificación para cada ensayo.

Tabla 20

Dosificación con terrasil para CBR

Preparación de terrasil para el CBR					
Químico terrasil	0.30	0.50	0.75	1.00	Lt/m ³
Material suelo	6000	6000	6000	6000	Kg
Peso unitario suelto	1862	1862	1862	1862	Datos del proctor Kg/m ³
Humedad natural	6.32	6.32	6.32	6.32	%
Humedad optima de compactación	12.15	12.15	12.15	12.15	Datos del proctor %
Agua necesaria	350	350	350	350	En gramos
Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua	0.97	1.61	2.42	3.22	Datos en gramos
Dosificación de terrasil para riego de sellado	1/300	1/300	1/300	1/300	1 parte de terrasil en 300 parte de agua
Riego de sellado con terrasil	0.01	0.01	0.01	0.01	Dato en Kg/m ² , es decir 3 litros/m ² de la disolución 1/300

Nota: Elaboración propia

Figura 18

Ensayo CBR (a) Preparación del terrasil (b) Combinación de la muestra de suelo y agua



(a)

(b)

Nota: Elaboración propia

La figura 18, se está realizando la dosificación correspondiente del aditivo terrasil, y también se está preparando la muestra de suelo en la bandeja.

La figura 19, dividimos en 5 partes iguales la muestra suelo en la bandeja, luego de eso se pone disco espaciador y un papel de filtro encima dentro del molde de eso se coloca la muestra de suelo y se compacta a 56 golpes con el pistón para cada capa de muestra de suelo.

Luego se retiró la extensión o collarín del molde cuando se acabe la compactación y se enrasar la muestra suelo con el fierro metálica y se determinó la humedad. Luego se invirtió el molde con la muestra suelo compactada, luego eso se coloca un papel de filtro primero debajo y retirando el disco espaciador se calculó el peso de la muestra suelo.

Figura 19

Ensayo CBR (a) División en cinco partes iguales la muestra (b) Muestra en proceso de enrasar



(a)

(b)

Nota: Elaboración propia.

Luego de eso colocó los moldes compactados con muestra de suelo en lugar seguro donde no pierda humedad, luego se izó el curado por catorce (14) días respectivamente.

Figura 20

Muestras compactado por 14 días de curado



Nota: Elaboración propia.

En la figura 20, después de curado de catorce días, a ello se coloca un vástago graduable en él se colocan placas de metal de 10 lb (4,5 kg).

Figura 21

Donde los moldes de CBR son sumergidos en tanque de agua por 96 hs y se hacen la lectura con el dial para medir hinchamiento



Nota: Elaboración propia

En la figura 21, el molde con la muestra compactada y las placas de metal se colocan en un tanque de agua, una vez que el molde esté en el agua, coloque un extensómetro o dial para medir la expansión cada 24 horas y registró la lectura con él dial y después de 96 horas, para calcular la expansión de la muestra suelo fino arenoso limoso dosificado. El hinchamiento total expresa en porcentaje respecto altura inicial de la muestra, luego se anotó la lectura final y se determinó la expansión de la muestra suelo.

Luego el molde con la muestra compactada se coloca en una prensa de penetración luego de asentar el pistón en el medio muestra compactada, verificando que el dial este en cero antes de aplicar la carga de penetración, donde la velocidad penetración es constante de 1.27 mm/min y se registra las lecturas del dial para penetración de 0.00, 0.63, 1.27, 0.91, 2.54, 3.81, 5.09, 6.35, 7.62 y 8.89 milímetros.

Figura 22

Ensayo CBR. (a) Se retira el agua del molde durante 15 minutos. (b) El molde de suelo compactado es sometida al ensayo de penetración



(a)

(b)

Nota: Elaboración propia.

3.5.3. Ensayo de compresión no confinada (UCS)

Se determinó con el material de suelo remoldeadas donde fue elaborada manualmente, los cuales se utilizaron los resultados de la humedad óptimo (CHO) y densidad seca máxima (MDS), de la compactación de Proctor, para determinar compresión no confinada, la muestra de suelo tubo un curado de 14 días y fueron puestos en bolsas herméticas, se asieron dos muestras de especímenes, la cual se calcula el promedio. A continuación, se indican dosificación de terrasil para (UCS), esto se puede observar en la tabla 21.

Tabla 21

Dosificación de terrasil para UCS

Preparación de terrasil para compresión simple (UCS)					
Químico terrasil	0.30	0.50	0.75	1.00	Lt/m ³
Material suelo	1047. 12	1047.12	1047.12	1047.12	Kg
Peso unitario suelto	1862	1862	1862	1862	Datos del proctor Kg/m ³
Humedad natural	6.32	6.32	6.32	6.32	%
Humedad optima de compactación	12.15	12.15	12.15	12.15	Datos del proctor %
Agua necesaria	61	61	61	61	En gramos
Cantidad de terrasil necesaria a adicionar al agua	0.17	0.28	0.42	0.56	Datos en gramos
Dosificación de terrasil para riego de sellado	1/300	1/300	1/300	1/300	1 parte de Terrasil en 300 parte de agua
Riego de sellado con terrasil	0.01	0.01	0.01	0.01	Dato en Kg/m ² , es decir 3 litros/m ² de la disolución 1/300

Nota: Elaboración propia

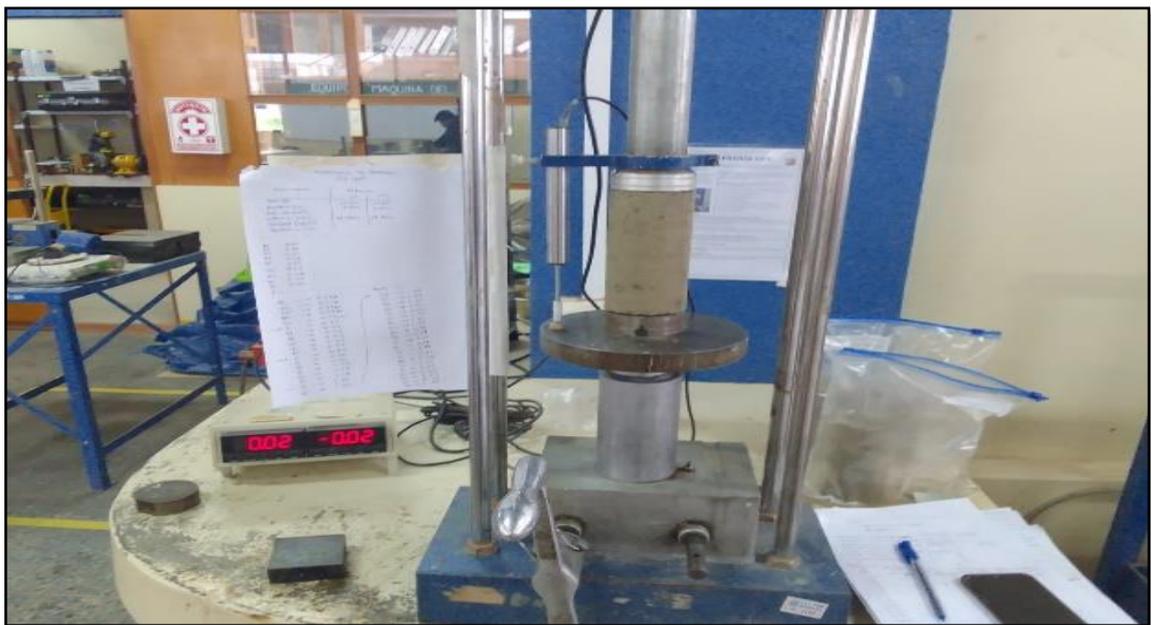
Figura 23

Ensayo UCS. (a) Curado de los 14 días en bolsa hermética (b) Remoldeo del espécimen
(c) Espécimen sometidas a ensayo de penetración



(a)

(b)



(c)

Nota: Elaboración propia.

En la figura 23, se puede ver las muestras de suelo es compactado y remoldeadas, también es sometido a ensayos de penetración.



3.6. DISEÑO ESTADÍSTICO

3.6.1. Método de ANOVA

La estadística es una herramienta fundamental en la investigación científica, ya que permite analizar y entender los datos obtenidos en un estudio. En este caso, la prueba ANOVA (Análisis de Varianza) es un método estadístico muy útil para comparar las medias de varios grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Al utilizar ANOVA en una investigación, se pueden contrastar las hipótesis planteadas para evaluar si las diferencias observadas entre los grupos se deben al azar o si hay factores significativos que las explican.

El uso de ANOVA es especialmente apropiado cuando se busca comparar más de dos grupos y estudiar el efecto de una o más variables independientes sobre una variable dependiente. Al final del análisis, si se encuentran diferencias significativas, se pueden realizar pruebas adicionales (como las pruebas post-hoc) para identificar entre qué grupos existen estas diferencias, permitiendo una interpretación más detallada de los resultados.

Hipótesis estadísticas

H_0 : Los grupos son iguales.

H_1 : No todo el grupo son iguales.

Regla de decisión

P – valor

Rechazar H_0 si $p < \alpha$

Valor crítico

Rechazar H_0 si $F > F_c$



3.6.2. Método de Tukey

La prueba HSD (diferencia honestamente significativa) de Tukey es un método estadístico que se utiliza para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de varios grupos. Esta prueba es particularmente útil en el contexto de ANOVA (Análisis de Varianza), donde los investigadores buscan comprender si estadísticamente distintos entre sí, las medias de tres o más grupos son diferentes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

4.1.1. Resultados del ensayo de límite líquido

Según los valores determinado el límite líquido del suelo natural sin tratar es de 28.78%, con dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil da como resultado LL de 27.23%, con dosificación de 0.50 Lt/m³ de terrasil da como resultado de LL de 27.21%, con dosificación de 0.75 Lt/m³ de terrasil da como resultado de LL de 27.18%, con dosificación de 1.00 Lt/m³ de terrasil da como resultado de LL de 26.45%. Se puede observar que el límite líquido de suelo tratado con aditivo terrasil existe una disminución en comparación con el suelo natural no tratado, esto se puede observar en la tabla 22.

Tabla 22

Resultados total del límite líquido

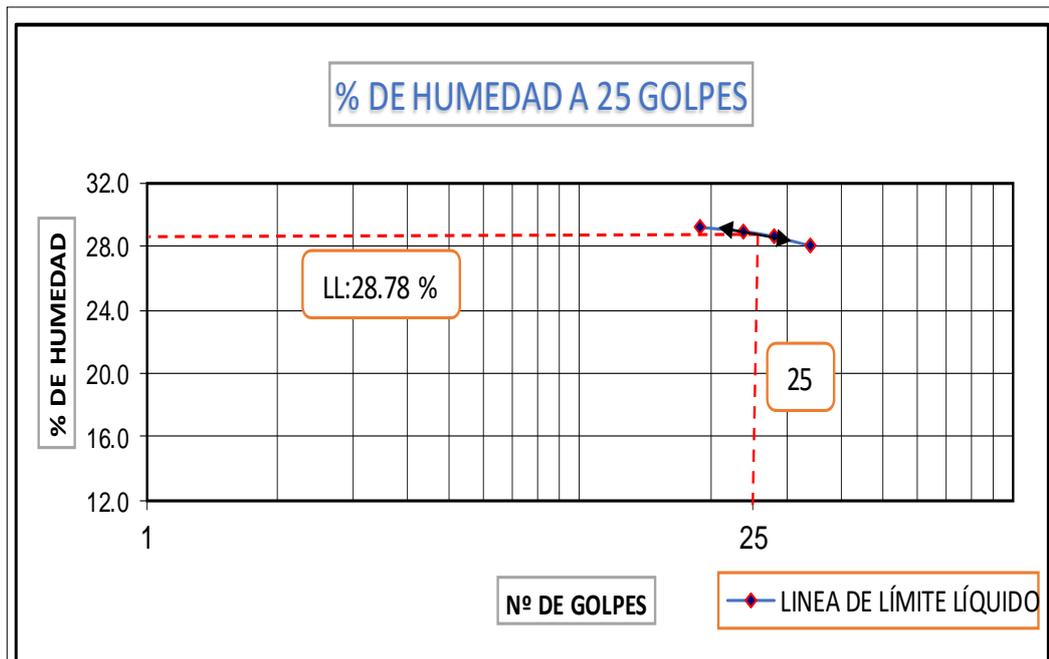
Dosificación de terrasil (Lt/m³)	Limite liquido
0.00	28.78
0.30	27.23
0.50	27.21
0.75	27.18
1.00	26.45

Nota: Elaboración propia

Según la figura 22, cuando se añade terrasil al suelo ah diferentes dosificaciones, se puede ver que límite líquido (LL) empieza a disminuir, esto se puede observar en la gráfica de la figura 24, 25, 26, 27 y 28.

Figura 24

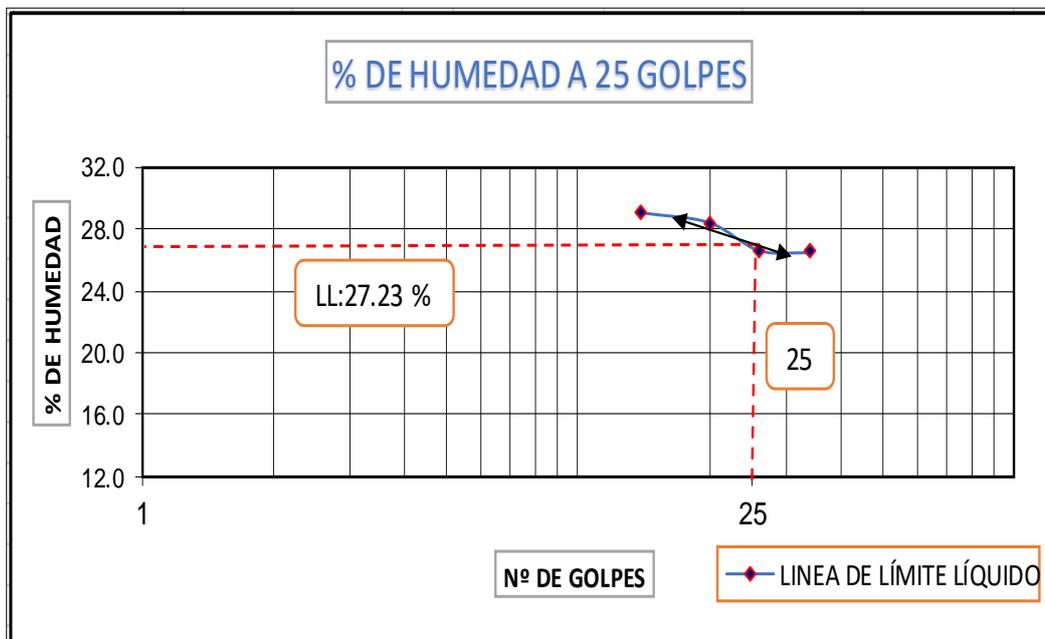
Dosificación de 0.00 Lt/m³ de terrasil (suelo natural)-límite liquido



Nota: Elaboración propia

Figura 25

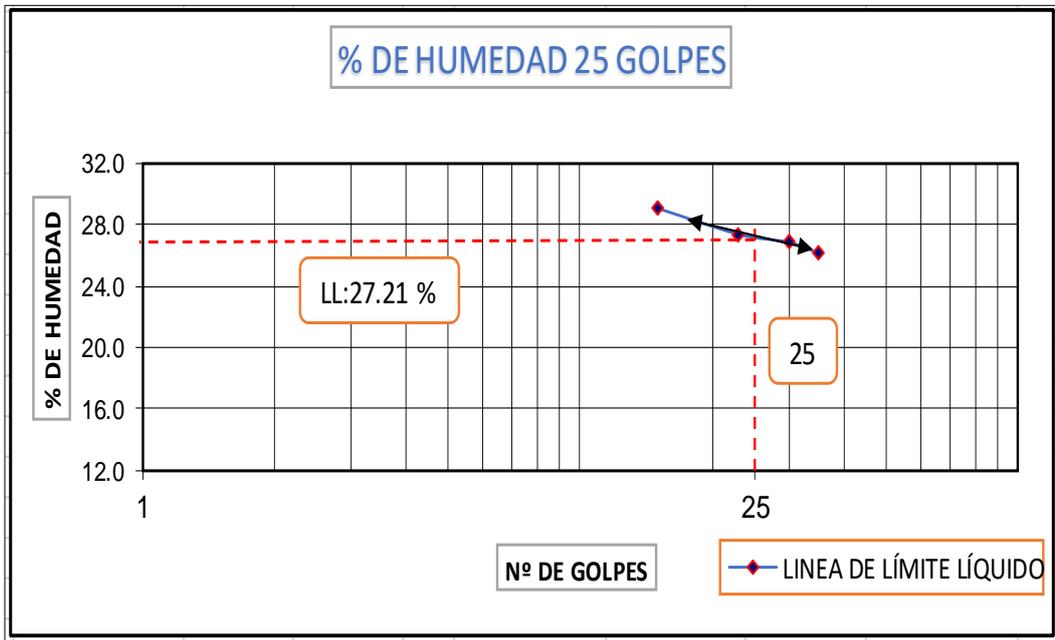
Dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil-límite liquido



Nota: Elaboración propia

Figura 26

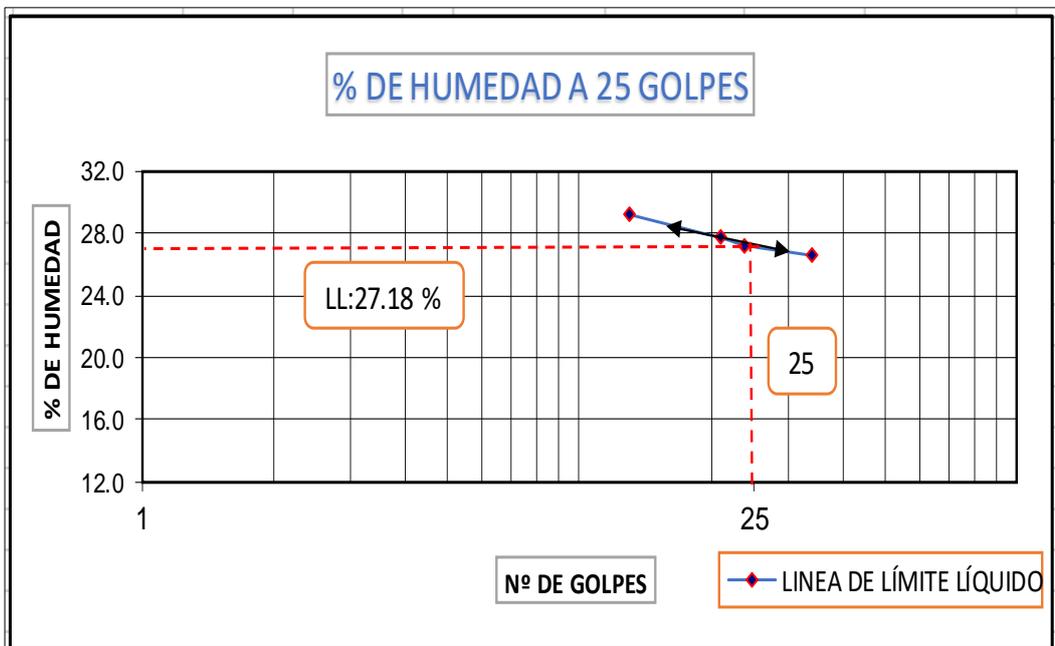
Dosificación de 0.50 Lt/m³ de terrasil-limite liquido



Nota: Elaboración propia

Figura 27

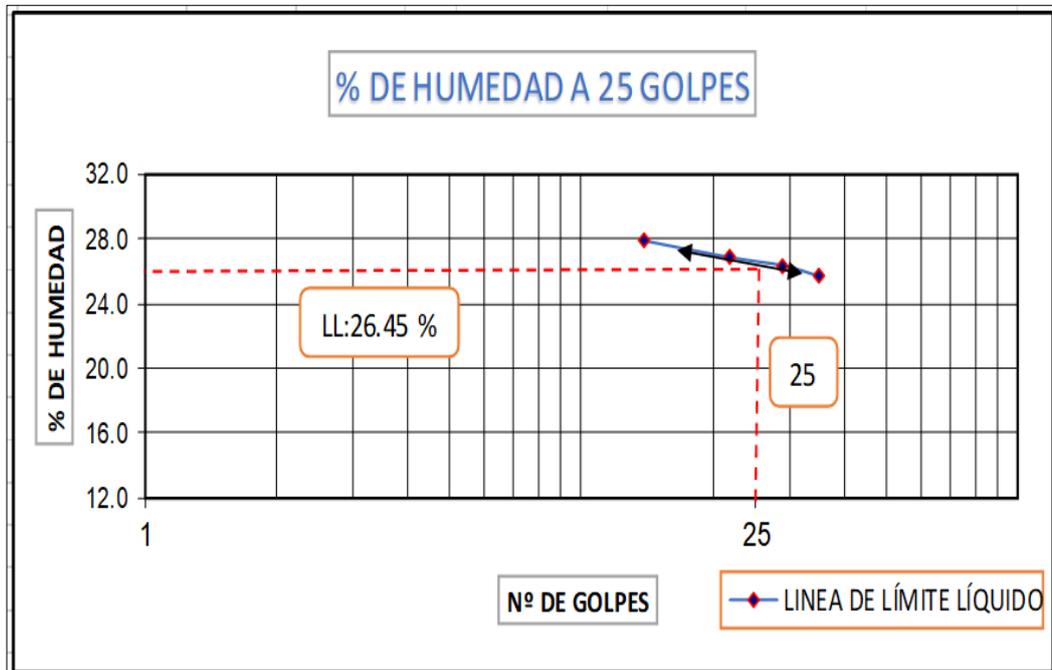
Dosificación de 0.75 Lt/m³ de terrasil-limite liquido



Nota: Elaboración propia

Figura 28

Dosificación de 1.00 Lt/m³ de terrasil-limite liquido



Nota: Elaboración propio

Se observa en la figura 24, 25, 26, 27 y 28, cuando se incrementa la dosificación de terrasil, el límite líquido empieza a disminuir paulatinamente.

4.1.2. Resultados del ensayo de límite plástico

Según los valores determinados del límite plástico (LP) del suelo natural tratado existe un incremento con respecto al suelo natural no tratado.

Donde límite plástico del suelo natural no tratado es de 22.22%, con dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil, da como resultado LP de 22.31%, con dosificación de 0.50 Lt/m³ de terrasil, da como resultado LP de 22.76%, con dosificación de 0.75 Lt/m³ de terrasil, da como resultado LP de 22.78%, con dosificación de 1.00 Lt/m³ de terrasil, da como resultado LP de 22.86%. A continuación, se indican resultados de límite plástico (LP), esto se puede observar en la tabla 23.

Tabla 23

Resultados total del límite plástico

Dosificación de terrasil (Lt/m³)	Limite plástico
0.00	22.22
0.30	22.31
0.50	22.76
0.75	22.78
1.00	22.86

Nota: Elaboración propia.

Según la tabla 23, cuando se añade terrasil ah dosificaciones destintos, se puede ver el incremento del límite plástico (LP).

4.1.3. Resultados del ensayo del índice de plasticidad

Se observa que, al comparar el suelo natural tratado con terrasil con el suelo natural no tratado, donde los resultados de suelo sin tratar tiene un índice de plasticidad (IP) de 6.57%, con dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil, da como resultado IP de 4.92%, con dosificación de 0.50 Lt/m³ de terrasil, da como resultado IP de 4.46%, con dosificación de 0.75 Lt/m³ de terrasil, da como resultado IP de 4.40%, con dosificación de 1.00 Lt/m³ de terrasil, da como resultado IP de 3.60%, todo los resultados del IP, se puede ver en la tabla 24.

Tabla 24

Resultados total de índice de plasticidad

Dosificación de terrasil (Lt/m³)	Índice de plasticidad
0.00	6.57
0.30	4.92
0.50	4.46
0.75	4.40
1.00	3.60

Nota: Elaboración propia

Donde la tabla 26, se observa, que los índices de plasticidad (IP) disminución según incremento la dosificación del aditivo terrasil.

4.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

Se pudo determinar que, al incrementar la dosificación del aditivo químico, donde se logra tener una disminución en el límite líquido (LL), un incremento en el límite plástico (LP) y una disminución en el índice de plasticidad (IP), se puede ver la tabla 25.

Tabla 25

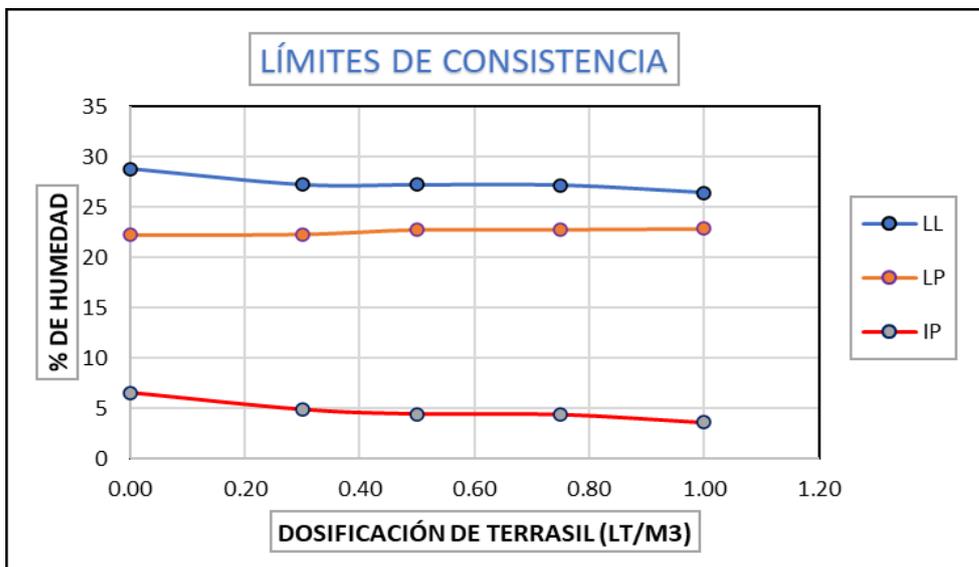
Resultados total de límites de consistencia

Dosificación de terrasil (Lt/m ³)	LL	LP	IP
0.00	28.78	22.22	6.57
0.30	27.23	22.31	4.92
0.50	27.21	22.76	4.46
0.75	27.18	22.78	4.40
1.00	26.45	22.86	3.60

Nota: Elaboración propia

Figura 29

Resumen de grafica total de los límites de consistencia



Nota: Elaboración propia

En la figura 29, se observa una disminución del límite líquido (LL), e incremento del límite plástico (LP) y una disminución del índice de plasticidad (IP), todo con respecto a la dosificación de aditivo terrasil.

Tabla 26

Descripción de las características del IP

ÍP	Flexibilidad	Condiciones
IP > 20	Alta	Muy arcilloso el suelo
$7 < IP \leq 20$	Media	Arcilloso el suelo
IP < 7	Baja	Poco arcillosos el suelo
IP = 0	No	Suelos no arcillosos

Nota: Manual Carretera (MTC, 2014)

En la tabla 26, se observa que el índice de plasticidad del suelo natural o sin tratar es de 6.57%, por lo que se trata de un suelo de baja plasticidad como se identifica en la tabla 28, del (MTC, 2014) al aumentar una dosificación de terrasil de 0.30 Lt/m³ se tiene una reducción de 4.92 %, con dosificación de 0.50 Lt/m³ reduce a 4.46%, con dosificación de 0.75 Lt/m³ reduce a 4.40%, y con una dosificación de 1.00 Lt/m³ reduce a 3.60%, por lo que se puede notar una mejoría con respecto a la plasticidad del suelo.

La dosificación elegida es de 0.30 Lt/m³ de terrasil, este resultado de dosificación mejora la las propiedades geotécnicas del suelo, con índice de plasticidad de 4.92%, dando como resultado en tabla 26, se trata del suelo de plasticidad baja (suelo poco arcilloso) a un suelo de no plasticidad (suelos exentos de arcilla), se obtuvo por el factor económico, tipo de suelo y CBR.

Finalmente se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.



Según César Antonio Vinueza Elizalde (2014), en su proyecto de investigación que tuvo como objetivo mejorar los límites de consistencia. Por ende, se obtuvo LL de 30%, LP de 23% y IP de 8% suelo natural de limo arenoso. El IP de este suelo es bajo por lo tanto para estabilizar este suelo no se va a tener altos porcentajes de material estabilizante. En cuanto la estabilización con órgano-silanos no pudieron determinarlo.

El contraste con nuestro proyecto se obtuvo resultados, se obtuvo LL de 28.78%, LP de 22.22% y IP de 6.67% suelo natural de arenoso limoso, y cuando se agrega dosificación de 0.30 Lt/m³ terrasil se obtuvo, LL de 27.23%, LP de 22.31% y IP de 4.92% suelo limo arenoso, para 14 días de curado.

El cual existe una disminución de IP con dato 6.67% a 4.92% en este punto es muy favorable la subrasante de dicho proyecto en mención.

4.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DEL VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Los resultados del ensayo de CBR diferentes dosificaciones predeterminado, dando como resultados en la tabla 27.

Tabla 27

Resultado total del terrasil y CBR

Dosificación de terrasil (Lt/m³)	CBR
0.00	9.23
0.30	36.78
0.50	61.78
0.75	65.19
1.00	93.03

Nota: Elaboración propio

Donde en tabla 27, se tiene que al incremento la dosificación de terrasil, sube el CBR paulatinamente.



4.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DEL VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Donde la tabla 27, se observa todo el cálculo del CBR, del suelo natural no tratado tiene un resultado de CBR: 9.23% se observa en la figura 31. Este resultado es evaluado en la tabla 28, se categoriza como subrasante regular.

Con dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil, tiene un resultado de CBR: 36.78%, se observa en la figura 31. Este resultado es evaluado en la tabla 28, se categoriza como una subrasante excelente.

Con dosificación de 0.50 Lt/m³ de terrasil, tiene un resultado de CBR: 61.78%, se observa en la figura 31. Este resultado es evaluado en la tabla 28, se categoriza como una subrasante excelente.

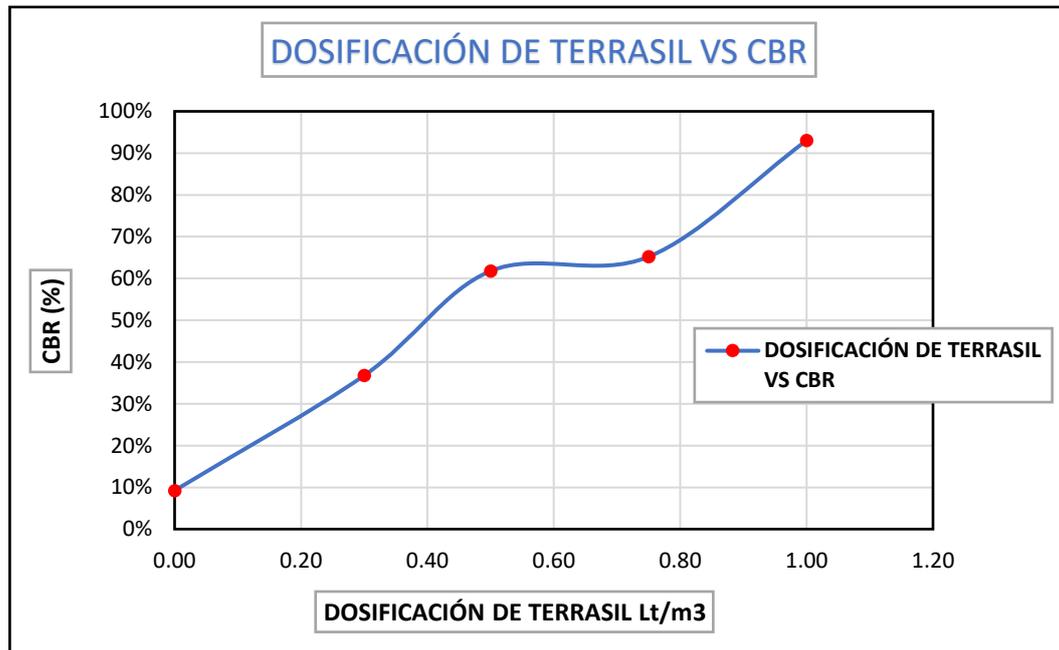
Con dosificación de 0.75 Lt/m³ de terrasil, tiene un resultado de CBR: 65.19%, se observa en la figura 31. Este resultado es evaluado en la tabla 28, se categoriza como una subrasante excelente.

Con dosificación de 1.00 Lt/m³ de terrasil, tiene un resultado de CBR: 93.03%, se observa en la figura 31. Este resultado es evaluado en la tabla 28, se categoriza como una subrasante excelente.

La conclusión al incrementar la dosificación adecuada del aditivo terrasil, se puede observar una mejora del CBR. La dosificación optada del aditivo terrasil es de 0.30 Lt/m³, mejorando así su CBR a 36.78%, se optó una subrasante excelente, este con el fin de economizar el aditivo terrasil y el tipo de suelo, en resumen, se puede ver en la figura 30 y figura 31.

Figura 30

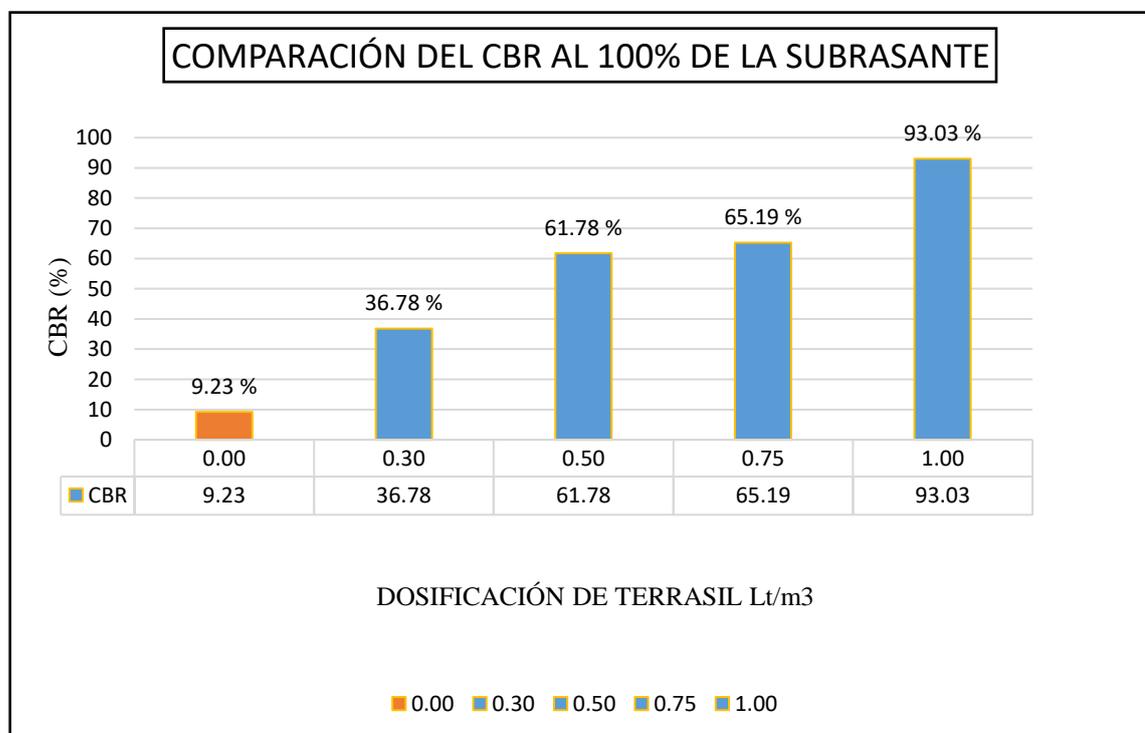
Resumen de la gráfica total del terrasil y CBR



Nota: Elaboración propia

Figura 31

Representación gráfica de la comparación de la capacidad de soporte al 100 %



Nota: Se muestra los resultados de CBR

A continuación, se tiene la siguiente normativa de tabla 28, del (MTC, 2014) correspondiente a las categorías de la subrasante.

Tabla 28

Normas de las características de la sub rasante

Categorías de sub rasante	CBR
S0: Sub rasante inadecuada	$CBR < 3 \%$
S1: Sub rasante insuficiente	$De 3 \% \leq CBR < 6 \%$
S2: Sub rasante regular	$De 6 \% \leq CBR < 10 \%$
S3: Sub rasante buena	$De 10 \% \leq CBR < 20 \%$
S4: Sub rasante muy buena	$De 20 \% \leq CBR < 30 \%$
S5: Sub rasante extraordinaria	$30 \% \leq CBR$

Nota: Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC, 2014)

Finalmente se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.

Según César Antonio Vinuesa Elizalde (2014), en el proyecto de investigación, cuyo objetivo principal fue mejorar el CBR. Por ende, el suelo es de tipo limo arenoso donde capacidad portante que tiene el suelo, es de 28.8% de CBR, que es un valor muy bajo para el diseño del micropavimento, y se procederá a realizar una estabilización con órgano-silanos.

La estabilización con órgano-silanos se obtuvo 49.4% de CBR para 14 días de curado al dosificar 1.00 Lt/m³ por lo tanto, es perfecta para realizarla siempre y cuando no sea demasiado costoso.

Finalmente existe un aumento del CBR con dato 28.8% a 49.4% en este punto es muy favorable la subrasante de dicho proyecto en mención.

El contraste con nuestro proyecto de investigación se obtuvo resultado de CBR, del suelo natural no tratado de 9.23%. Y cuando se agrega la dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil, el CBR es de 36.78% para 14 días de curado.

Finalmente existe un aumento del CBR con dato 9.23% a 36.78% en este punto es muy favorable la subrasante de dicho proyecto en mención.

Según Odebrecht Angola (2013), estabilización e impermeabilización en arena limosa con nanotecnología terrasil, mejora el CBR.

4.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXPANSIÓN

Donde la tabla 29, se observa los siguientes cálculos de la expansión, que se asieron en el ensayo de laboratorio ah diferentes dosificaciones de aditivo terrasil.

Tabla 29

Resultados total del tiempo y expansión

Tiempo (hora)	Expansión	Expansión	Expansión	Expansión	Expansión
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	terrasil 0.00 (Lt/m ³)	terrasil 0.30 (Lt/m ³)	terrasil 0.50 (Lt/m ³)	terrasil 0.75 (Lt/m ³)	terrasil 1.00 (Lt/m ³)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	1.41	0.71	0.25	0.20	0.01
48	1.91	1.03	0.39	0.33	0.08
72	2.14	1.18	0.43	0.38	0.15
96	2.27	1.26	0.50	0.42	0.19

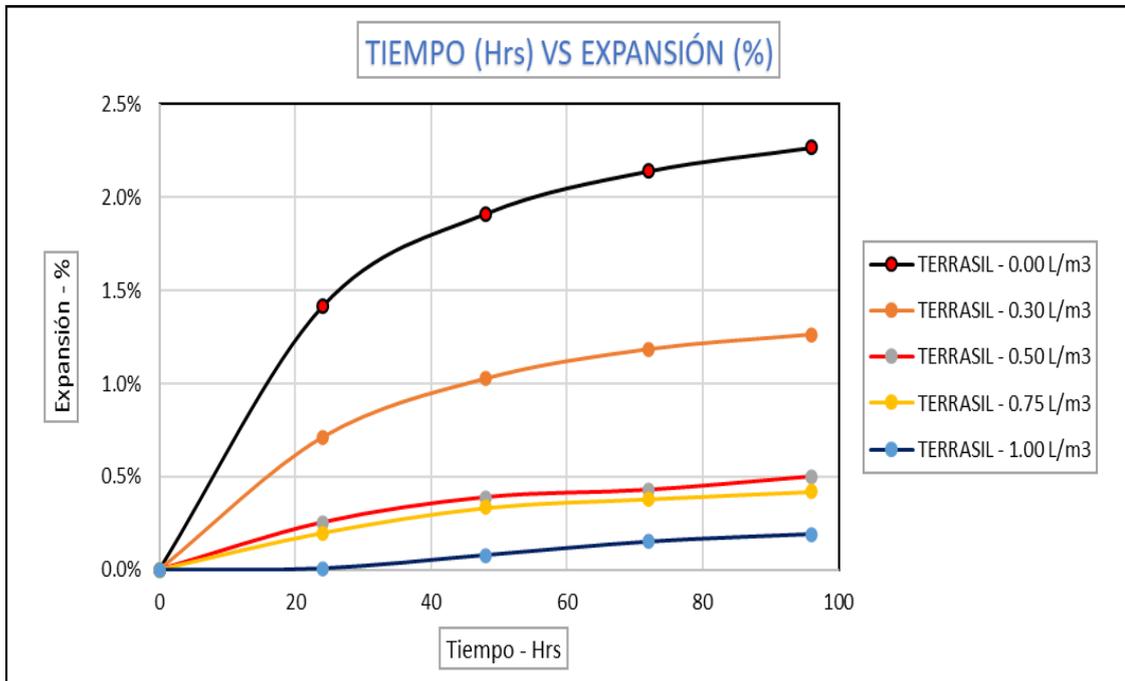
Nota: Elaboración propia.

4.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXPANSIÓN

Se observa que en la figura 32, donde el suelo natural no tratado presenta mayor expansión después de 96 horas, en comparación con los suelos tratados con terrasil, las muestras de suelo son remoldeadas adecuadamente.

Figura 32

Resumen de la gráfica total tiempo y expansión



Nota: Elaboración propia

Finalmente se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.

Según César Antonio Vinuesa Elizalde (2014), en su proyecto de investigación que tuvo como objetivo mejorar la expansión. Por ende, se obtuvo el esponjamiento suelo natural 0.08 cm a 96 horas.

La estabilización con órgano-silanos se obtuvo 0.02 cm de esponjamiento a 96 horas para 14 días de curado al dosificar 1.00 Lt/m³ por lo tanto, es perfecta para realizarla siempre y cuando no sea demasiado costoso.

Finalmente existe una disminución de expansión con dato 0.08 cm a 0.02 cm en este punto es muy favorable la subrasante de dicho proyecto en mención.

El contraste con nuestro proyecto de investigación se obtuvo resultado de expansión, del suelo natural no tratado de 2.27 cm a 96 horas. Y cuando se agrega la dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil, expansión es 1.27 cm a 96 horas para 14 días de curado.

Finalmente existe una disminución de expansión con dato 2.27 cm a 1.27 cm en este punto es muy favorable la subrasante de dicho proyecto en mención.

4.7. RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

Realizaron dos especímenes para suelo natural no tratado y 2 especímenes para diferentes dosificaciones del aditivo Terrasil, se midieron propiedades como la cohesión y la resistencia última, también los resultados del promedio de cada dosificación, permitiendo este aditivo a las propiedades mecánicas de suelo, esto se puede observar en la tabla 30.

Tabla 30

Resultados total de compresión no confinada

Dosificación	Especimen N°	Cohesión kg/cm ²	Promedio cohesión	qu Kg/cm ²	Promedio qu
Terrasil 0.00 Lt/m ³	1	0.015	0.013	0.029	0.025
	2	0.010		0.020	
Terrasil 0.30 Lt/m ³	3	0.015	0.015	0.029	0.029
	4	0.014		0.028	
Terrasil 0.50 Lt/m ³	5	0.013	0.015	0.025	0.031
	6	0.018		0.036	
Terrasil 0.75 Lt/m ³	7	0.016	0.016	0.032	0.032
	8	0.016		0.032	
Terrasil 1.00 Lt/m ³	9	0.016	0.020	0.032	0.039
	10	0.023		0.045	

Nota: Elaboración propia

4.8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

Se elaboraron 10 especímenes, 2 especímenes de muestra suelo natural, se calculó el resultado promedio total (UCS), se observa en la tabla 31.

Tabla 31

Resultados total de terrasil y UCS

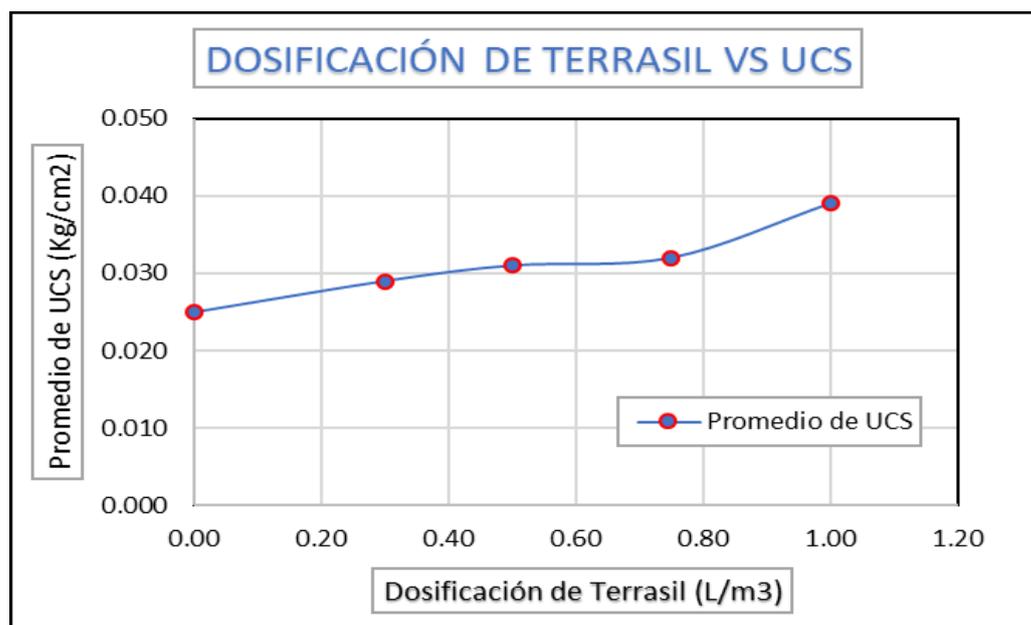
Dosificación de terrasil (Lt/m ³)	Promedio de UCS (Kg/cm ²)
0.00	0.025
0.30	0.029
0.50	0.031
0.75	0.032
1.00	0.039

Nota: Elaboración propia

Donde la tabla 31, se ve el aumento del (UCS), al aumentar la dosificación de terrasil.

Figura 33

Resumen de la gráfica total de terrasil y UCS



Nota: Elaboración propia

A continuación, se tiene la siguiente tabla 32, de la normativa del (MTC, 2017), correspondiente a la consistencia del suelo y la resistencia a la compresión simple.

Tabla 32

Normas de consistencia del suelo

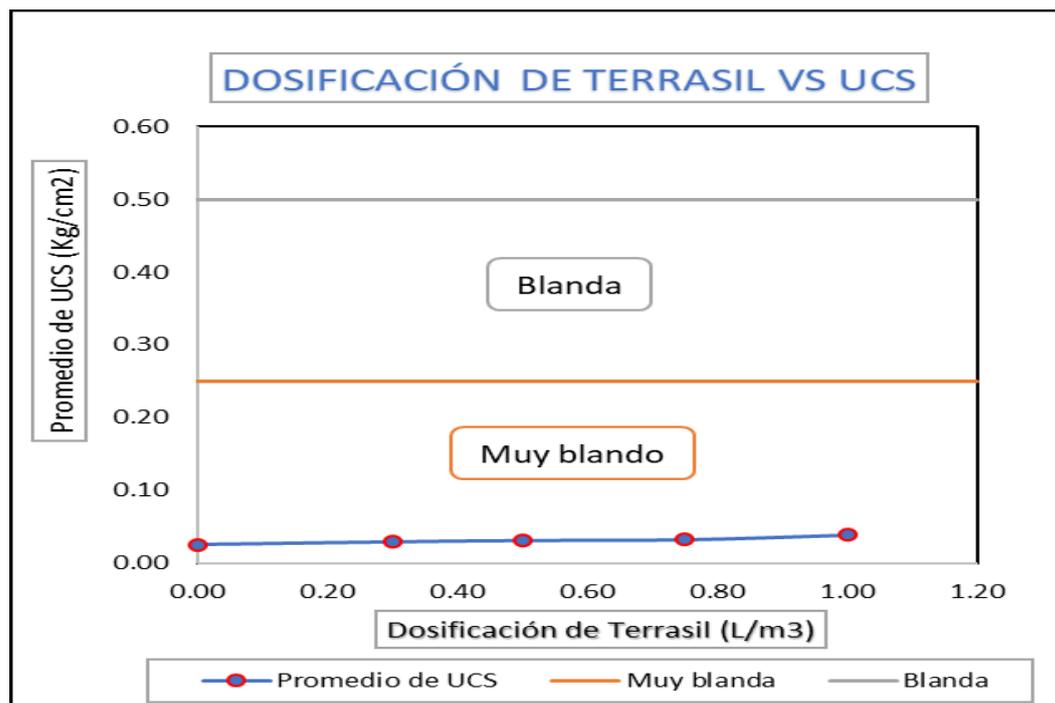
Consistencia del suelo	Resistencia a la Compresión no confinada	
	kg/cm ²	(kPa)
Muy blanda	< 0.25	(< 25)
Blanda	0.25 - 0.50	(25 - 50)
Mediana	0.50 - 1.00	(50 - 100)
Firme	1.00 - 2.00	(100 - 200)
Muy firme	2.00 - 4.00	(200 - 400)
Dura	> 4.00	(> 400)

Nota: Manual de ensayo de Materiales (MTC, 2017)

De los resultados obtenidos de ensayo de compresión simple con diferentes dosificaciones se obtuvo según la tabla 32, y con los resultados se obtuvo a qué tipo de consistencia es el suelo.

Figura 34

Ubicación dosificación de terrasil y UCS en consistencia del suelo



Nota: Elaboración propia



Según la figura 34, los ensayos en laboratorio para un suelo natural no tratado tienen un resultado de resistencia de UCS: 0.025 kg/cm^2 , se obtuvo resultado de consistencia suelo muy blanda.

Con dosificación de 0.30 Lt/m^3 de terrasil, se tiene un resultado de UCS: 0.029 kg/cm^2 , se obtuvo un resultado de consistencia suelo muy blanda.

Con dosificación de 0.50 Lt/m^3 de terrasil, se tiene un resultado de UCS: 0.031 kg/cm^2 , se obtuvo un resultado de consistencia suelo muy blanda.

Con dosificación de 0.75 Lt/m^3 de terrasil, se tiene un resultado de UCS: 0.032 kg/cm^2 , se obtuvo un resultado de consistencia suelo muy blanda.

Con dosificación de 1.00 Lt/m^3 de terrasil, se tiene un resultado de UCS: 0.039 kg/cm^2 , se obtuvo un resultado de consistencia suelo muy blanda.

La dosificación optada del aditivo terrasil es de 0.30 Lt/m^3 , este resultado no mejora significadamente las propiedades geotécnicas a la compresión no confinada UCS: 0.029 kg/cm^2 , se obtuvo un resultado de consistencia del suelo es muy blanda, este con el fin de economizar el aditivo terrasil.

Finalmente se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.

Según César Antonio Vinuesa Elizalde (2014), en su proyecto de investigación que tuvo como objetivo mejorar la compresión no confinada (UCS). Por ende, se obtuvo la compresión del suelo natural sometido a su compactación máxima se obtuvo una resistencia de una probeta de 2.39 Kg/cm^2 .



También se obtuvo la resistencia a la compresión simple del suelo estabilizando con órgano-silanos, tiene 12.46 kg/cm^2 a los 14 días de curado, al adicionar terrasil con 1.00 Lt/m^3 , lo cual permite tener una buena capacidad portante para soportar el paso del tráfico.

Finalmente existe un aumento a la compresión no confinada de (UCS) con resultados de 2.39 kg/cm^2 a 12.46 kg/cm^2 en este punto es muy favorable.

El contraste, con nuestro proyecto investigación se obtuvo resultados no muy significativos en base a las propiedades geotecnia, en donde compresión no confinada para un suelo natural no tratado se obtuvo por resistencia (UCS) de 0.025 kg/cm^2 , con la adición de la dosificación de 0.30 Lt/m^3 de terrasil, nos determinó un resultado de resistencia (UCS) de 0.029 kg/cm^2 .

Finalmente existe un aumento a la compresión no confinada (UCS) con resultados de 0.025 kg/cm^2 a 0.029 kg/cm^2 en este punto no es muy favorable la subrasante de dicho proyecto en mención.

Según Odebrecht Angola (2013), estabilización e impermeabilización en arena limosa con nanotecnología terrasil, mejora la compresión no confinada.

4.9. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO VEHICULAR

4.9.1. Estudio de tráfico vehicular

Se llevó a cabo un estudio de tráfico vehicular la cual permitió conocer el volumen de transporte que pasas por el lugar de estudio, es así que se calcula el (IMDa), a partir del cálculo de dicho parámetro se procederá a realizar el diseño de acuerdo a lo que establece el manual del (MTC, 2014).

4.9.2. Recopilación de información

Lo primero que se hizo fue identificar el lugar de estudio del proyecto de investigación, luego se determinó el tiempo de estudio que se demorara, el tramo de carretera y el sentido de carretera. Luego eso se hizo el conteo vehicular para cada tipo de vehículo, según su tipo de ejes determinados.

Tabla 33

Ubicación del proyecto

Generalidades	Descripción
Carretera	Yunguyo – puno
Sentido	Ambos sentidos
Lugar	Distrito de Yunguyo
Período de Tiempo para Conteo	07/05/2024 – 13/05/2024

Nota: Referencia MPY. Mantenimiento de la carretera (chacachaca - kasani – Yunguyo) - provincia Yunguyo – puno.

En la tabla 33, se observa los datos proyecto estudio, el periodo de tiempo de conteo vehicular, la ubicación del lugar, el sentido de carretera, el tramo de estudio de la carretera.

4.9.3. Conteo de tráfico vehicular

Luego del estudio de tráfico vehicular de siete días de la semana, se anotaron los resultados del conteo de distintos vehículos por día, estos nos ayudaron a determinar la cantidad de unidades vehiculares que pasan por hora, por día y por semana. A continuación, se indican los registros del conteo del transporte, esto se puede observar en la tabla 34.

Tabla 34*Estudio de conteo de tráfico semanal*

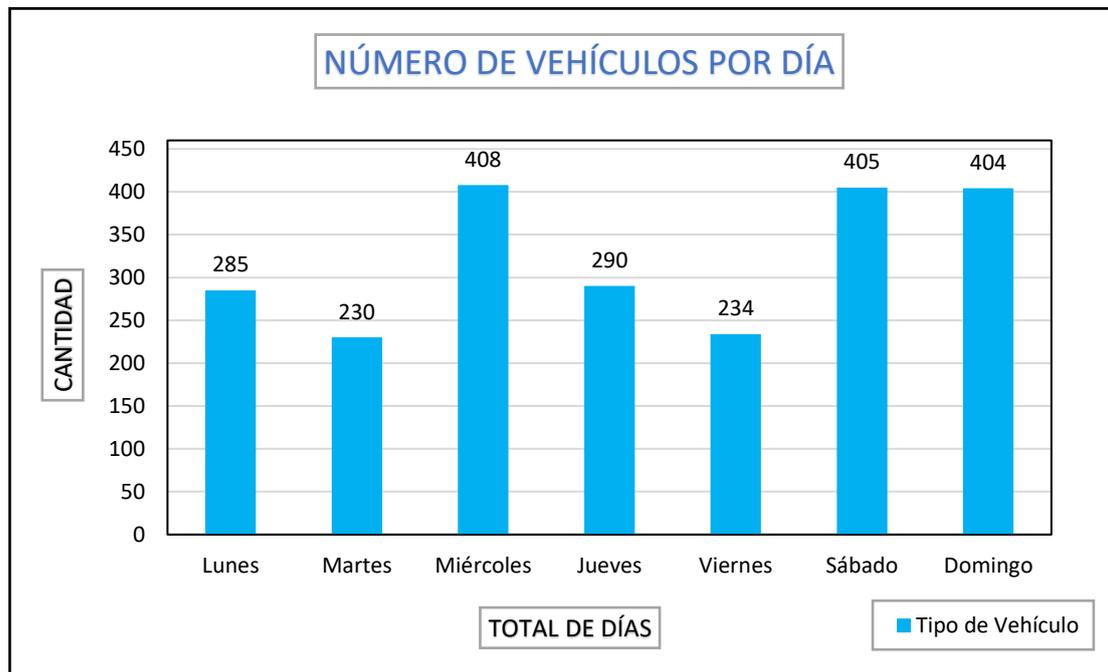
Tipo de vehículo	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do
Auto livianos	62	54	87	62	51	74	82
S. Wagon	32	24	44	33	26	49	58
Camioneta (Pickup)	30	27	45	34	24	66	42
C. Rural (Combi)	63	39	84	63	53	94	73
Bus 2E	5	4	7	6	3	5	7
Bus 3E	10	8	13	13	9	11	20
Camión 2E	32	28	49	33	28	54	60
Camión 3E	19	19	27	16	15	19	21
Camión 4E	5	5	7	5	4	7	7
Semitrayler (T2S1 / T2S2)	3	3	5	3	2	1	5
Semitrayler (T2S3)	5	3	8	4	3	5	6
Semitrayler (T3S1 / T3S2)	3	3	5	3	3	2	6
Semitrayler (T3S3)	8	6	16	7	6	8	8
Trayler (C3R2)	3	3	4	2	3	2	4
Trayler (C3R3)	5	4	7	6	4	8	5
TOTAL	285	230	408	290	234	405	404

Nota: Referencia MPY. Mantenimiento de la carretera (chacachaca - kasani – Yunguyo) -provincia Yunguyo – puno.

En la tabla 34, con base en los datos proporcionados semanal, donde el miércoles registra el mayor flujo de vehículos (408) y el martes el menor (230), se pueden generar las siguientes representaciones gráficas para ilustrar el comportamiento semanal del tráfico, todo este estudio es referenciado de la municipalidad provincial de Yunguyo, de mantenimiento de carreteas chacachaca - kasani – Yunguyo. Donde podemos ver en la figura 35.

Figura 35

Gráfica de número de vehículos por día



Nota: Elaboración propia

4.9.4. Factor de corrección

Para calcular el (IMDa), se debe tener conocimiento factor corrección correspondiente al mes de mayo, obtenido información de provias nacional – ministerio de transporte y comunicaciones (MTC). Los elementos de modificación promedio útil (2010 al 2020), estación de peaje Ilave como punto de referencia al tramo de estudio. A continuación, se indican factor de corrección estacional, esto se puede observar en la tabla 35.

Tabla 35

Factores estacionales

Peaje de Ilave	Valor
F.C.E.T. ligeros	1.106727
F.C.E.T. pesados	1.024477

Nota: Actualizados periódicamente por la (OPMI, MTC)

4.9.5. Cálculo del índice medio diario anual (IMDa)

Para calcular el (IMDa), se determina primero el factor de corrección, donde se tiene como referencia periódicamente por la (OPMI, MTC) se calcula:

Tabla 36

Determinación del IMDa

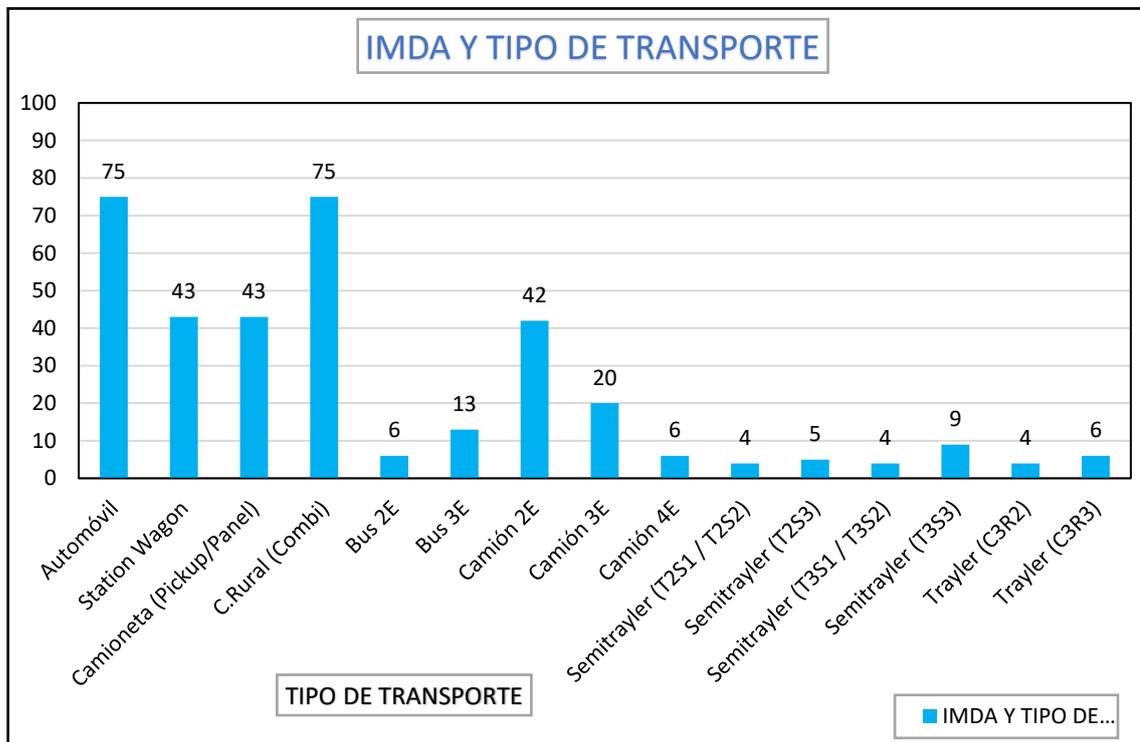
Tipo de vehículo	Tráfico en dos sentidos por día							Total	IMDs	FC	IMDa
	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do				
Autos livianos	62	54	87	62	51	74	82	472	67	1.107	75
S. Wagon	32	24	44	33	26	49	58	266	38	1.107	43
Camioneta (Pickup)	30	27	45	34	24	66	42	268	38	1.107	43
C. Rural (Combi)	63	39	84	63	53	94	73	469	67	1.107	75
Bus 2E	5	4	7	6	3	5	7	37	5	1.024	6
Bus 3E	10	8	13	13	9	11	20	84	12	1.024	13
Camión 2E	32	28	49	33	28	54	60	284	41	1.024	42
Camión 3E	19	19	27	16	15	19	21	136	19	1.024	20
Camión 4E	5	5	7	5	4	7	7	40	6	1.024	6
Semitrayler (T2S1 / T2S2)	3	3	5	3	2	1	5	22	3	1.024	4
Semitrayler (T2S3)	5	3	8	4	3	5	6	34	5	1.024	5
Semitrayler (T3S1 / T3S2)	3	3	5	3	3	2	6	25	4	1.024	4
Semitrayler (T3S3)	8	6	16	7	6	8	8	59	8	1.024	9
Trayler (C3R2)	3	3	4	2	3	2	4	21	3	1.024	4
Trayler (C3R3)	5	4	7	6	4	8	5	39	6	1.024	6
TOTAL	285	230	408	290	234	405	404	2256	322		355

Nota: Elaboración propia

Según la tabla 36, se obtiene como IMDa de 355, según el reglamento de carretas (DG, 2018) se considera carretera de tercera clase, siendo el de más incidencia el correspondiente al automóvil con 472 en total.

Figura 36

Gráfica del IMDa por tipo de vehículos



Nota: Elaboración propia

El manual para el diseño de carretera pavimentada de bajo volumen de tránsito (MTC, 2008) nos da a conocer el ancho de calzada y el modelo de superficie de rodadura a utilizar, tal como lo muestra en la tabla 37.

Tabla 37

descripción de la norma de carretera bajo volumen transito

IMDa	Ancho de calzada (m)	Tipo rodadura
(0 a 350)	Una carretera de dos carriles con un ancho de 5.5 metros	Desde tratamiento superficiales asfálticas
	Una carretera de 4 metros de ancho para un solo carril	Incluye una carpeta asfáltica

Nota: Elaboración propia.

4.9.6. Clasificación vehicular promedio

Realizaron el porcentaje promedio de vehículos, según su clasificación para distintos vehículos, fueron automóvil, Station Wagon, camioneta (Pick up/panel), combis, bus, camiones, semitrayer, trayler, estos fueron los más concurridos por el lugar siendo el conteo vehicular. A continuación, se indican índice medio diario anual, esto se puede observar en la tabla 38.

Tabla 38

Porcentaje de incidencia del IMDa

Tipo de vehículo	IMDa	Distribución (%)
Autos livianos	75	21.13
S. Wagon	43	12.11
Camioneta (Pickup)	43	12.11
C. Rural (Combi)	75	21.13
Bus 2E	6	1.69
Bus 3E	13	3.66
Camión 2E	42	11.83
Camión 3E	20	5.63
Camión 4E	6	1.69
Semitrayler (T2S1 / T2S2)	4	1.13
Semitrayler (T2S3)	5	1.41
Semitrayler (T3S1 / T3S2)	4	1.13
Semitrayler (T3S3)	9	2.54
Trayler (C3R2)	4	1.13
Trayler (C3R3)	6	1.69
TOTAL	355	100.00

Nota: Elaboración propia.

Donde la tabla 38, que la mayor cantidad de porcentaje de incidencia fue el de automóviles y combis rural con el 21.13% y los menores cantidad

porcentajes se encontraron en los camiones semitrayer y trayler con 1.13% segundo el índice medio diario anual (IMDa).

4.9.7. Crecimiento de tasa anual

Tasa de aumento anual de la población, región Puno (vehículos de ligeros) es de: 2.47 y tasa de aumento anual de PBI regional, región Puno (vehículos de pesados) es de: 2.58, la información es hasta 2022, sin contar las distorsiones estadísticas provocadas por el impacto económico de la covid 19.

Tabla 39

Proyección de tráfico a 10 años

Tipo de vehículo	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Tráfico normal	355	364	373	382	392	402	412	422	433	444
Automóvil	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93
Station Wagon	43	44	45	46	47	49	50	51	52	54
Camioneta (Pickup/Panel)	43	44	45	46	47	49	50	51	52	54
C. Rural (Combi)	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93
Micro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 2E	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7
Bus 3E	13	13	14	14	14	15	15	15	16	16
Bus 4E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Camión 2E	42	43	44	45	47	48	49	50	52	53
Camión 3E	20	21	21	22	22	23	23	24	25	25
Camión 4E	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8
Semitrayler (T2S1 / T2S2)	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
Semitrayler (T2S3)	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
Semitrayler (T3S1 / T3S2)	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
Semitrayler (T3S3)	9	9	9	10	10	10	10	11	11	11
Trayler (C2R2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trayler (C2R3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trayler (C3R2)	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
Trayler (C3R3)	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8

Nota: elaboración propia

Se observa que en la tabla 39, se obtuvieron los resultados para un tiempo de diseño a 10 años, que fue proyecto la vida útil de la estructura de la carpeta asfáltica de la investigación.

4.10. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE TRÁFICO VEHICULAR

El estudio de tráfico vehicular se referencio a la norma (DG, 2018) cuyo tiempo conteo vehicular fue los días 07/05/2022 al 13/05/2022, donde el resultado IMDa es de 355, se considera carretera de tercera clase, considerando el factor de corrección, F.C.E. transporte ligero de 1.106727 y F.C.E. transporte pesado de 1.106727, estos valores fueron obtenidos de peaje llave y el proyecto de tráfico es de 10 años.

El manual para el diseño de carretera pavimentada de bajo volumen de tránsito (MTC, 2008) según sus resultados estamos tratando de una carretera de bajo volumen de tránsito.

Según la tasa proyección de la demanda de acuerdo al conteo vehicular, para la región puno es de 2.47 (vehículos de ligeros) y 2.58 (vehículos de pesados).

Ya conociendo la tasa de crecimiento se pudo determinar la proyección de tráfico para un período de 10 años, según la norma que lo estipula el manual de carreteras: Suelos geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2014).

Finalmente se tomaron los datos de referencia municipalidad provincial de Yunguyo “MPY. Mantenimiento de la carretera (chacachaca - kasani – Yunguyo) - provincia Yunguyo – puno” para el conteo vehicular.

Por ejemplo, podemos verificarlo los estudios que realizaron, Franco V., José Luis y Vargas L, Margareth Wendy (2021) y Colana A., Roció Y. Y Torres C., Yoel S. (2023).

4.11. RESULTADOS DEL DISEÑO DE ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE TIPO DE SUELO NO TRATADO

4.11.1. Diseño de pavimento flexible

El en diseño de pavimento flexible se determinó bajo la norma de AASHTO 93, con los resultados ensayo de (CBR) y el estudio ejes equivalente (ESALS) las cuales fueron importantes para el diseño de la carpeta asfáltica.

4.11.2. Diseño (ESALS)

El valor fue determinado empleando la tabla 41, el resultado obtenido:

$$N_{rep\ de\ EE_{8.2tn}} = 1409163.56$$

El valor calculado se utiliza para clasificar la vía de acuerdo con el nivel de tráfico pesado expresado en termino ejes equivalentes (ESALS): Según la tabla 7, el tipo de tráfico de la vía en estudio está clasificada como T_{P5} .

4.11.3. Módulo de resiliencia

Según el reglamento de Manual de Carretera (MTC, 2014), son variables que representa la rigidez de la subrasante basado en el CBR obtenido en el estudio de mecánica de suelos.

Se determina mediante la ecuación:

$$M_r(psi) = 2555xCBR^{0.64}$$

Con un valor del 9.23% de CBR, el módulo de resiliencia resulta:

$$M_r = 10595.46$$

4.11.4. Confiabilidad

La probabilidad de que esta estructura del pavimento se ajuste de acuerdo con lo previsto se refiere a la confiabilidad del diseño. Esta confiabilidad se calcula teniendo en cuenta varios factores clave que afectan el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil, como el tipo de vía y el número de ejes, según la tabla 8, la confiabilidad elegida para la presente investigación fue:

$$R(\%) = 85.00$$

4.11.5. Coeficiente estadístico de desviación estándar normal

Según el Manual de Diseño de Carreteras Y el Método AASHTO (Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte), Probabilidad de desempeño del nivel de confiabilidad, es un hecho no puede reemplazarse directamente en modelo probabilístico o factor de seguridad adecuado, según la tabla 9, se escoge un valor de:

$$Z_r = -1.036$$

4.11.6. Desviación estándar combinada

Según el Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC, 2014), coeficiente de variabilidad o factor de ajuste de variaciones entre los factores de diseño. Este valor que oscila entre 0.40 y 0.50, para la presente investigación el valor tomado fue:

$$S_o = 0.45$$

4.11.7. Índice de servicialidad presente

Es el valor numérico que representa la comodidad que es 1 al 5 donde: 5 indica máximo y 1 indica el mínimo. Este valor decrece con el tiempo debido a

factores como el uso el tráfico, las condiciones climáticas y otros, que afectan el estado del pavimento, y se determina restando los resultados de servicialidad inicial y final de la vía.

4.11.7.1.Servicialidad inicial

Este valor refleja la calidad del pavimento en condiciones óptimas y se determina principalmente en función del rango de tráfico que se espera para esa vía como la comodidad ofrecida por una vía nueva. Su valor se determina acorde al rango de tráfico, tal como se muestra en la tabla 10.

$$P_i = 4.0$$

4.11.7.2.Servicialidad final

La condición de una vía deteriorada que requiere mantenimiento se expresa mediante un valor que refleja el estado del pavimento en relación con su necesidad de intervención la condición de la vía ya deteriorada y en la cual es necesario realizar mantenimiento, se utiliza los métodos empíricos AASHTO, tal como se muestra en la tabla 11.

$$P_T = 2.5$$

4.11.7.3.Diferencial de servicialidad

Es la determinación del resultado al restar la servicialidad inicial menos la final

$$\Delta PSI = 1.50$$

4.11.8. Número estructural

El espesor de la estructura total del pavimento, es la suma de los espesores de todas las capas. El cálculo del espesor total del pavimento se realiza con el uso de métodos analíticos, como los proporcionados por AASHTO. Entre los datos a utilizar están:

Tabla 40

Resumen para el diseño del pavimento

Datos de diseño para pavimento flexible	
W_{18}	1,409,163.56
CBR (%)	9.23
M_R	10,575.46
R (%)	85
Z_R	-1.036
S_o	0.45
ΔPSI	1.50

Nota: Elaboración propia

Se observa en la tabla 40, está todos resultado para el diseño de pavimento flexible, para suelo no tratado.

4.11.8.1. Método analítico

De tabla 42, todos los resultados se remplazan en la fórmula:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07$$

y obteniendo valor número estructural de:

$$SN = 3.148$$

4.11.9. Determinación del espesor de las capas estructurales del pavimento

Para determinar espesor total de estructura del pavimento, debemos tener los valores de coeficientes estructurales de cada capa, estos resultados se deben

determinan en base a la tabla 12, 13 y 14, así como también se debe determinar los valores de coeficientes de drenaje y estos se determinan mediante las tablas 15 y 16, considerar un escenario más favorable con un tiempo óptimo de evacuación de agua de 24 horas, esto nos permite tener diseño más conservador. El proceso que describe consiste en seleccionar un coeficiente de drenaje, adecuado (en este caso) 1.00 y luego para determinar los espesores de las capas del pavimento iteramos en la ecuación hasta que alcance al número estructural previamente determinado.

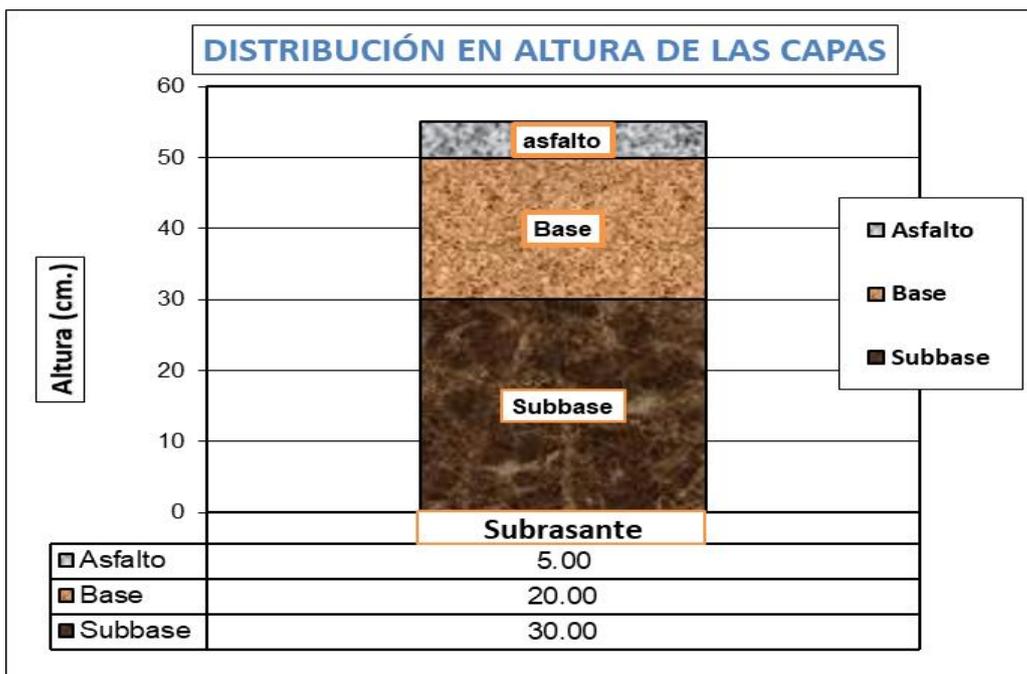
$$SN = 0.170 * a1 + 0.052 * a2 * 1.00 + 0.047 * a3 * 1.00 = 3.148$$

Donde llegamos de establecer las ecuaciones y se determinaron las capas del pavimento flexible:

$$SN = 3.148 = 0.170 * 5 + 0.052 * 20 * 1.00 + 0.047 * 30 * 1.00 = 3.300$$

Figura 37

Distribución en altura de las capas



Nota: Elaboración propia



4.12. DISCUSIÓN DEL RESULTADOS DEL DISEÑO ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE TIPO DE SUELO NO TRATADO

Según el resultado se tiene que el ESAL de 1409163.56, la dosificación de terrasil es de 0.00 Lt/m³, el resultado del CBR a 9.23%, este resultado se categoriza como una subrasante regular, y el resultado del módulo de resiliencia de la subrasante Mr.: 10595.46 y el tipo de tráfico fue TP5, y el número de etapas fue 1, el resultado de nivel de confiabilidad fue R.: 85.00%, y el resultado coeficiente estadístico de desviación estándar normal es Zr: -1.036, y el resultado de desviación estándar combinado So: 0.45 y el resultado de serviciabilidad inicial Po: 4.00, y el resultado de serviciabilidad final Pt: 2.50, y la diferencia de serviciabilidad Δ PSI (Po-Pt): 1.50.

Según los resultados por método analítico se obtuvo un número estructural (SN) de 3.148, y el resultado diseño se determinó: 5 cm de pavimento, 20 cm de base, y 30 cm subbase.

Finalmente se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.

La metodología AASHTO 93 proporciona un marco robusto y detallado para el diseño de pavimentos, basado en pruebas empíricas y análisis de tráfico. Esta metodología permite ajustar los espesores de las capas del pavimento y los materiales utilizados, de manera que el pavimento sea capaz de soportar las cargas de tráfico y las condiciones del terreno durante su vida útil. El Manual de Carreteras (MTC, 2014) que se basa en AASHTO 93 ofrece directrices adicionales para adaptar el diseño a las condiciones locales y asegurar su efectividad a largo plazo.

Por ejemplo, podemos verificarlo los estudios que realizaron, Franco V., José Luis y Vargas L, Margareth Wendy (2021).

4.13. RESULTADOS DEL DISEÑO ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE TIPO DE SUELO AL INCORPORARLE 0.30 Lt/m³ DE TERRASIL

4.13.1. Diseño de pavimento flexible

El en diseño de pavimento flexible bajo la metodología AASHTO 93, ESAL Y CBR fue necesario determinar los parámetros fundamentales que influyen sobre la funcionalidad de los pavimentos.

4.13.2. Diseño (ESALs)

El valor fue determinado empleando la tabla 41, el resultado obtenido:

$$N_{rep\ de\ EE_{8,2tn}} = 1409163.56$$

El valor calculado se utiliza para clasificar la vía de acuerdo con el nivel de tráfico pesado expresado en termino ejes equivalentes (ESAL): Según la tabla 7, el tipo de tráfico de la vía en estudio está clasificada como T_{P5} .

4.13.3. Módulo de resiliencia

Según el reglamento de Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, es aquel parámetro que representa la rigidez de la subrasante en base al, CBR obtenido en el estudio de mecánica de suelos.

Se calculó con la siguiente fórmula:

$$M_r(psi) = 2555xCBR^{0.64}$$

Con un valor del 36.78% de CBR, el módulo de resiliencia resulta:

$$M_r = 25667.43$$

4.13.4. Confiabilidad

La probabilidad de que esta estructura del pavimento se ajuste de acuerdo con lo previsto se refiere a la confiabilidad del diseño. Esta confiabilidad se calcula teniendo en cuenta varios factores clave que afectan el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil, como el tipo de vía y el número de ejes, según la tabla 8, la confiabilidad elegida para la presente investigación fue de:

$$R(\%) = 85.00$$

4.13.5. Coeficiente estadístico de desviación estándar normal

Según el Manual de Diseño de Carreteras Y el Método AASHTO (Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte), Probabilidad de desempeño del nivel de confiabilidad, es un hecho no puede reemplazarse directamente en modelo probabilístico o factor de seguridad adecuado, según la tabla 9, se escoge un valor de:

$$Z_r = -1.036$$

4.13.6. Desviación estándar combinada

Según el Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, coeficiente de variabilidad o factor de ajuste de variaciones entre los factores de diseño. Este valor (que oscila entre 0.40 y 0.50) para la presente investigación el valor tomado fue:

$$S_o = 0.45$$

4.13.7. Índice de servicialidad presente

Es el valor numérico que representa la comodidad que es 1 al 5, donde: 5 indica máximo y 1 indica el mínimo. Este valor decrece con el tiempo debido a

factores como el uso, el tráfico, las condiciones climáticas y otros, que afectan el estado del pavimento, y se determina restando los resultados de servicialidad inicial y final de la vía.

4.13.7.1. Servicialidad inicial

Este valor refleja la calidad del pavimento en condiciones óptimas y se determina principalmente en función del rango de tráfico que se espera para esa vía como la comodidad ofrecida por una vía nueva. Su valor se determina acorde al rango de tráfico, tal como se muestra en la tabla 10.

$$P_i = 4.0$$

4.13.7.2. Servicialidad final

La condición de una vía deteriorada que requiere mantenimiento se expresa mediante un valor que refleja el estado del pavimento en relación con su necesidad de intervención la condición de la vía ya deteriorada y en la cual es necesario realizar mantenimiento, se utiliza los métodos empíricos AASHTO, tal como se muestra en la tabla 11.

$$P_T = 2.5$$

4.13.7.3. Diferencial de servicialidad

Es el resultado al restar la servicialidad inicial menos la final.

$$\Delta PSI = 1.50$$

4.13.8. Número estructural

El espesor de la estructura total del pavimento, es la suma de los espesores de todas las capas. El cálculo del espesor total del pavimento se realiza con el uso

de métodos analíticos, como los proporcionados por AASHTO. Entre los datos a utilizar están:

Tabla 41

Resumen para el diseño del pavimento

Datos de diseño para pavimento flexible	
W_{18}	1,409,163.56
CBR (%)	36.78
M_R	25,667.43
R (%)	85
Z_R	-1.036
S_o	0.45
ΔPSI	1.50

Nota: Elaboración propia

Se observa en la tabla 41, está todos resultado para el diseño de pavimento flexible, para suelo tratado.

4.13.8.1. Método analítico:

De tabla 43, todos los resultados se remplazan en la fórmula

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Y obteniendo valor número estructural de:

$$SN = 2.210$$

4.13.9. Determinación del espesor de las capas estructurales del pavimento

Para determinar espesor total de estructura del pavimento, debemos tener los valores de coeficientes estructurales de cada capa, estos resultados se deben determinar en base a la tabla 12, 13 y 14, así como también se debe determinar los valores de coeficientes de drenaje y estos se determinan mediante las tablas 15

y 16, considerar un escenario más favorable con un tiempo óptimo de evacuación de agua de 24 horas, esto nos permite tener diseño más conservador.

El proceso que describe consiste en seleccionar un coeficiente de drenaje, adecuado (en este caso) 1.00 y luego para determinar los espesores de las capas del pavimento iteramos en la ecuación hasta que alcance al número estructural previamente determinado.

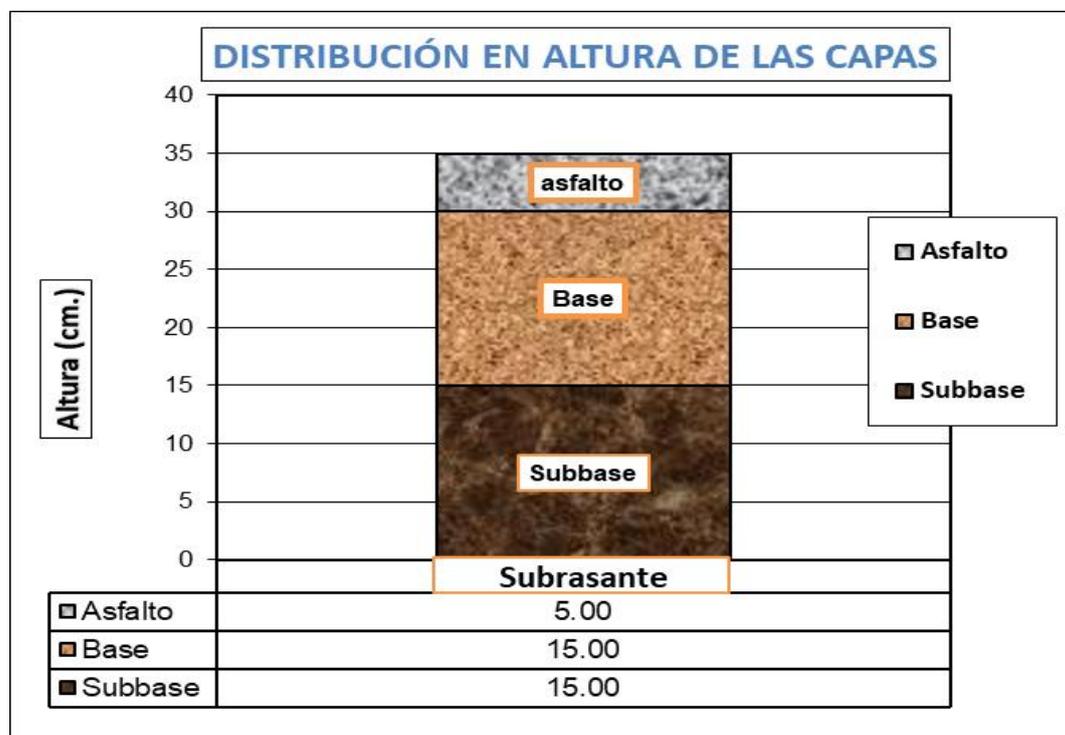
$$SN = 0.170 * a1 + 0.052 * a2 * 1.00 + 0.047 * a3 * 1.00 = 2.210$$

Donde llegamos de establecer las ecuaciones y se determinaron las capas del pavimento flexible:

$$SN = 2.210 = 0.170 * 5 + 0.052 * 15 * 1.00 + 0.047 * 15 * 1.00 = 2.335$$

Figura 38

Distribución en altura de las capas



Nota: Elaboración propia



4.14. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL DISEÑO ESPESOR DE LA CARPETA EN ESTE TIPO DE SUELO AL INCORPORARLE 0.30 Lt/m³ DE TERRASIL

Según el resultado se tiene que el ESAL de 1409163.56, la dosificación óptima de terrasil es de 0.30 Lt/m³, este resultado mejora la dosificación del CBR a 36.78%, con resultado sea obtenido como una subrasante excelente, este con el fin de economizar aditivo terrasil, y el resultado del módulo de resiliencia de la subrasante Mr.: 25667.43 y el tipo de tráfico fue TP5, y el número de etapas fue 1, el resultado de nivel de confiabilidad fue R.: 85.00 %, y el resultado coeficiente estadístico de desviación estándar normal es Zr: -1.036, y el resultado de desviación estándar combinado So: 0.45 y el resultado de serviciabilidad inicial Po: 4.00, y el resultado de serviciabilidad final Pt: 2.50, y la diferencia de serviciabilidad Δ PSI (Po-Pt): 1.50.

Según los resultados por método analítico se obtuvo un número estructural (SN) de 2.210, y el resultado diseño se determinó: 5 cm de pavimento, 15 cm de base, y subbase 15 cm de subbase, resultado de la investigación se izaron con el fin de comparar la eficiencia, es decir gastar menos de lo debido.

Finalmente se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.

La metodología AASHTO 93 proporciona un marco robusto y detallado para el diseño de pavimentos, basado en pruebas empíricas y análisis de tráfico. Esta metodología permite ajustar los espesores de las capas del pavimento y los materiales utilizados, de manera que el pavimento sea capaz de soportar las cargas de tráfico y las condiciones del

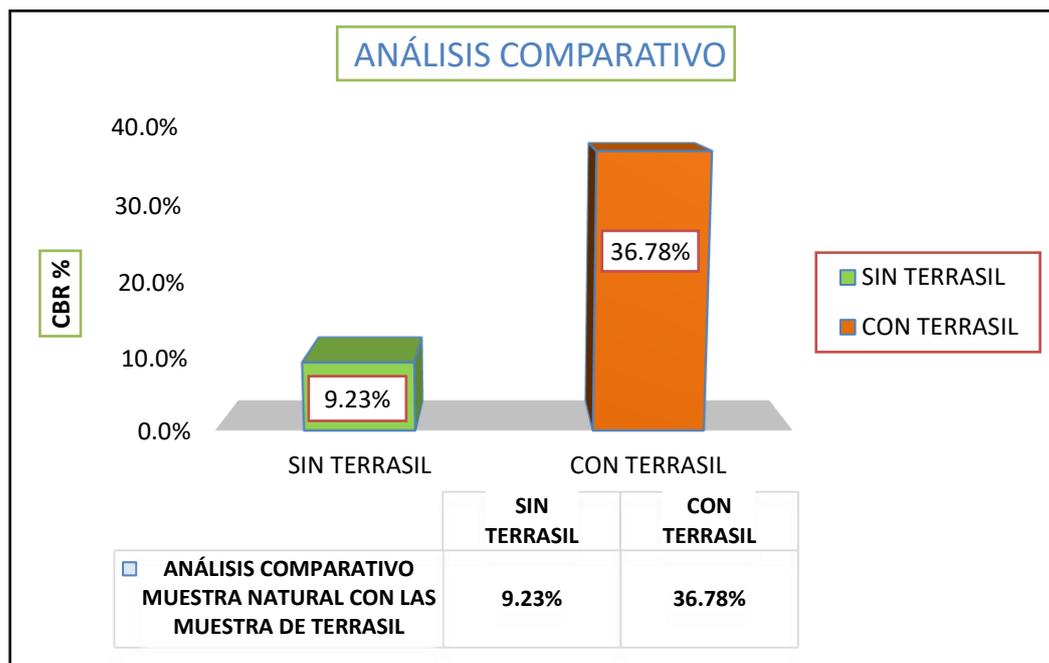
terreno durante su vida útil. El Manual de Carreteras (MTC, 2014) que se basa en AASHTO 93 ofrece directrices adicionales para adaptar el diseño a las condiciones locales y asegurar su efectividad a largo plazo

Por ejemplo, podemos verificarlo los estudios que realizo, Franco V., José Luis y Vargas L, Margareth Wendy (2021).

Por ejemplo, podemos verificarlo los estudios que realizo, Colana A., Roció Y. Y Torres C., Yoel S. (2023).

Figura 39

Análisis comparativo de las dos muestras



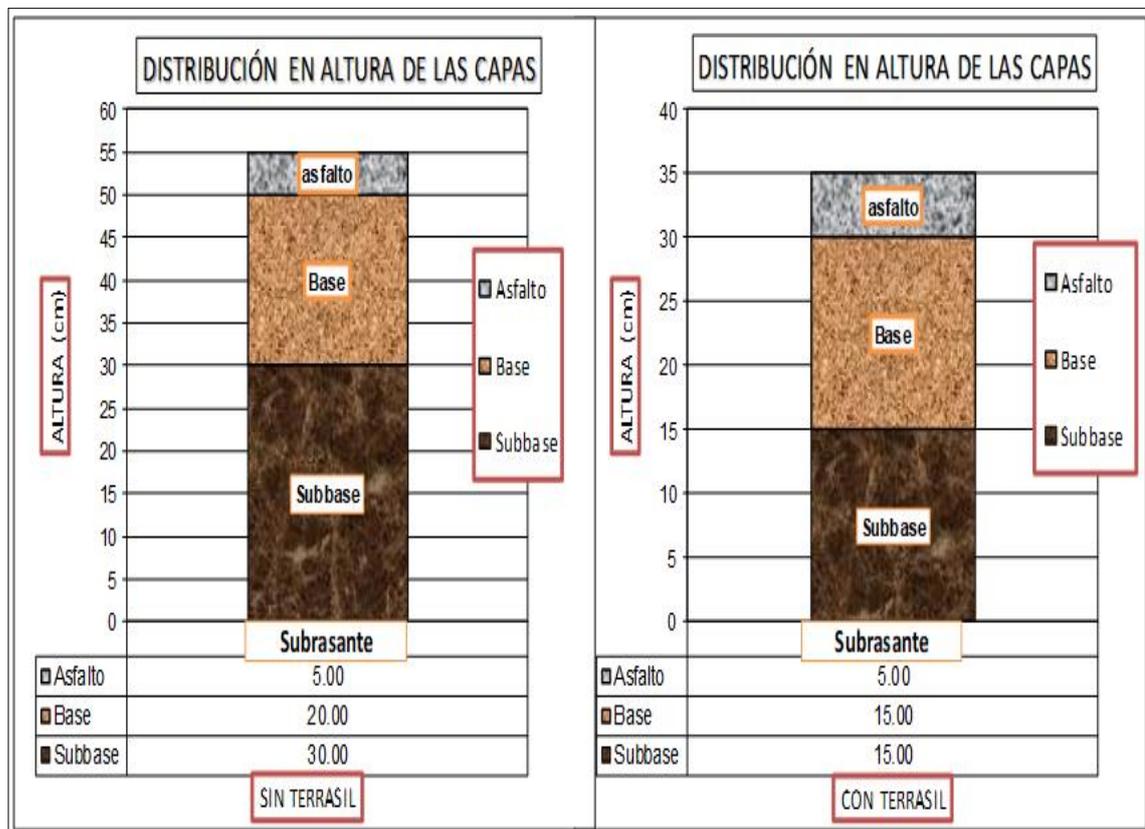
Nota: Elaboración propia

En la figura 39, el análisis comparativo del índice de CBR (California Bearing Ratio) entre el suelo natural y el suelo dosificado con terrasil revela un mejoramiento significativo de las propiedades geotécnicas del suelo tras la adición del aditivo Suelo Natural: CBR de 9.23%, este valor indica una capacidad de soporte relativamente baja, lo que sugiere que el suelo tiene dificultades para resistir cargas de tráfico y puede

necesitar mejoras para ser adecuado para la construcción de pavimentos. Suelo Dosificado con terrasil (0.30 Lt/m³): CBR de 36.78%, este aumento significativo en el CBR muestra que la estabilización con terrasil mejora la capacidad de carga del suelo, haciendo que el material suelo sea más adecuado en la subrasante del pavimento. El incremento de 27.55% en el CBR es un indicador de mejora en la resistencia al esfuerzo de penetración, lo que contribuye a una mayor durabilidad y estabilidad del pavimento.

Figura 40

Análisis comparativo de la estructura del pavimento



Nota: Elaboración propia

En la figura 40, se análisis el comparativo de la estructura de las capas para un suelo natural y para un suelo dosificado con terrasil ah 0.30 Lt/m³, donde se diferencia el espesor de la base, subbase. Este enfoque asegura que el pavimento se mantenga funcional y resistente a lo largo de los años.



4.15. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Se evaluó la siguiente variable y se validó la hipótesis mediante la recogida de datos estadísticos con diferentes dosificaciones de aditivo terrasil de: 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, para la elaboración de distintos ensayos.

4.15.1. Prueba de anova límite de consistencia

Ho: las medias de los datos de IP son iguales

Ha: las medias de los datos IP son diferentes

Regla de decisión

Regla de decisión

P – valor

Valor crítico

Rechazar Ho si $p < \alpha$

Rechazar Ho si $F > F_c$

Confiabilidad: 95%

Error o significancia establecida: 5% = 0.05 = α

Tabla 42

Prueba de anova índice de plasticidad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad P	Valor crítico F
Entre las muestras	9.7248	4	2.431	48624	1.17268E-11	5.1921677
Dentro de las muestras	0.00025	5	5E-05			
TOTAL	9.72505	9				

Nota: Material propio.

primer caso: p - valor

En la tabla 42, análisis de varianza existe una significancia P de 1.17268E-11, para el índice de plasticidad, la cual es menor ah alfa a la significancia establecida de 0.05.

Conclusión

Es decir, de debe rechazar la hipótesis nula y debe aceptar la hipótesis alternativa, las medidas de la dosificación de terrasil son diferentes o los resultados de datos del IP son diferentes, lo que indica que si existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos a la subrasante.

Segundo caso: valor critico

En la tabla 42, análisis de varianza existe una significancia F de 48624, para el índice de plasticidad, la cual es mayor valor critico F de 5.19216777.

Conclusión

Por lo tanto, también de debe rechazar la hipótesis nula y debe aceptar la hipótesis alternativa, todos estos resultados fueron determinado en Excel.

Tabla 43

Prueba post hoc de tukey para límite de consistencia

Diferencia dosificaciones con Terrasil	Diferencia muestral	Decisión
0.00 Lt/m ³ - 0.30 Lt/m ³	1.65	significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	2.11	significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	2.17	significativa
0.00 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	2.97	significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	0.46	significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.52	significativa
0.30 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	1.32	significativa
0.50 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.06	significativa
0.50 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.86	significativa
0.75 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.80	significativa

Nota: Material propio.



En la tabla 43, se aprecia la prueba post hoc de Tukey de 0.03, en donde se detallan las medias que no fueron mencionadas en la tabla 54, existe diferencias entre las muestras 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, que son mayores a tukey de 0.03 que establece que los datos son diferentes, lo que indica que si existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos terrasil a la subrasante.

Conclusión

Podemos decir que resultados de la dosificación de terrasil 0.00 Lt/m³ ≠ 0.30 Lt/m³ ≠ 0.50 Lt/m³ ≠ 0.75 Lt/m³ ≠ 1.00 Lt/m³, todos estos resultados fueron determinado en análisis datos en programa Excel.

4.15.2. Prueba de anova para (CBR)

Ho: las medias de los datos de CBR son iguales

Ha: las medias de los datos CBR son diferentes

Regla de decisión

P – valor

Rechazar Ho si $p < \alpha$

Confiabilidad: 95%

Error o significancia establecida: 5% = 0.05 = α

Valor critico

Rechazar Ho si $F > F_c$

Tabla 44

Prueba de anova para CBR

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad p	Valor crítico F
Entre las muestras	0.8013565	4	0.2003391	400678	6.01663E-19	5.192167
Dentro de las muestras	2.5E-08	5	5E-09			
TOTAL	0.8013566	9				

Nota: Material propio

primer caso: p - valor

En la tabla 44, análisis de varianza existe una significancia P de 6.01663E-19, para CBR, la cual es menor al alfa a la significancia establecida de 0.05.

Conclusión

Es decir, se debe rechazar la hipótesis nula y debe aceptar la hipótesis alternativa, las medidas de la dosificación de terrasil son diferentes o los resultados de datos del CBR son diferentes, lo que indica que si existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos a la subrasante.

Segundo caso: valor crítico

En la tabla 44, análisis de varianza existe una significancia F de 400678, para CBR, la cual es mayor al valor crítico F de 5.192167.

Conclusión

Por lo tanto, también se debe rechazar la hipótesis nula y debe aceptar la hipótesis alternativa, todos estos resultados fueron determinados en análisis de datos en programa Excel.

Tabla 45

Prueba post hoc de tukey para CBR

Diferencia dosificaciones con Terrasil	Diferencia muestral	Decisión
0.00 Lt/m ³ - 0.30 Lt/m ³	0.28	significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	0.53	significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.56	significativa
0.00 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.84	significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	0.25	significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.28	significativa
0.30 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.56	significativa
0.50 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.03	significativa
0.50 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.31	significativa
0.75 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.28	significativa

Nota: Material propio

En la tabla 45, se aprecia la prueba post hoc de Tukey de 0.00, en donde se detallan las medias que no fueron mencionadas en la tabla 56, existe diferencias entre las muestras 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, que son mayores a tukey de 0.00 que establece que los datos son diferentes, lo que indica que si existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos terrasil a la subrasante.

Conclusión

Podemos decir que resultados de la dosificación de terrasil 0.00 Lt/m³ ≠ 0.30 Lt/m³ ≠ 0.50 Lt/m³ ≠ 0.75 Lt/m³ ≠ 1.00 Lt/m³, todos estos resultados fueron determinado en análisis datos en programa Excel.

4.15.3. Prueba de anova para expansión

Ho: las medias de los datos de expansión son iguales

Ha: las medias de los datos expansión son diferentes



Regla de decisión

P – valor

Rechazar H_0 si $p < \alpha$

Confiabilidad: 95%

Error o significancia establecida: $5\% = 0.05 = \alpha$

Valor crítico

Rechazar H_0 si $F > F_c$

Tabla 46

Prueba de anova para expansión

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad p	Valor crítico F
Entre las muestras	5.79416	4	1.44854	28970.8	4.27939E-11	5.19216
Dentro de las muestras	0.00025	5	5E-05			
TOTAL	5.79441	9				

Nota: Material propio

primer caso: p - valor

En la tabla 46, análisis de varianza existe una significancia P de 4.27939E-11, para el índice de plasticidad, la cual es menor que alfa a la significancia establecida de 0.05.

Conclusión

Es decir, se debe rechazar la hipótesis nula y debe aceptarse la hipótesis alternativa, las medidas de la dosificación de terrasil son diferentes o los resultados de datos de la expansión son diferentes, lo que indica que si existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos a la subrasante.

Segundo caso: valor crítico

En la tabla 48, análisis de varianza existe una significancia F de 28970.8, para el índice de plasticidad, la cual es mayor valor crítico F de 5.192167.

Conclusión

Por lo tanto, también de debe rechazar la hipótesis nula y debe aceptar la hipótesis alternativa, todos estos resultados fueron determinado en análisis datos en programa Excel.

Tabla 47

Prueba post hoc de tukey para expansión

Diferencia dosificaciones con Terrasil	Diferencia muestral	Decisión
0.00 Lt/m ³ - 0.30 Lt/m ³	1.01	significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	1,77	significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	1.85	significativa
0.00 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	2.08	significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	0.76	significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.84	significativa
0.30 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	1.07	significativa
0.50 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.08	significativa
0.50 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.31	significativa
0.75 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.23	significativa

Nota: Material propio.

En la tabla 47, se aprecia la prueba post hoc de Tukey de 0.03, en donde se detallan las medias que no fueron mencionadas en la tabla 58, existe diferencias entre las muestras 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, que son mayores ah tukey de 0.03 que establece que los datos son diferentes, lo que indica que si existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos terrasil a la subrasante.



Conclusión

Podemos decir que resultados de la dosificación de terrasil $0.00 \text{ Lt/m}^3 \neq 0.30 \text{ Lt/m}^3 \neq 0.50 \text{ Lt/m}^3 \neq 0.75 \text{ Lt/m}^3 \neq 1.00 \text{ Lt/m}^3$, todos estos resultados fueron determinado en análisis datos en programa Excel.

4.15.4. Prueba de anova para (UCS)

Ho: las medias de los datos de UCS son iguales

Ha: las medias de los datos UCS son diferentes

Regla de decisión

P – valor

Valor critico

Rechazar Ho si $p < \alpha$

Rechazar Ho si $F > F_c$

Confiabilidad: 95%

Error o significancia establecida: $5\% = 0.05 = \alpha$

Tabla 48

Prueba de anova para UCS

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad p	Valor critico F
Entre las muestras	0.0002116	4	0.0000529	1.4220	0.34882880	5.19216
Dentro de las muestras	0.000186	5	0.0000372			
TOTAL	0.0003976	9				

Nota: Material propio

primer caso: p - valor

En la tabla 48, análisis de varianza existe una significancia P de 0.3488288, para UCS, la cual es mayor ah alfa a la significancia establecida de 0.05.

Conclusión

Es decir, de debe aceptar la hipótesis nula y debe rechazar la hipótesis alternativa, las medidas de la dosificación de terrasil son iguales o los resultados de datos del UCS son iguales, lo que indica que no existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos a la subrasante.

Segundo caso: valor critico

En la tabla 48, análisis de varianza existe una significancia F de 1.422043, para el UCS, la cual es menor valor critico F de 5.19216.

Conclusión

Por lo tanto, también de debe aceptar la hipótesis nula y debe rechazar la hipótesis alternativa, todos estos resultados fueron determinado en el programa Excel.

Tabla 49

Prueba post hoc de tukey para UCS

Diferencia dosificaciones con Terrasil	Diferencia muestral	Decisión
0.00 Lt/m ³ - 0.30 Lt/m ³	0.00	No significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	0.01	No significativa
0.00 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.01	No significativa
0.00 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.01	No significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.50 Lt/m ³	0.00	No significativa
0.30 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.00	No significativa
0.30 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.01	No significativa
0.50 Lt/m ³ - 0.75 Lt/m ³	0.00	No significativa
0.50 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.01	No significativa
0.75 Lt/m ³ - 1.00 Lt/m ³	0.01	No significativa

Nota: Material propio

En la tabla 49, se aprecia la prueba post hoc de Tukey de 0.02, en donde se detallan las medias que no fueron mencionadas en la tabla 60, existe igualdad entre las muestras 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, que son



menores ah tukey de 0.02 que establece que los datos son igual, lo que indica que no existe un efecto sustancial al agregar aditivos químicos terrasil a la subrasante.

Conclusión

Podemos decir que resultados de la dosificación de terrasil $0.00 \text{ Lt/m}^3 = 0.30 \text{ Lt/m}^3 = 0.50 \text{ Lt/m}^3 = 0.75 \text{ Lt/m}^3 = 1.00 \text{ Lt/m}^3$, todos estos resultados fueron determinado en análisis datos en programa Excel.

4.16. ANÁLISIS DE VIABILIDAD COSTO ECONÓMICA

Se elaboraron estudios económicos para material traído de cantera y la utilización de aditivo, los cuales se analizó los costos unitarios para la estabilizar el suelo de la subrasante de la carretera, se utilizó la ficha técnica por sus aportes económico de la empresa con respecto al precio brindado por litro terrasil, la cual el aditivo se desarrollaron los presupuesto determinados, con el fin de realizar la comparación de los presupuesto cual seria los más económicos para la estabilidad de la subrasante de la carretera.

Se determino las distancias para un 1 km para la vía, teniendo en cuenta los metrado ya determinados de 1000 m largo, 5.50 m ancho y 0.20 m de espesor estimado, se multiplico los tres resultados se obtuvo 1100 m^3 de volumen, para calcular el precio del proyecto de investigación.

4.16.1. Mejoramiento de la subrasante con material de cantera

Teniendo en cuenta que se consideró $500 \text{ m}^3/\text{día}$ de rendimiento para esta partida respectivamente. Donde mano de obra, materiales y equipos, son recursos considerados, con sus precios respectivamente según mercado, de acuerdo a la unidad de medida dada, se observa en la tabla 50.

Tabla 50*Recursos y precios unitarios uso de material de cantera*

Mano de obra en cantera	Und	Precio S/.
Capataz	hh	25.22
Operario	hh	24.22
Peón	hh	19.20
Materiales en cantera		
Aguas puesto en obra	m ³	8.02
Material de cantera	m ³	100.00
Equipo		
Herramientas manuales	% mo	1.66
Rodillo vibratorio 101hp a 135 hp	hm	156.84
Motoniveladora 130 hp a 135 hp	hm	205.77
camión cisterna de 3500 glns	hm	128.96

Nota: Elaboración propia.

Tener mucha encuesta que, en la selva u otros lugares donde no se pueda obtener el material de cantera fácilmente es costoso, por su traslado, por qué, no se encuentra muy cerca el material de cantera, son traído de distancias muy lejos. y en esta partida se considera la estabilización de suelo con material de cantera, es por esto que se considera 100.00 soles el m³ de este recurso de material según mercado. Se realizaron los costos unitarios en el programa de Delphín Express, en el cual se adjuntaron los resultados en el anexo 11, teniendo en cuenta que el resultado de un 1m³ de mejoramiento de la subrasante del suelo con material de la cantera de la zona será de 110.09 soles por metro cubico.

4.16.2. Mejoramiento de la subrasante con dosificación de 0.30 Lt/m³ de

Terrasil

Teniendo en cuenta que el rendimiento para esta partida se está considerando también de 500 m³/día. Para lo cual se tiene los siguientes recursos como mano obra, materiales y equipos, tomar en cuenta el precio del mercado y la unidad de medida. Considerando el mismo rendimiento de la anterior referencia, donde el aditivo terrasil se combina con el agua, antes de ejecutar en

la subrasante del suelo y dando mejora, con este estudio se sabrá los precios unitarios de ambos análisis, se observa en la tabla 51.

Tabla 51

Recursos y precios unitarios uso de aditivo Terrasil

Mano de obra en cantera	Und	Precio S/.
Capataz	hh	25.22
Operario	hh	24.22
Peón	hh	19.20
Materiales en cantera		
Aguas puesto en obra	m ³	8.02
Aditivo estabilizador terrasil	L	67.5
Equipo		
Herramientas manuales	% mo	1.66
Rodillo vibratorio 101 hp-135 hp	hm	156.84
Motoniveladora 130 hp-135 hp	hm	205.77
camión cisterna de 3500 glns	hm	128.96

Nota: Elaboración propia.

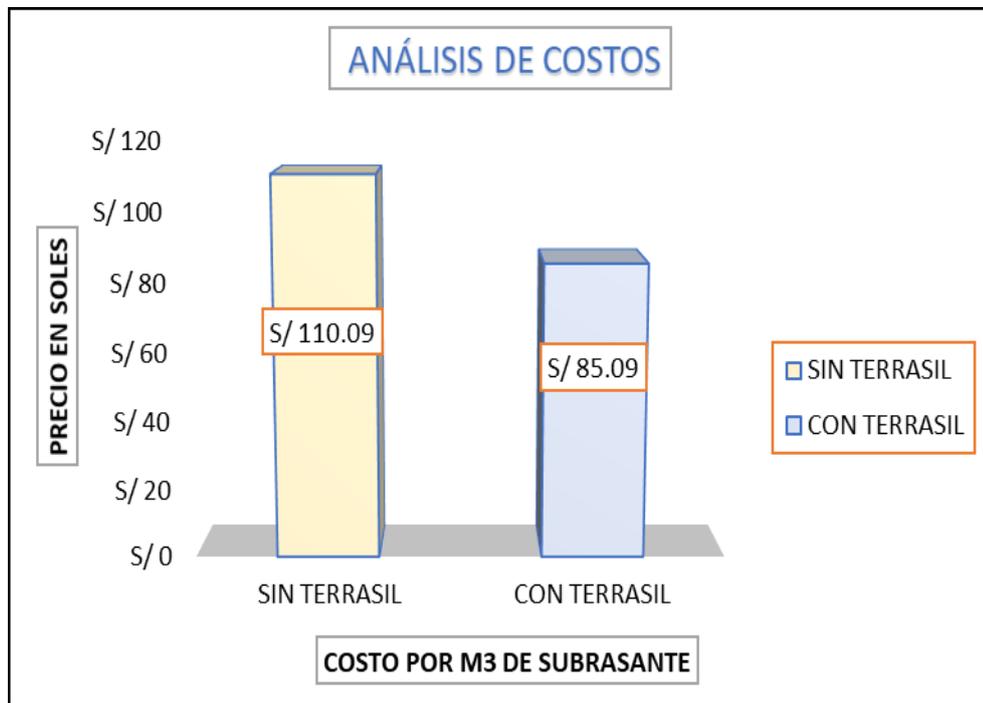
Teniendo en cuenta son la misma cuadrilla anterior y están conformados por: Mano de obra, materiales y equipos.

Se realizaron los costos unitarios en el programa de Delphín Express, en el cual se adjuntaron los resultados en el anexo 11, teniendo en cuenta que el resultado de un 1m³ de mejoramiento de la subrasante del suelo con aditivo de terrasil será de 85.09 soles por metro cubico.

Se realiza la comparación de análisis de costos unitarios general considerando para un 1 km tramos de 1000 m largo x 5.50 m ancho y un espesor estimado de 0.20 m, teniendo un resultado de volumen: 1100 m³. Y como se muestra en la figura 41 y 42, entiendo que la aplicación del aditivo terrasil resulta ser más económica en comparación con el uso de materiales provenientes de cantera, sin embargo, un factor crucial a considerar es el tiempo de disponibilidad. Si el terrasil se exporta desde otro país, los tiempos de entrega y la logística internacional pueden generar demoras que afecten el cronograma del proyecto.

Figura 41

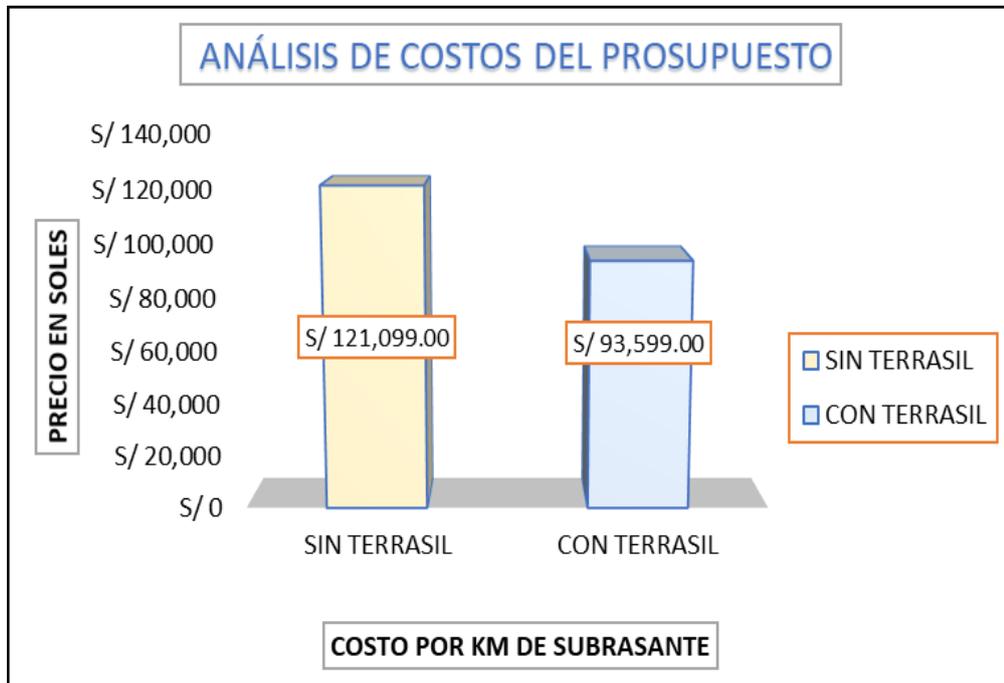
Análisis costo por m³ de subrasante



Nota: Elaboración propia

Figura 42

Análisis por km de subrasante



Nota: Elaboración propia



Finalmente, se llevó a cabo la discusión de los hallazgos obtenidos de dicho proyecto de investigación, en la cual se inicia con la comparación de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio, con los antecedentes del capítulo II conforme a cada objetivo planteado en dicho estudio.

Por ejemplo, podemos verificarlo los estudios que realizo, Fabiola Nadia Ramos Quispe (2022).

Por ejemplo, podemos verificarlo los estudios que realizo, Flores, E. R., & Flores, A. L. (2020).



V. CONCLUSIONES

- Para la realización de los ensayos de laboratorio, se optó por utilizar diferentes dosificaciones del agente estabilizador aditivo terrasil de: 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³, este con el fin de economizar el aditivo terrasil, se obtuvo que optima dosificación es de 0.30 Lt/m³ de terrasil, esta dosificación garantiza una mejora optima en los parámetros evaluados, como el valor de soporte (CBR), la expansión, compresión no confinada (UCS) y índice de plasticidad (IP).
- En cuando al resultado del valor de soporte (CBR), el tratamiento del suelo arenoso limoso con terrasil, se evidencia crecimiento de la siguiente manera: 9.23%, 36.78%, 61.78%, 65.19% y 93.03% de CBR, esto para dosificaciones de: 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³ y 1.00 Lt/m³ de terrasil, resultando así, de una subrasante regular a una subrasante excelente. La disminución de la expansión de un suelo arenoso limoso tratado con aditivo terrasil tras 96 horas bajo agua, se evidencia los siguientes resultados: 2.27 %, 1.26 %, 0.50 %, 0.42 % y 0.19 %, estos resultados son para dosificaciones de: 0.00 Lt/m³, 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³, y 1.00 Lt/m³ de terrasil, resultando así, el suelos tratados con terrasil presentan una expansión mucho menor en comparación con suelos no tratados. En cuando al comportamiento del suelo arenoso limoso tratado con aditivo terrasil en el ensayo de compresión simple (UCS), se evidencia la mejora de la resistencia del siguiente resultado de: 0.025 kg/cm², 0.029 kg/cm², 0.031 kg/cm², 0.032 kg/cm² y 0.039 kg/cm², estos resultados son para dosificaciones de: 0.00 Lt/m³, 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³, y 1.00 Lt/m³ de terrasil. Mejorando así las propiedades geotécnicas del suelo, de un suelo muy blanda a que se aproxima al suelo blando. Finalmente índice de plasticidad (IP), del suelo arenoso limoso



dosificado con aditivo terrasil, presenta una disminución en los siguientes resultados de: 6.57%, 4.92%, 4.46%, 4.40% y 3.60%, estos para dosificaciones de: 0.00 Lt/m³, 0.30 Lt/m³, 0.50 Lt/m³, 0.75 Lt/m³, y 1.00 Lt/m³ de terrasil. Mejorando así la plasticidad de baja a no plástico (NP), es decir hay una reducción de suelo poco arcillosos a suelo exentos de arcilla.

- En cuanto al cálculo de ejes equivalente (ESAL) se obtuvo 1,409,163.56 para un periodo de 10 años, y por el cálculo del método analítico se obtuvo un número estructural (SN) de 2.210. Finalmente, en el diseño se determinó: 5 cm de pavimento, 15 cm de base y 15 cm de subbase, donde también se viabilizaron los costos económicos.



VI. RECOMENDACIONES

- Se sugiere que las autoridades de los gobiernos regionales, municipalidades, empresas privadas y otros, hagan el uso del terrasil para el mejoramiento de un pavimento.
- Se recomienda de realizar los mismos ensayos con otros aditivos químicos es una estrategia clave para asegurar que el diseño del pavimento sea óptimo en cuanto a desempeño, costo y sostenibilidad.
- Recomendación realizar adecuadamente los ensayos en laboratorio bajo normativa.
- Se recomienda estudiar el aditivo químico adicionado porcentaje de cemento, especialmente dado que hay antecedentes sobre la capacidad cementante de este tipo de mezcla, particularmente en suelos arenoso-limosos.
- Se sugiere evaluar la muestra de suelo tratado con aditivo con mayor tiempo de curado.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bowle, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil* (1st ed.). McGRAW-HILL Book.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (5th ed.). Editorial Limusa S. A.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (4th ed.). Cengage Learning.
- Flores, E. R., & Flores, A. L. (2020). *Influencia de los aditivos con enzimas orgánicas Terrasil y perma zyme para la estabilización de la subrasante de una carretera no pavimentada, Mache, Otuzco, La Libertad 2019*. Tesis de Pregrado. Universidad Privada del Norte. Perú.
- Hurtado, P. B. (2020). *Aplicación de organosilano en el comportamiento físico y mecánico de la sub rasante en la Av. Los Geraneos Huaral, 2020*. Tesis de Pregrado. Universidad Cesar Vallejo. Perú.
- Fabiola N. Ramos Q. (2022). *nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos para subrasante*. Tesis de Pregrado. Universidad nacional del altiplano. Perú.
- Colana A. Rocio Y. y Torres C. Yoel S. (2023). *Diseño de pavimento flexible, empleando método AASHTO 93 para mejorar la transitabilidad vial en la calle San Donato, Moquegua, 2022*. Tesis de Pregrado. Universidad Cesar Vallejo. Perú.
- Karumanchi, M., Avula, G., Pangi, R., & Sirigiri, S. (2020). Improvement of consistency limits, specific gravities, and permeability characteristics of soft soil with nanomaterial: Nanoclay. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.832>
- Kushwaha, P., Chauhan, A. S., Swami, S., & Swami, B. L. (2021). Investigating the effects of nanochemical-based ionic stabilizer and co-polymer on soil properties for pavement construction. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 379–388. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1635817>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2004). *Mecánica de Suelos* (1st ed.). Limusa S. A.



- Meeravali, K., Ruben, N., & Rangaswamy, K. (2020). Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1030–1037.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.384>
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (2nd ed.). Universidad Católica de Colombia.
- MTC. (2017). *Manual de Ensayo de Materiales* (1st ed.). Servicios Gráficos Squadrito EIRL.
- Vivar, G. (1995). *diseño y construcción de pavimentos* (2nd ed.). CIP - Capítulo de Ingeniería Civil.
- MTC. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Perú: 2014.305 pp.
- Franco V., José Luis y Vargas L, Margareth Wendy. (2021). Análisis comparativo entre el diseño estructural del pavimento flexible, rígido y articulado en el sector villa judicial – distrito de huanchaco – Trujillo – la libertad. Tesis de Pregrado. Universidad Privada Antenor Orrego. Perú.
- Ruales, Franco Rojas, Flores, Patricio Romero, Vinueza, César. (2014). Metodología de diseño de micropavimento de bajo costo para suelo tipo limo orgánico arenoso (OL). Tesis de Pregrado. Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas. Ecuador.
- Colana A., Roció Y. Y Torres C., Yoel S. (2023) Diseño de pavimento flexible, empleando método AASHTO 93 para mejorar la transitabilidad vial en la calle San Donato, Moquegua, 2022. Tesis de Pregrado. Universidad Cesar Vallejo. Perú.
- Municipalidad provincial de Yunguyo. (2024). “Rehabilitación de la carretera chacachaca - Yunguyo - kasani, distrito de Yunguyo, provincia de Yunguyo - puno” URI: <https://es.scribd.com/document/376393092/Estudio-de-Trafico>
- OptimaSoil. (2009). Especializada en el desarrollo y comercialización de Nanotecnología. URI: <https://estabilizaciondesuelos.com/project/estabilizacion-e-impermeabilizacion-en-lateritas-angola/>



ANEXOS

- ANEXO 1 Dosificación 0.00 Lt/m³ de terrasil-suelo no tratado
- ANEXO 2 Dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil-suelo tratado
- ANEXO 3 Dosificación de 0.50 Lt/m³ de terrasil-suelo tratado
- ANEXO 4 Dosificación de 0.75 Lt/m³ de terrasil-suelo tratado
- ANEXO 5 Dosificación de 1.00 Lt/m³ de terrasil-suelo tratado
- ANEXO 6 Estudio de trafico
- ANEXO 7 Ejes equivalentes
- ANEXO 8 Diseño del pavimento flexible para suelo no tratado
- ANEXO 9 Diseño del pavimento flexible para dosificación de 0.30 Lt/m³ de terrasil-suelo tratado
- ANEXO 10 Ficha técnica del terrasil
- ANEXO 11 Análisis de costos unitario
- ANEXO 12 Panel fotográfico



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Carlos Humberto Chino Peña
identificado con DNI 46011557 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" EFICIENCIA DEL USO TERRESTRE EN LA ESTABILIZACIÓN DE
SUELOS FINOS ARENOSO-LIMOSO EN LA CIUDAD DE
YUNGUYO 2023 "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 05 de Diciembre del 2024


FIRMA (obligatoria)





Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Carlos Humberto Chino Peña
identificado con DNI 46011557 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

EFICIENCIA DEL USO DE PASOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE
SUELOS FINOS BRECVOSO LIMOSO EN LA CIUDAD DE
YUNGUYO 2023

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 05 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella