



UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA
SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN
EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**

TESIS PRESENTADA POR:
Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL

JULIACA – PERÚ
2026



UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA
SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN
EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE

:


Dr. CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR

PRIMER MIEMBRO

:


Dr. LEONEL SUASACA PELINCO

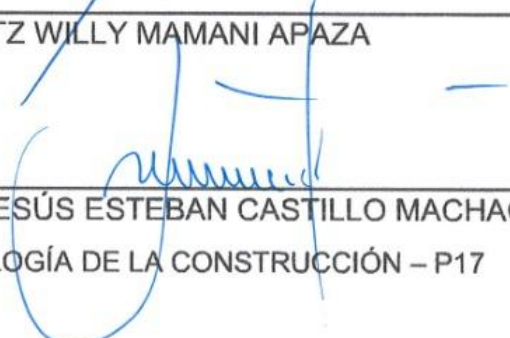
SEGUNDO MIEMBRO

:


Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

ASESOR DE TESIS

:


M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN : TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN – P17

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 0067-2026-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 22 de enero del 2026

VISTO: El expediente N° 2026-CU-000087 presentado por el (la) Bachiller: **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**, la misma que pertenece a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Civil**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en mérito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. - APROBAR, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- * **Presidente** : Dr. CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR
- * **1er Miembro** : Dr. LEONEL SUASACA PELINCO
- * **2do Miembro** : Dr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

ARTICULO SEGUNDO. - RECONOCER como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**.

ARTICULO TERCERO. - APROBAR, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA**; del informe final de la investigación (tesis) titulada: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Civil**. de acuerdo al siguiente detalle:

- * **FECHA** : Jueves 29 de enero del 2026
- * **HORA** : 09:30 horas
- * **LUGAR** : Aula 306 - FICP

ARTÍCULO CUARTO. - DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Ronald Madera Terán
DECANO (e)
CIP: 66975



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo 2026
Ingeniería Civil

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 957-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 29 de agosto del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU - 6762 por el señor (a): **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO - N° 760 - 2025-UI-FICP-UANCV/J, y la FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS) formato N° 092 - 2025 del integrante del comité de investigación EPIC de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación Dr. Arnaldo Yana Torres de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 092 - 2025 **aprobande** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**, Correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, con el Tema Titulado: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**, en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), M.Sc. **JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CS. PURAS
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓNcc.
Archivo
interesado (a)



RESOLUCIÓN DECANAL N° 681-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 09 de julio del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU- 7424, presentado por el señor (a) **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el **PROVEIDO - N° 497-2025-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 049-2025 del integrante del comité de investigación **EPIC** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA** ha presentado su propuesta de investigación Titulada: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Dr. Arnaldo Yana Torres** de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 049-2025- aprobando la propuesta de investigación titulada: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R, y en mérito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, con el Tema Titulada: **INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
Dr. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo 30.25
Interesado (a)



WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASAN...

 Trabajos de tesis para ingreso a repositorio

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::13016:604548998

Fecha de entrega

3 jul 2026, 21:00 GMT-5

Fecha de descarga

4 jul 2026, 20:24 GMT-5

Nombre del archivo

T036_75981527_T.docx

Tamaño del archivo

33.5 MB

184 páginas

28.621 palabras

150.624 caracteres



TESIS UANCV

20% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 18%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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.



Metadatos Complementarios UANCV



Título de la tesis	
INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75981527
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0008-1890-2295
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	JESUS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	01323821
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4595-7589
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	CESAR GUILLERMO CAMARGO NÁJAR
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02441152
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	LEONEL SUASACA PELINCO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40865558
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	FRITZ WILLY MAMANI APAZA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02306659



Datos de investigación	
Línea de investigación	Tecnología de la Construcción - P17
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Puno Provincia: San Román Distrito: Juliaca - Latitud: S 15° 29' 27'' - Longitud: O 70° 07' 37''  https://www.google.com/maps/d/edit?mid=17iAfzMHtWmME0AazezqSlpJKL6VXDFk&usp=sharing
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Julio 2025 – Enero 2026
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html - Librería	Ingeniería Civil https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01 Ingeniería de la Construcción https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.03



UNIVERSIDAD "MARTÍN GARCÉS Y ALVARO"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS FÍSICAS

Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA, identificado con DNI
Nro. 75981527, en mi condición de egresado de:

- ☒ **Escuela Profesional**
☐ **Programa de Segunda Especialidad,**
☐ **Programa de Maestría o Doctorado**

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la ☒ **Tesis** o ☐ **Trabajo de Investigación**, ☐ **Trabajo Académico**
denominada:

INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR
LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

Asesorado por: M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

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.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 08 de Junio del 2026

Firma del Asesor
(obligatoria)

Firma del Estudiante
(obligatoria)

Huella





DEDICATORIA

A mis padres, pilares fundamentales de mi vida, cuyo amor incondicional, sacrificio y esfuerzo constante hicieron posible cada uno de mis logros. Este trabajo es el reflejo de todo lo que me enseñaron y la recompensa a cada uno de sus desvelos.



AGRADECIMIENTO

En primer lugar, elevo mi profundo agradecimiento a Dios todopoderoso, quien ha sido mi fortaleza y guía a lo largo de cada etapa de mi vida, dotándome de la perseverancia y el discernimiento necesarios para alcanzar las metas que me tracé.

A la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Puras y a cada uno de mis docentes, quienes compartieron generosamente su conocimiento y experiencia, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional y personal. A todos ellos, mi sincero reconocimiento por su dedicación, comprensión, apoyo constante y por los lazos de amistad que supieron cultivar a lo largo de este camino.



CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
CONTENIDO GENERAL.....	iii
CONTENIDO DE TABLAS.....	vii
CONTENIDO DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Exposición de la realidad problemática	14
1.2. Formulación del problema	15
1.2.1. Problema general:	15
1.2.2. Problemas específicos:.....	16
1.3. Justificación e importancia de la investigación	16
1.3.1. Justificación técnica.....	16
1.3.2. Justificación económica.....	17
1.3.3. Justificación ambiental.....	17
1.4. Objetivos.....	18
1.4.1. Objetivo general:.....	18



1.4.2. Objetivos específicos:	18
1.5. Hipótesis	19
1.5.1. Hipótesis general:	19
1.5.2. Hipótesis específicas:	19
1.6. Variables e indicadores	19
1.6.1. Operacionalización de variables	20

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes de la investigación	21
2.1.1. internacionales.....	21
2.1.2. Nacionales	23
2.1.3. Locales	25
2.2. Marco teórico	27
2.2.1. Suelo	27
2.2.1.1. Clasificación de suelos	27
2.2.1.1.1 Clasificación por AASHTO	27
2.2.1.1.2 Clasificación SUCS	31
2.2.2. Carreteras no pavimentadas.....	36
2.2.3. Estabilización de suelos.....	37
2.2.3.1. Subrasante	41
2.2.3.2. Estabilización de la Subrasante.....	42



2.2.3.3. Tipos de estabilización	43
2.2.4. Aditivos con Enzimas Orgánicas	59
2.2.4.1. Terrasil.....	59
2.2.4.1.1 Ventajas	60
2.2.4.1.2 Estabilización con Terrasil.....	61
2.2.4.1.3 Características del aditivo químico seleccionado Terrasil .	63
2.3. Marco conceptual	77

CAPÍTULO III

MÉTODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	82
3.2. Nivel de investigación	83
3.3. Diseño de investigación	83
3.4. Enfoque de la investigación	84
3.5. Población y muestra	84
3.5.1. Población	84
3.5.2. Muestra.....	84
3.6. Métodos e instrumentos recolección de datos	85
3.6.1. Técnica	85
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos	85
3.7. Procedimiento	86
3.8. Trabajos previos	86



3.8.1. Trabajos de campo	86
--------------------------------	----

3.8.2. Trabajos de laboratorio	87
--------------------------------------	----

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Análisis de la información	101
---------------------------------------	-----

4.1.1. Resultados de los ensayos	101
--	-----

4.1.2. Caracterización estratigráfica de los suelos plásticos presentes en la subrasante	109
--	-----

4.1.3. Estabilización de suelos plásticos de la subrasante mediante la incorporación del aditivo Terrasil	110
---	-----

4.1.3.1. Mejoramiento de características automático de los suelos plásticos de la subrasante, con empleo del 1 % del aditivo Terrasil	110
---	-----

4.1.3.2. Estabilización de suelos plásticos de la subrasante mediante la aplicación del 2% de aditivo Terrasil	115
--	-----

4.2. Discusión de resultados	118
------------------------------------	-----

CONCLUSIONES	122
--------------------	-----

RECOMENDACIONES	125
-----------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	127
--------------------	-----

ANEXOS	133
--------------	-----



CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	20
Tabla 2 Clasificación de Suelos por AASHTO	30
Tabla 3 Nomenclatura de los Grupos de Clasificación por AASHTO	30
Tabla 4 Clasificación de Suelos por SUCS.....	32
Tabla 5 Categorías de la Subrasante	42
Tabla 6 Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador	53
Tabla 7 Guía complementaria referencial para la selección del tipo de estabilizador	54
Tabla 8 Ventajas del aditivo Terrasil.....	61
Tabla 9 Técnicas e instrumentos de evaluación geotécnica utilizados en el estudio	86
Tabla 10 Análisis de las pruebas de Contenido de humedad normal	101
Tabla 11 Análisis granulométrico del suelo natural.....	102
Tabla 12 Características plásticas del suelo natural.....	102
Tabla 13 Características del suelo natural.....	103
Tabla 14 Parámetros de compactación obtenidos en las muestras de suelo de la subrasante.....	103
Tabla 15 Determinación del índice CBR al 95% y 100% de compactación en la subrasante	104
Tabla 16 Comparación entre los resultados de laboratorio y los criterios normativos del MTC EG-2013 para suelos de subrasante.....	105
Tabla 17 Perfil estratigráfico y clasificación geotécnica de los suelos de la subrasante	109



Tabla 18 Evaluación de los límites de consistencia en suelos de la subrasante tratados con 1% de aditivo Terrasil	111
Tabla 19 Parámetros de compactación Proctor Modificado en suelos de la subrasante tratados con 1% de aditivo Terrasil	112
Tabla 20 Determinación del índice CBR en suelos de la subrasante estabilizados con 1% de aditivo Terrasil	112
Tabla 21 Síntesis de los resultados geotécnicos obtenidos en la subrasante con adición del 1% de Terrasil y su conformidad con el MTC EG-2013	113
Tabla 22 Análisis de las pruebas de Límites de suelos de la subrasante, con aditivo del 2 % de Terrasil	115
Tabla 23 Parámetros de compactación Proctor Modificado en suelos de la subrasante tratados con 2% de aditivo Terrasil	115
Tabla 24 Determinación del índice CBR en suelos de la subrasante estabilizados con 2% de aditivo Terrasil	116
Tabla 25 Consolidado de parámetros geotécnicos de la subrasante estabilizada con 2% de Terrasil frente a las especificaciones del MTC EG-2013.....	116
Tabla 26 Contraste de los parámetros geotécnicos del suelo natural frente a los tratados con dosificaciones de 1% y 2% de aditivo Terrasil.....	119



CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Carta de Casagrande para suelos	35
Figura 2 Algunos tipos de estabilización de suelos	44
Figura 3 Estabilización física del suelo.....	47
Figura 4 Estabilización mecánica del suelo.....	49
Figura 5 Presentación del aditivo Terrasil	63
Figura 6 Ubicación del proyecto	87
Figura 7 Secado de la muestra en el horno	88
Figura 8 Tamizado manual de la muestra	90
Figura 9 Preparación y colocación de la muestra de suelo en el aparato de Casagrande.....	92
Figura 10 Formación de rollitos cilíndricos para la determinación del límite plástico.....	94
Figura 11 Proceso de compactación de la muestra de suelo mediante el ensayo Proctor Modificado.....	97
Figura 12 Determinación de la resistencia del suelo mediante el ensayo de CBR	100



RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo Analizar la influencia del uso de aditivo Terrasil en la estabilización de suelos para mejorar la subrasante con fines de pavimentación en la región de Puno 2025. Metodología: El estudio posee un enfoque cuantitativo, es de tipo aplicada y nivel explicativo, con un diseño experimental. Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante ensayos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR), aplicando dosificaciones del 0%, 1% y 2% de Terrasil sobre muestras de suelos plásticos de la subrasante. Resultados: El suelo natural presentó una condición inestable con un CBR de 17.84% y alta plasticidad (16.52%). Con la adición del 1% de Terrasil, el CBR aumentó a 32,90%. No obstante, los mejores resultados se obtuvieron con la dosificación del 2%, donde el CBR alcanzó un 42.15% (incremento del 136%), el índice de plasticidad se redujo a 7.65% y la máxima densidad seca subió a 1.665 gr/cm³, cumpliendo con los estándares del MTC. Se concluye que el aditivo Terrasil influye de manera positiva y significativa en la estabilización de suelos. La dosificación del 2% es la más efectiva, ya que transforma la subrasante a una categoría "Excelente", garantizando una base rígida e impermeable que prolonga la vida útil del pavimento.

Palabras clave: Terrasil, estabilización, subrasante, suelos plasticos.



ABSTRACT

This research aims to analyze the influence of the use of Terrasil additive in soil stabilization to improve the subgrade for paving purposes in the Puno 2025 region. Methodology: The study has a quantitative approach, is applied and explanatory in nature, with an experimental design. The physical and mechanical properties of the soil were evaluated through laboratory tests (grain size, Atterberg limits, modified Proctor, and CBR), applying dosages of 0%, 1%, and 2% Terrasil to samples of plastic subgrade soil. Results: The natural soil was unstable, with a CBR of 17.84% and high plasticity (16.52%). With the addition of 1% Terrasil, the CBR increased to 32.90%. However, the best results were obtained with a dosage of 2%, where the CBR reached 42.15% (an increase of 136%), the plasticity index was reduced to 7.65%, and the maximum dry density rose to 1,665 g/cm³, complying with MTC standards. It is concluded that the Terrasil additive has a positive and significant influence on soil stabilization. The 2% dosage is the most effective, as it transforms the subgrade to an "Excellent" category, ensuring a rigid and impermeable base that prolongs the service life of the pavement.

Keywords: Terrasil, stabilization, subgrade, plastic soils.



INTRODUCCIÓN

El proyecto de pavimentación requiere el uso de materiales de calidad, para lo cual se tomaron como referencia las especificaciones del Manual EG-2013 del MTC. Durante la evaluación del terreno, se identificó que la subrasante está conformada por suelos plásticos de baja capacidad portante, lo que los hace inadecuados para soportar directamente una estructura de pavimento. Por esta razón, resultó necesario mejorar sus propiedades mecánicas mediante la incorporación de agregados y el aditivo Terrazil.

Para alcanzar dicha mejora, el trabajo de investigación se organizó de la siguiente manera:

El Capítulo I corresponde a la introducción, donde se plantea la problemática identificada en el área de estudio. A partir de ella, se formulan las preguntas de investigación, tanto la general como las específicas. Asimismo, se expone la justificación del trabajo, se definen los objetivos generales y específicos, y finalmente se establecen la hipótesis general y específicas.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico referencial, que comprende los antecedentes de estudios previos relacionados con el tema, seguidos de las bases teóricas y el marco conceptual que sustentan la investigación.

El Capítulo III describe la metodología de la investigación. En él se precisa que el estudio es de nivel experimental y de tipo aplicado. También se caracteriza la población y la muestra consideradas, y se describen las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos.



El Capítulo IV presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos, dando respuesta a cada una de las preguntas específicas planteadas en la investigación.

xii



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Exposición de la realidad problemática

El diseño y construcción de pavimentos en la ciudad de Juliaca representa un desafío técnico considerable, debido principalmente a dos factores que condicionan el comportamiento del terreno de fundación.

El primero de ellos es la presencia de suelos plásticos en la subrasante. Los ingenieros especializados en construcción vial conocen bien la problemática que representan los suelos finos de alta plasticidad, como los que han sido identificados en la Av. Los Virreyes. Esta situación se agrava aún más por la existencia de agua subterránea a escasa profundidad, lo que incrementa la vulnerabilidad del suelo ante cambios volumétricos y pérdida de resistencia. Ambos factores, considerados en conjunto, hacen indispensable un estudio detallado de estos suelos, con el propósito de neutralizar sus efectos negativos y garantizar la durabilidad del pavimento a largo plazo.



En la actualidad, existen diversas tecnologías que permiten controlar y mejorar las propiedades mecánicas de los suelos plásticos en la subrasante de una vía. Dentro de estas alternativas destacan dos enfoques:

- El primero consiste en el uso de aditivos químicos, los cuales ofrecen una amplia variedad de opciones en el mercado y presentan costos accesibles para proyectos de infraestructura vial.
- El segundo enfoque implica la incorporación de suelos granulares al suelo plástico existente, específicamente agregados de concreto provenientes del sector de Unocolla, ubicado dentro de la propia ciudad de Juliaca. La cercanía de esta fuente de material representa una ventaja logística importante, ya que reduce significativamente los costos de transporte.
- En función de lo anterior, el presente trabajo de investigación contempla el análisis y aplicación de estos dos procesos de estabilización de suelos plásticos en la subrasante: mediante el empleo de un aditivo químico.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general:

¿Cómo influye el uso de aditivo terrasil en la estabilización de suelos para mejorar la subrasante con fines de pavimentación en la región de Puno 2025?

1.2.2. Problemas específicos:

- ¿Cuáles son las características físicas y mecánicas que presentan los suelos plásticos en la subrasante de la Av. Los Virreyes de Juliaca, considerando su aplicación en obras de pavimentación?
- ¿En qué medida la aplicación del aditivo Terrasil como agente estabilizador permite mejorar las propiedades mecánicas de los suelos plásticos ubicados en la subrasante de la Av. Los Virreyes de Juliaca?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación se justifica en la necesidad de explorar y aplicar nuevos métodos de mejoramiento de suelos, con el fin de ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de la subrasante cuando se incorporan aditivos químicos y materiales granulares. Se busca aprovechar las propiedades que estos materiales ofrecen actualmente para optimizar características fundamentales como la compactación y la resistencia del suelo, contribuyendo así a prolongar la vida útil de las vías y mantenerlas en condiciones óptimas de servicio.

1.3.1. Justificación técnica

Conocer las características mecánicas del suelo de la subbase es fundamental para el diseño y la construcción de pavimentos, ya que estas características determinan el buen funcionamiento de la subbase y la base granular. El análisis granulométrico, los límites de Atterberg, la clasificación SUCS/AASHTO, el ensayo de Proctor y el ensayo CBR son solo algunas de las



técnicas de laboratorio que se utilizan para evaluar el suelo. Para garantizar que el diseño sea técnicamente sólido, los datos recopilados deben compararse con las normas establecidas en el Manual de Carreteras del MTC.

1.3.2. Justificación económica

El diseño estructural y, por extensión, los costes de construcción de un pavimento se ven directamente afectados por la calidad de los suelos de la subbase. Los suelos plásticos presentes en la subbase de la avenida Los Virreyes de Juliaca pueden provocar un aumento del espesor de las capas de subbase y base, lo que a su vez incrementa los costes del proyecto, reduce la vida útil del pavimento y acelera la aparición de problemas estructurales. Por estas razones, nos propusimos llevar a cabo esta investigación, que comprende dos procedimientos de estabilización la aplicación de aditivos químicos y la incorporación de suelo granular obtenido a partir de áridos fluviales con el fin de maximizar las cualidades mecánicas del suelo. En este momento, ambas opciones son sencillas de ejecutar y no suponen un gran gasto. El uso de estos materiales girará en torno a un control minucioso de las cantidades utilizadas para mejorar las cualidades mecánicas del suelo en la mayor medida posible.

1.3.3. Justificación ambiental

La construcción de vías es una de las actividades humanas que genera mayores impactos sobre el entorno natural. Por ello, en el proceso de mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Los Virreyes, se tomarán en consideración las normativas ambientales vigentes y las medidas de mitigación necesarias para minimizar

cualquier efecto negativo sobre el ecosistema del área de influencia. En ese sentido, se seleccionará cuidadosamente el aditivo químico a emplear, priorizando aquellos que no representen un riesgo para el medio ambiente. Asimismo, los agregados que serán incorporados al suelo provendrán de las canteras de Unocolla, garantizando que su extracción y uso no generen contaminación ni deterioro de los recursos naturales del entorno.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general:

Analizar la influencia del uso de aditivo Terrasil en la estabilización de suelos para mejorar la subrasante con fines de pavimentación en la región de Puno 2025.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos plásticos presentes en la subrasante de la Av. Los Virreyes de Juliaca con fines de pavimentación.
- Establecer el nivel de mejoramiento de las propiedades mecánicas de dichos suelos mediante la aplicación del aditivo Terrasil en procesos de estabilización.

1.5. Hipótesis

1.5.1. *Hipótesis general:*

El mejoramiento de las propiedades mecánicas de la subrasante de la ciudad de Juliaca con fines de pavimentación; se logran con adición de aditivos Terrasil.

1.5.2. *Hipótesis específicas:*

- Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Los Virreyes de Juliaca no cumplen con los requisitos mínimos establecidos en el Manual EG-2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- La adición del aditivo Terrasil en las dosificaciones apropiadas logra mejorar de manera efectiva las propiedades mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Los Virreyes de Juliaca.

1.6. Variables e indicadores

Variable independiente: Uso del aditivo Terrasil

Indicador:

- Dosificación
- Proporción de dilución

Variable dependiente: Estabilización de suelos (Mejora de la subrasante)

Indicador:

- Densidad seca y contenido de humedad



- CBR.
- Límites de Atterberg

1.6.1. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Uso del aditivo Terrasil (VI)	Dosificación	0%, 1%, y 2%	Razón
Estabilización de suelos (Mejora de la subrasante) (VD)	Propiedades físicas y mecánicas	-Densidad seca y contenido de humedad -CBR. -Límites de Atterberg	Razón



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. internacionales

Aswari S. y Prasada Raju G. (2022) desarrollaron un estudio titulado "Estabilización de suelos expansivos con residuos industriales de coco y Terrasil", llevado a cabo en Kakinada, India. Los investigadores determinaron que la combinación más efectiva para tratar suelos negros de algodón fue aquella conformada por 0.75% de fibra de coco y 0.06% de Terrasil. Con esta proporción se lograron resultados favorables en múltiples parámetros: el contenido de humedad óptimo disminuyó en un 3%, la densidad máxima seca aumentó en 4.3%, el límite líquido se redujo en 12.1% y el índice de plasticidad descendió en 4.5%. Estos resultados evidencian que dicha combinación es eficaz tanto para reducir la plasticidad del suelo como para incrementar su capacidad resistente.



Meeravali K., Rubén N. y Rangaswamy K. (2020) publicaron la investigación "Estabilización de arcilla blanda utilizando nanomateriales: Terrasil", realizada en Kuttanad, Kerala, India. El estudio evaluó el efecto de incorporar Terrasil en proporciones que oscilaron entre 0.02% y 0.07% del peso seco del suelo arcilloso. Como resultado, el índice de plasticidad disminuyó de 31.91% en el suelo sin tratar a 22.24% en el suelo tratado, lo que representa una mejora significativa en sus propiedades plásticas. De manera particular, se comprobó que una dosificación del 0.03% de Terrasil produce un efecto endurecedor sobre el suelo, incrementando su resistencia en aproximadamente 2.5%, lo cual representa una mejora relevante para su uso en aplicaciones geotécnicas.

Karumanchi et al. (2020) llevaron a cabo un programa experimental en su trabajo «Estabilización de arcilla blanda mediante el nanomaterial Terrasil». Mezclaron tierra, Terrasil y cemento de siete formas diferentes, manteniendo el contenido de cemento constante en un 1,5 % en peso de la tierra seca. Las pruebas preliminares revelaron que el 0,03 % de Terrasil era la proporción óptima. Al analizar estas combinaciones, pudimos determinar cómo interactuaban ambos materiales para modificar la permeabilidad, las propiedades de consolidación y la resistencia CBR del suelo arcilloso. Los resultados, que confirmaron que se trata de una técnica eficaz para mejorar los suelos arcillosos en ingeniería geotécnica, demostraron que la combinación de Terrasil con cemento mejora significativamente todos los parámetros examinados.



En Ecuador, Diego I. Rodríguez Vinces (2016) llevó a cabo una investigación titulada «Análisis comparativo de la compactación y el contenido de humedad en la subbase natural y en la subbase estabilizada con productos químicos biodegradables (Terrasil) en la carretera ecológica del cantón de Quevedo, provincia de Los Ríos». Según el autor, la estabilización de la subbase mediante la adición de Terrasil es una opción técnicamente superior, ya que aumenta la resistencia del suelo y lo impermeabiliza en diversos materiales. El hallazgo más importante del estudio es que el suelo tratado se vuelve hidrófobo, o casi impenetrable, en presencia de agua, tras un periodo de curado de 7 días y una vez finalizados los ensayos de campo y de laboratorio.

2.1.2. Nacionales

En la tesis de 2020 de Álvarez Benites y Gutiérrez Gallegos, titulada Estudio experimental del efecto sobre el comportamiento mecánico de la adición de caucho triturado a un suelo arcilloso de baja plasticidad de la localidad de Callampampa-Llama-Cajamarca, defendida en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, se analizó la influencia de diferentes cantidades de caucho triturado en las características mecánicas del suelo arcilloso. Se observó que la densidad seca máxima era mayor en los suelos a los que se había añadido caucho en porcentajes de C0,5 %, C1,5 %, C2,5 % y C3,5 %, según las mediciones realizadas mediante el ensayo de Proctor modificado. El mayor incremento, del 1,76 %, se produjo con la proporción C3,5 %, seguida de la proporción C2,5 %, con un 1,62 %, y de la proporción C1,5 %, con un 0,52 %. Los espacios entre las partículas del suelo se rellenan con caucho, lo que reduce su tendencia a expandirse. Por eso el suelo se comporta de esta manera.



Además, a medida que aumentaba el contenido de caucho, disminuía el contenido de humedad ideal, lo que sugiere que se necesita menos agua para alcanzar el umbral de compactación ideal del suelo tratado.

En el estudio «Influencia de los aditivos enzimáticos orgánicos Terrasil y Perma Zyme en la estabilización de la subbase de una carretera sin asfaltar, Mache, Otuzco, La Libertad 2019», realizado en Trujillo en 2020, Flores Quiñones y Flores Sánchez compararon los efectos de ambos aditivos sobre la capacidad portante del suelo al 95 %. La adición de Terrasil aumentó la capacidad portante de tres de las seis muestras en mayor medida que el aditivo Perma Zyme; estos dos últimos tratamientos resultaron más eficaces en los tipos de suelo CH y ML. La eficacia de cada producto depende de las propiedades específicas del suelo tratado, como lo demuestra la variación de entre el 0,5 % y el 10 % en la capacidad portante entre ambas adiciones.

Huaman y Zamalloa (2022) llevaron a cabo una investigación en Acobamba, Apurímac, orientada a evaluar el mejoramiento de la subrasante de las vías de acceso a dicha ciudad, las cuales presentan suelos arcillosos con características desfavorables como baja resistencia al corte, alta plasticidad y susceptibilidad a cambios volumétricos por expansión y contracción, condiciones que propician la aparición de deformaciones, fisuras y daños en el pavimento. El estudio, de enfoque cuantitativo, nivel explicativo-correlacional y diseño experimental, empleó muestreo no probabilístico por conveniencia. Se ejecutaron tres calicatas, tomándose el valor más crítico como referencia para evaluar el efecto del aditivo Terrasil en proporciones de 0.5%, 1.5% y 2.5%, y del aditivo Permaroad en dosis de 0.05, 0.15 y 0.25 lt/m³, sumando un total de 36



ensayos. Los resultados más destacados con Terrasil al 2.5% mostraron una reducción de la plasticidad del 9.59%, un leve incremento de la densidad máxima seca de 0.12 t/m^3 y un aumento del CBR del 16.87%, lo que permitió reclasificar la subrasante de condición "insuficiente" a "muy buena". Por su parte, el Permaroad en dosis de 0.15 lt/m^3 elevó la resistencia a la compresión confinada en 0.72 kg/cm^2 , mejorando la consistencia del suelo de "muy blanda" a "mediana".

2.1.3. Locales

En 2022, Gonzales Zevallos era juez. Los resultados de la investigación realizada en Lima titulada Estudio comparativo de la estabilización química con Terrasil y Permazyme para la pavimentación de Santiago Pampa - Pampa Yanamayo, Sandia 2022 indican que: El contenido óptimo de humedad se reduce en un 0,91 % y un 0,82 %, respectivamente, cuando se añaden $1,5 \text{ kg/m}^3$ y $2,0 \text{ kg/m}^3$ de Terrasil. Por otra parte, la densidad seca máxima aumenta significativamente, alcanzando valores de $2,190 \text{ g/cm}^3$ y $2,168 \text{ g/cm}^3$ para $1,50 \text{ kg/m}^3$ de Terrasil y $1,50 \text{ L/30 m}^3$ de Permazyme, lo que corresponde a incrementos de $0,049 \text{ g/cm}^3$ y $0,027 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

En 2022 nació Fabiola N. Ramos Quispe. Los resultados de la incorporación del producto nanotecnológico Terrasil a la subbase de un suelo de grano fino y consistencia blanda constituyeron el tema principal de este estudio de tesis. El lugar de la investigación fue un pozo de ensayo situado en el km 11+400 de la carretera Puno-Moquegua. En primer lugar, se verificaron las propiedades geotécnicas del suelo en su estado natural mediante ensayos que incluyeron el CBR, la compresión no confinada, la distribución granulométrica, el

contenido de humedad, el ensayo de compactación y los límites de Atterberg. Posteriormente, el suelo se trató con Terrasil en concentraciones de 0,20; 0,80; 1,40 y 2,00 L/m³, determinadas en función del peso seco del suelo. Se utilizó el ensayo de Proctor modificado para evaluar el valor de CHO tras mezclar estas dosis con agua. El curado tardó 7 días en surtir efecto. El último paso consistió en evaluar las cualidades geotécnicas del suelo estabilizado analizando parámetros como la compresión no confinada, el CBR y los límites de Atterberg.

Mario Hidalgo Bruna (2022). Tesis de defensa. Con el fin de mejorar la carretera de grava Patapampa-Apissi en Arapa, Azángaro, Puno, este estudio tiene como objetivo estabilizar el suelo utilizando Terrasil en 2022. La investigación utilizó un enfoque cuantitativo y un diseño experimental con fines explicativos. El área de investigación abarca un tramo de 5 kilómetros, y las muestras se recogieron de dos pozos de prueba situados en el km 1+000 y el km 4+000. La investigación se llevó a cabo utilizando tres dosis diferentes de Terrasil: 0,4 L/m³, 0,7 L/m³ y 1,5 L/m³. El índice de plasticidad descendió del 10,18 % al 8,75 % en el pozo de ensayo n.º 01 y del 10,28 % al 9,12 % en el pozo de ensayo n.º 02 al aumentar la dosis de Terrasil. El CHO y la MDS mostraron una variación mínima en el pozo de ensayo n.º 01, con un contenido de humedad que osciló entre el 10 % y el 11,00 % y una densidad seca máxima que osciló entre 2,050 y 2,026 g/cm³. En el pozo de ensayo n.º 02, el contenido de humedad osciló entre el 9,40 % y el 11,50 %, y la densidad seca máxima osciló entre 2,082 y 2,065 g/cm³. Los valores de CBR al 95 % aumentaron tanto en el pozo de ensayo n.º 01 (del 35,1 % al 37,0 %) como en el pozo de ensayo n.º 02 (del 35,31 % al 34,5 %), al aumentar la dosis de Terrasil.



2.2. Marco teórico

2.2.1. Suelo

Según Montejo (2002), el suelo es el producto resultante de la acción continua de los agentes atmosféricos sobre las rocas a lo largo del tiempo, proceso mediante el cual estas se desintegran o descomponen físicamente y químicamente, fenómeno que se conoce comúnmente como meteorización.

Por su parte, Ruiz (2022) lo define como una delgada capa de material no consolidado que recubre la superficie terrestre, originada a partir de la degradación física, química y biológica de las rocas. Este material puede permanecer en su lugar de origen o ser desplazado por agentes naturales, y su composición y estructura pueden verse alteradas por la intervención humana.

2.2.1.1. Clasificación de suelos

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la metodología de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO) son dos enfoques muy utilizados para la clasificación de suelos, tal y como se menciona en el Manual de Carreteras del MTC (2014). Los indicadores de suelo en los que se basan ambos sistemas se definen mediante estudios de laboratorio, como el análisis granulométrico, los límites de Atterberg y el contenido de humedad.

2.2.1.1.1 Clasificación por AASHTO

Terzaghi y Hogentogler idearon este método de clasificación de suelos, que utiliza las denominaciones A-1 a A-8 para dividir los suelos en ocho clases. Los grupos A-7, que a su vez se subdividen en doce subgrupos, incluyen suelos

con una alta concentración de materia orgánica, mientras que los grupos A-8 se utilizan para clasificar los suelos inorgánicos. La clasificación completa se puede consultar en la tabla n.º 2, y los nombres de los distintos grupos, en la tabla n.º 3 (Montejo, 2002).

A. Suelos granulares

Se denominan suelos granulares aquellos en los que el material fino que atraviesa el tamiz N°200 no supera el 35% del total. Dentro de esta categoría se agrupan los suelos A-1, A-2 y A-3.

Grupo A-1: Conformado por mezclas bien graduadas de fragmentos de roca, grava, arena y material ligante de baja plasticidad. También se admiten en este grupo mezclas bien graduadas que carezcan de material ligante.

- **Subgrupo A-1a:** Predominan las gravas y piedras, con o sin material ligante bien graduado.
- **Subgrupo A-1b:** Compuesto principalmente por arenas gruesas bien graduadas, con o sin ligante.

Grupo A-2: Engloba una amplia variedad de materiales granulares con menos del 35% de finos, distinguiéndose en cuatro subgrupos:

- **Subgrupos A-2-4 y A-2-5:** Materiales con hasta 35% de finos, cuya fracción pasante del tamiz N°40 comparte características con los suelos A-4 y A-5. Incluyen suelos gravosos y arenosos con presencia de limos.

- **Subgrupos A-2-6 y A-2-7:** Similares a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz N°40 presenta propiedades equivalentes a las de los suelos A-6 y A-7.

Grupo A – 3: Comprende arenas finas de origen eólico o fluvial, con escasa presencia de limo no plástico. Se incluyen también arenas de río con pequeñas cantidades de grava y arena gruesa.

B. Suelos finos limo arcillosos

Los suelos limosos que no presentan mucha flexibilidad y tienen una finura de al menos el 75 % —medida con un tamiz n.º 200— se clasifican en el Grupo A-4. Con una composición máxima del 64 %, esta categoría también incluye combinaciones de limo, grava y arena.

Los suelos de la clase A-5 son comparables a los de la clase A en muchos aspectos, pero se diferencian por la presencia de minerales micáceos o diatomeos, que aumentan su elasticidad y elevan sus valores de límite líquido.

La mayor parte del material del grupo A-6 es arcilla plástica, y al menos el 75 % de las partículas finas pasan por un tamiz n.º 200. También forman parte de este grupo las combinaciones de arcilla y arena en las que el contenido de arena y grava no supera el 64 %. Estos suelos son únicos, ya que presentan un gran cambio volumétrico entre las condiciones secas y húmedas.

Los suelos del grupo A-7 son similares a los del grupo A-6; sin embargo, presentan límites líquidos más altos y mayor flexibilidad. Se incluyen en él las siguientes categorías:

- **Subgrupo A-7-5:** Suelos con índices de plasticidad moderados en relación con su límite líquido.
- **Subgrupo A-7-6:** Suelos con índices de plasticidad muy elevados respecto a su límite líquido, que experimentan cambios volumétricos muy pronunciados.

Tabla 2

Clasificación de Suelos por AASHTO

CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% O MENOS QUE PASA POR LA MALLA N° 200)							MATERIALES LIMO - ARCILLOSOS (PASAN MÁS DEL 35% POR LA MALLA N° 200)			
Clasificación por Grupos :	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
	A - 1a	A - 1b		A - 2-4	A - 2-5	A - 2-6	A - 2-7				A - 7-5
											A - 7-6
Análisis Granulométrico del Porcentaje que pasa :											
Tamiz N° 10	50 máx.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Tamiz N° 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.	–	–	–	–	–	–	–	–
Tamiz N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite Líquido	6 máx.		NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidad				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de los materiales componentes importantes	Fragmentos de Piedra, Grava y Arena		Arena Fina	Arenas y Gravas limosas o arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
CLASIFICACIÓN GENERAL COMO SUBRASANTE	DE EXCELENTE A BUENA						DE REGULAR A MALA				

Nota: Tomado de MTC (2014)

Tabla 3

Nomenclatura de los Grupos de Clasificación por AASHTO

CLASIFICACIÓN DE SUELOS - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO)			
Suelos con el 35% o menos de		Suelos con más del 35% de finos	
A - 1	Gravas y Arenas	A - 4	Suelos limosos
A - 2	Gravas limosas o arcillosas	A - 5	Suelos limosos
	Arenas limosas o arcillosas	A - 6	Suelos arcillosos
A - 3	Arenas finas	A - 7	Suelos arcillosos

Nota: Tomado de MTC (2014)

2.2.1.1.2 Clasificación SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) tiene su origen en una adaptación realizada por Arturo Casagrande en 1942, la cual fue posteriormente generalizada y modificada. Este sistema organiza los suelos en tres grandes categorías: suelos de grano grueso, suelos de grano fino y suelos orgánicos (Montejo, 2002).

La distinción entre suelos de grano grueso y suelos de grano fino se establece mediante el uso del tamiz N°200. Las partículas que quedan retenidas en dicho tamiz corresponden a los suelos gruesos, mientras que las que logran atravesarlo pertenecen a los suelos finos. El criterio de clasificación indica que un suelo se considera de grano grueso cuando más del 50% de sus partículas son retenidas en el tamiz N°200, y de grano fino cuando más del 50% de sus partículas pasan a través de él.

Para la identificación de cada tipo de suelo, el sistema emplea una nomenclatura basada en símbolos conformados por un prefijo y un sufijo. Los prefijos corresponden a las iniciales, en idioma inglés, de los seis tipos principales de suelo reconocidos por el sistema: grava (gravel), arena (sand), limo (silt), arcilla (clay), suelos orgánicos de grano fino (organic) y turba (peat). Los sufijos, por su parte, permiten establecer subdivisiones dentro de cada grupo principal, aportando mayor precisión a la clasificación. La distribución completa de estos grupos y subgrupos puede observarse en la Tabla N°4.



Tabla 4

Clasificación de Suelos por SUCS

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio				CLASIFICACIÓN DE SUELOS					
				Símbolo de grupo	Nombre del Grupo				
SUELOS GRUESOS	Suelos de Partículas Gruesas Mas del 50% es retenido en la Malla N° 200	GRAVAS Mas del 50 % de la fracción gruesa es retenida en la Malla N° 4.	Gravas Limpias	Cu ≥ 4 y 1 ≤ Cc ≤ 3	GW	Grava Bien Graduada.			
			Menos del 5% pasa la Malla N° 200.	Cu < 4 y 1 > Cc > 3	GP	Grava Mal Graduada.			
			Gravas con Finos	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad.	GM	Grava Limosa.			
				IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad.	GC	Grava Arcillosa.			
			Gravas Limpias y con Finos.	Cumple los criterios para GW y GM	GW - GM	Grava bien graduada con Limo.			
				Cumple los criterios para GW y GC	GW - GC	Grava bien graduada con Arcilla			
				Cumple los criterios para GP y GM	GP - GM	Grava mal graduada con Limo.			
				Cumple los criterios para GP y GC	GP - GC	Grava mal graduada con Arcilla.			
			Arenas Limpias.	Cu ≥ 6 y 1 ≤ Cc ≤ 3	SW	Arena bien graduada.			
				Menos del 5% pasa por la Malla N° 200.	Cu < 6 y 1 > Cc > 3	SP	Arena mal graduada.		
		ARENAS El 50% o más de la fracción gruesa pasa la Malla N° 4.	Arena con Finos	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad.	SM	Arena Limosa			
				IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad.	SC	Arena Arcillosa			
			Gravas Limpias y con Finos	Cumple los criterios para SW y SM	SW - SM	Arena bien graduada con Limo.			
				Cumple los criterios para SW y SC	SW - SC	Arena bien graduada con Arcilla			
				Cumple los criterios para SP y SM	SP - SM	Arena mal graduada con Limo.			
				Cumple los criterios para SP y SC	SP - SC	Arena mal graduada con Arcilla.			
			SUELOS FINOS	Suelos de Partículas Finas El 50% o mas pasa la Malla N° 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido < 50.	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A".	CL	Arcilla de Baja Plasticidad.
							IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea "A".	ML	Limo de Baja Plasticidad.
Orgánicos	Límite Líquido - secado al horno < 0.75	OL				Arcilla Orgánica.			
	Límite Líquido - no secado					Limo Orgánico.			
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido > 50.	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A".			CH	Arcilla de Alta Plasticidad.			
		IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea "A"			MH	Limo de Alta Plasticidad			
	Orgánicos	Límite Líquido - secado al horno < 0.75			OH	Arcilla Orgánica.			
		Límite Líquido - no secado				Limo Orgánico.			
Suelos Altamente Orgánicos		Principalmente materia orgánica de color oscuro.			PT	Turba.			

Nota: Tomado de MTC (2014)

A. Suelos Gruesos

Dentro de los suelos de grano grueso, el sistema SUCS distingue dos subgrupos principales: gravas (G) y arenas (S). La separación entre ambos se realiza mediante el tamiz N°4. Un suelo se clasifica dentro del grupo G cuando más de la mitad del peso de su fracción gruesa queda retenida en dicho tamiz; en caso contrario, el suelo pertenece al grupo S. Cada uno de estos subgrupos se subdivide a su vez en cuatro categorías: para las gravas se tienen los símbolos GW, GP, GM y GC, y para las arenas los símbolos SW, SP, SM y SC.

B. Gravas

Para que una grava sea clasificada como bien graduada (GW), el contenido de finos debe ser inferior al 5%, y además debe cumplir dos condiciones simultáneamente: el coeficiente de curvatura (C_c) debe ubicarse entre 1 y 3, y el coeficiente de uniformidad (C_u) debe ser superior a 4. En caso de no satisfacer ambos requisitos, la grava se clasifica como mal graduada (GP).

- Cuando el contenido de finos supera el 12%, la grava se clasifica según el tipo de finos presentes: si predominan las arcillas, corresponde la denominación GC; si predominan los limos, corresponde la denominación GM.
- En los casos en que el porcentaje de finos se encuentre en el rango intermedio, entre 5% y 12%, se emplea una clasificación con doble símbolo, como por ejemplo GW-GC, para representar la condición mixta del material.

C. Arenas

Una arena se clasifica como bien graduada (SW) cuando su contenido de finos es inferior al 5% y, adicionalmente, cumple con un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3, junto con un coeficiente de uniformidad (Cu) mayor a 6. Si no se cumplen estas condiciones, la arena se clasifica como mal graduada (SP).

Cuando el porcentaje de finos en la arena excede el 12%, la clasificación depende de la naturaleza de dichos finos: se denomina arena arcillosa (SC) si los finos corresponden a arcillas, y arena limosa (SM) si corresponden a limos.

Finalmente, cuando el porcentaje de finos se ubica en el rango intermedio, entre 5% y 12%, se recurre a una notación de doble símbolo, como en el caso de SP-SM, para reflejar la combinación de características presentes en el material.

D. Suelos finos

El sistema SUCS agrupa los suelos finos en tres categorías fundamentales: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C), y limos y arcillas orgánicos (O). Cada una de estas categorías se subdivide a su vez según el valor del límite líquido, tomando como frontera el 50%. Cuando el límite líquido es inferior a ese valor, se añade la letra L al símbolo correspondiente, indicando baja compresibilidad (Low Compressibility); cuando supera el 50%, se incorpora la letra H, que denota alta compresibilidad (High Compressibility). De esta manera, los tipos de suelo resultantes son los siguientes:

- ML: Limos inorgánicos de baja compresibilidad.
- CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.
- OL: Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

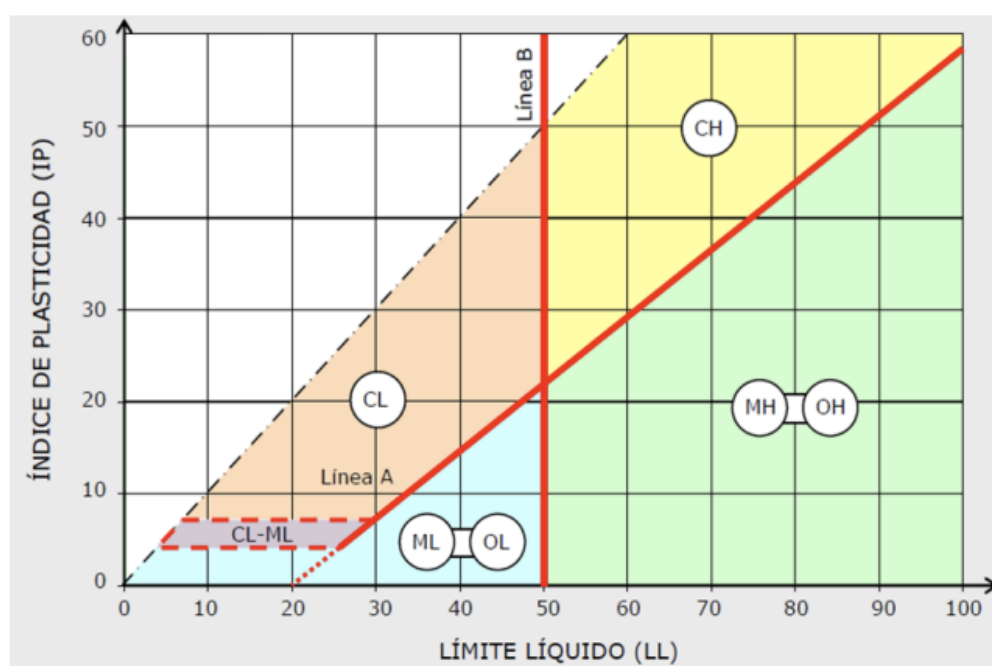
- MH: Limos orgánicos de alta compresibilidad.
- CH: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.
- OH: Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

Para los suelos con contenido muy elevado de materia orgánica, como es el caso de las turbas, se reserva el símbolo Pb.

La figura 1 muestra el diagrama de plasticidad, también conocido en ocasiones como diagrama de Casagrande, que constituye la herramienta más básica para la clasificación de suelos de grano fino. La línea «A» separa los suelos orgánicos (arcillas y limos) entre sí, mientras que la línea «B» distingue entre los suelos altamente compresibles y los que no lo son. Estas dos líneas sirven para delimitar las distintas zonas de clasificación.

Figura 1

Carta de Casagrande para suelos



Nota: (L. Bañón & J. Bevíá, 2000)

2.2.2. Carreteras no pavimentadas

Las vías de comunicación terrestre constituyen un elemento fundamental para el progreso social y económico de cualquier nación, ya que representan el principal medio de conexión entre comunidades y ciudades en proceso de desarrollo, siendo indispensables para atender las demandas de una población en constante crecimiento.

Según Gutiérrez (2017), en la actualidad existe una considerable cantidad de carreteras que no cuentan con pavimento. Algunas de ellas han sido objeto de trabajos de mejoramiento con el propósito de prolongar su funcionalidad y reducir al mínimo su deterioro, permitiendo que continúen prestando servicio a los usuarios a pesar de carecer de una capa de rodadura pavimentada.

Para su identificación y clasificación, los caminos no pavimentados se distinguen por las siguientes características:

- Caminos de tierra: Están conformados por el suelo natural del terreno, pudiendo ser mejorados mediante la incorporación de grava seleccionada a través de un proceso de zarandeo.
- Las carreteras de grava: Cuentan con una capa superior de material pétreo, que puede extenderse a mano o mediante cribado, y las partículas de esta capa no pueden superar los 75 mm.
- Caminos afirmados: Su superficie está revestida con material proveniente de canteras, el cual puede ser utilizado en su estado natural o procesado mediante zarandeo. La dosificación empleada

combina tres tipos de materiales: piedra, arena y finos o arcillas, con un tamaño máximo de partícula de 25 mm.

- Caminos afirmados con superficie estabilizada: Corresponden a vías cuya capa de rodadura ha sido tratada con materiales industriales para mejorar su desempeño. Dentro de esta categoría se encuentran los afirmados de grava mejorados con asfalto, cemento, cal o aditivos químicos, así como los suelos naturales tratados con material granular, finos ligantes, asfalto, cemento, cal o aditivos químicos.

De acuerdo con el MTC (2014), la mayor parte de las carreteras no pavimentadas del país corresponden a vías de bajo volumen de tránsito. Este tipo de infraestructura vial se concentra principalmente en las zonas de sierra y en asentamientos humanos, donde una reducida proporción de la población dispone de acceso vial. Estas vías, aunque existentes, no se encuentran pavimentadas y requieren intervención técnica para garantizar su durabilidad y responder adecuadamente al crecimiento y desarrollo de las comunidades que sirven.

2.2.3. Estabilización de suelos

Los tratamientos mecánicos o la incorporación de agentes químicos de origen natural o sintético son dos ejemplos de las formas en que se puede mejorar y modificar el suelo con el fin de estabilizarlo. Mediante el uso de mezclas de tierra con cemento, cal, asfalto u otros compuestos especializados, este método se aplica a menudo a suelos con condiciones de subbase



deficientes o insuficientes. La incorporación de cemento, cal, asfalto o cualquier otro agente estabilizador adecuado en las capas de subbase o de base granular puede mejorar la calidad del material.

Si bien las técnicas de estabilización son diversas, todas comparten un mismo objetivo: incrementar la resistencia mecánica del suelo y garantizar que dicha mejora se mantenga a lo largo del tiempo. Estos procedimientos van acompañados de un proceso de compactación que permite integrar adecuadamente los materiales y alcanzar el resultado final esperado (MTC, 2014).

Ante la variedad de características que pueden presentar los suelos, los profesionales responsables de una obra deben evaluar diferentes alternativas antes de definir la solución más adecuada. Entre las opciones más comunes se encuentran:

- Aprovechar el suelo existente en su estado natural, considerando sus propiedades reales como parámetros de diseño.
- Reemplazar el material original por otro que cumpla con las especificaciones técnicas requeridas.
- Intervenir el suelo in situ para mejorar sus propiedades y adecuarlo a los requisitos de la obra.

Entre los métodos de estabilización más empleados en la ingeniería vial se pueden mencionar los siguientes:

- Estabilización por drenaje: orientada a reducir el contenido de agua en el suelo mediante sistemas de evacuación.
- Estabilización por medios eléctricos: basada en el uso de pilotes electrometálicos, siendo este el procedimiento más difundido dentro de esta categoría.
- Estabilización química: consiste en la adición de agentes estabilizadores como cemento, cal, asfalto u otros productos similares que modifican la estructura del suelo.
- Estabilización mecánica: el método más frecuente dentro de esta categoría es la compactación, complementada con la mezcla de diferentes tipos de suelos.

Es importante señalar que, dada la diversidad en la composición de los suelos, no todos los métodos mencionados resultan aplicables a cualquier tipo de material, sino que cada técnica tiene un campo de aplicación específico según las características del suelo a tratar.

La estabilidad volumétrica, la resistencia, la permeabilidad, la compresibilidad y la durabilidad del suelo son algunas de las características básicas más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de elegir una técnica de estabilización (Montejo, 2002).

- a) La estabilidad volumétrica:** Esta propiedad está directamente relacionada con el comportamiento de los suelos expansivos, los cuales experimentan variaciones considerables en su volumen como consecuencia de los cambios en su contenido de humedad.

- b) Resistencia:** La capacidad resistente de un suelo está estrechamente vinculada a su humedad interna. Para incrementar esta propiedad, el método más efectivo es la compactación, ya que permite densificar el material y aumentar su capacidad de soporte ante las cargas aplicadas.
- c) Permeabilidad:** Para controlar la permeabilidad del suelo se recurre a la compactación y a técnicas de inyección. Un mayor contenido de humedad durante el proceso de compactación favorece la reducción de los espacios vacíos en la masa del suelo, disminuyendo así su permeabilidad.
- d) Comprensibilidad:** La compactación también tiene un efecto significativo sobre la comprensibilidad del suelo, ya que al reducir los vacíos internos disminuye la deformación ante cargas externas. En este proceso deben considerarse tanto el contenido de humedad del material como la magnitud de las cargas a las que estará sometido.
- e) Durabilidad:** Esta propiedad se encuentra condicionada por la resistencia del suelo frente a los efectos de la erosión y la abrasión generada por el tráfico vehicular. Su comportamiento depende en gran medida de la calidad del diseño vial y de los materiales seleccionados para conformar la estructura del pavimento.

2.2.3.1. Subrasante

La subbase es la superficie final que se crea mediante trabajos de movimiento de tierras, como el desmonte y el relleno del terreno, y constituye una parte importante del diseño de una carretera. Dado que la estructura del pavimento o la subbase se apoya directamente sobre esta superficie, debe ser lo suficientemente resistente como para soportar las cargas para las que se ha diseñado la carretera. Los suelos de esta capa deben compactarse para que adquieran las cualidades mecánicas necesarias que garanticen una base estructuralmente sólida.

El flujo de tráfico estimado, la capacidad portante en condiciones reales de servicio y las cualidades de los materiales que constituirán la capa de rodadura son aspectos cruciales a tener en cuenta a la hora de diseñar la estructura del pavimento que se instalará sobre la subbase. En el ámbito de la construcción, es esencial que los 0,30 m inferiores del suelo de la subbase, medidos desde la superficie superior, se compacten para alcanzar una densidad seca mínima del 95 %, según lo determinado por el ensayo de Proctor modificado.

En cuanto a los suelos ubicados por debajo del nivel superior de la subrasante, aquellos que se encuentren a una profundidad no menor a 0.60 m deberán presentar condiciones de estabilidad adecuadas, con un valor de CBR igual o superior al 6%. Cuando el CBR del suelo en esa zona resulte inferior a dicho umbral, se estará ante una subrasante clasificada como pobre o inadecuada, situación que exigirá la aplicación de medidas de mejoramiento o

estabilización para elevar su capacidad de soporte a los niveles mínimos exigidos por la normativa vigente.

Tabla 5

Categorías de la Subrasante

CATEGORÍAS DE SUBRASANTE	CBR
S0: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% a CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% a CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% a CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% a CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Nota: MTC (2014)

2.2.3.2. Estabilización de la Subrasante

Cuando el valor CBR de los materiales utilizados para construir las capas de la subbase es igual o superior a 6, se considera adecuado. Si el suelo se sitúa por debajo de este nivel, se considera una subbase deficiente o inadecuada, por lo que será necesario aplicar procedimientos de estabilización. La estabilización mecánica y química, la sustitución del suelo de cimentación, los geosintéticos (geotextiles, geomallas, etc.), la elevación del nivel, los cambios en el trazado de la carretera y otras opciones deben tenerse en cuenta en un examen exhaustivo del suelo natural antes de elegir la mejor alternativa. Antes de tomar una decisión definitiva, deben tenerse en cuenta tanto los factores técnicos como los económicos.

El objetivo principal de la estabilización de la subbase es mejorar de forma permanente las cualidades del suelo, de modo que los proyectos de reparación de carreteras o de construcción puedan llevarse a cabo de forma sencilla, eficiente, con el equipo adecuado y a un coste razonable. Antes de iniciar cualquier operación de estabilización, es fundamental identificar el tipo exacto de suelo. Los tipos de suelo que se encuentran con mayor frecuencia en proyectos de este tipo son la arcilla, el limo y la arena limosa o arcillosa.

El proceso de estabilización de la subbase depende en gran medida de mantener la superficie de esta capa al menos a una cierta distancia del nivel freático. El MTC (2014) establece que la distancia mínima para las diferentes categorías de subbase es la siguiente: para subbases muy excelentes y sobresalientes, se requieren 0,60 m; para subbases buenas y aceptables, 0,80 m; para subbases malas, 1,00 m; y para subbases insuficientes, 1,20 m. Cuando estas distancias no sean viables, es necesario añadir subdrenajes, capas anticontaminación o de drenaje, o elevar el talud hasta el nivel necesario.

2.2.3.3. Tipos de estabilización

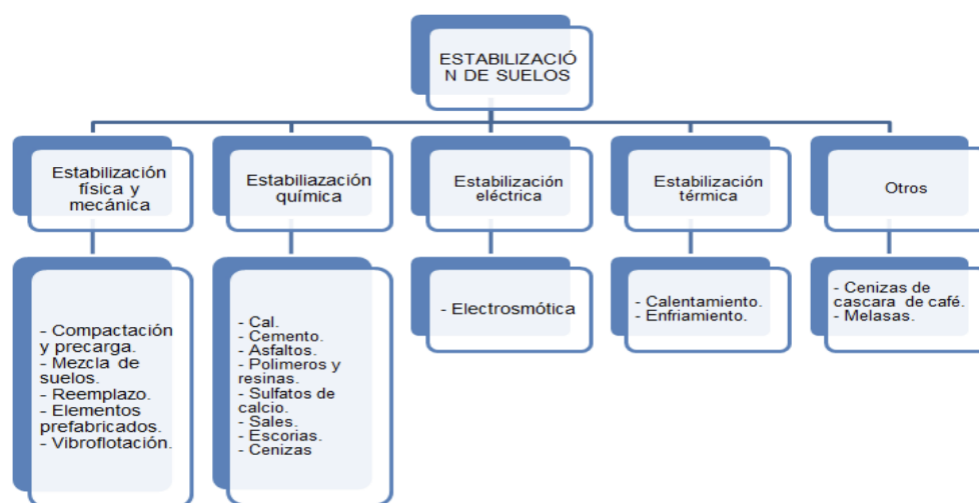
La estabilización de suelos puede entenderse como el conjunto de procedimientos orientados a elevar la calidad de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de la subrasante, con el propósito de incrementar su capacidad de soporte. Dichos procedimientos pueden ser de naturaleza química, física, natural o sintética, y su aplicación se concentra principalmente en subrasantes clasificadas como pobres o inadecuadas. Las técnicas más empleadas incluyen el tratamiento con suelo-cemento, suelo-asfalto y otros productos estabilizadores. Cuando estas técnicas se aplican sobre las capas de

base o subbase del pavimento, se obtienen materiales tratados con propiedades mejoradas. Es importante destacar que cada tipo de estabilizante actúa de manera diferente sobre el suelo, por lo que no todos generan mejoras en las mismas propiedades, siendo también determinante el análisis del costo de cada alternativa (Pérez, 2014).

Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014), publicado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, define la estabilización de suelos como el proceso de aumentar la capacidad portante de un suelo y garantizar que dicho comportamiento se mantenga a lo largo del tiempo. Para alcanzar este objetivo, existen diversas opciones tecnológicas, como la combinación de varios materiales o el uso de agentes estabilizadores químicos o físicos. No obstante, la compactación es un complemento necesario de cualquier procedimiento, ya que consolida y potencia las ventajas obtenidas con el tratamiento aplicado.

Figura 2

Algunos tipos de estabilización de suelos



Nota: Perez, 2012.

A. Estabilización física

La estabilización física comprende todas aquellas intervenciones que buscan mejorar las condiciones del suelo a partir de modificaciones en sus características físicas, sin recurrir a reacciones químicas. Entre los métodos más representativos de esta categoría se encuentran la mezcla de suelos y el uso de geosintéticos (Braja M. Das, 2013).

Mezcla de suelos: Este método consiste en combinar distintos tipos de suelo de manera estratégica, de modo que el material resultante aproveche las ventajas de cada componente, como la fricción interna de uno y la cohesión del otro, logrando así una masa de suelo estable con partículas bien integradas. Los tipos de suelo que pueden emplearse en este proceso son los siguientes:

- **Suelos naturales:** Proviene de depósitos naturales como playas o lechos de ríos, e incluyen materiales como arenas uniformes de origen marino, gravas, arcillas, limos y arenas fluviales.
- **Suelos procesados:** Son suelos extraídos de bancos naturales que, en su estado original, no reúnen las condiciones requeridas. Por ello, deben someterse a un proceso de tratamiento con el fin de corregir su granulometría, mejorar la distribución del tamaño de sus partículas, aumentar su densidad y optimizar su textura, obteniendo así un material con mejor consistencia y compacidad.
- **Suelos de bancos de préstamo:** Se refiere a materiales aptos para ser utilizados en la construcción o mejoramiento de

carreteras, los cuales se extraen de canteras o depósitos ubicados en las proximidades de la obra vial.

- **Suelos de tipo especial:** Son suelos cuyas propiedades físicas y químicas han sido modificadas mediante tratamientos específicos, con el objetivo de hacerlos aptos para su uso en la conformación de vías.

Geosintéticos: La incorporación de geosintéticos en los procesos de estabilización aporta resistencia a la tracción al suelo tratado y contribuye significativamente a mejorar el rendimiento estructural del pavimento durante su construcción y vida útil. Además, estos materiales presentan un comportamiento favorable frente a los agentes externos que pueden degradar el suelo. Según su función específica, los geosintéticos más utilizados son:

- **Geotextiles:** Cumplen una doble función dentro de la estructura vial, actuando como elemento de drenaje y como capa separadora que evita la contaminación entre materiales de diferente naturaleza.
- **Geomallas:** Gracias a su estructura reticular, permiten reforzar el terreno mediante un efecto de confinamiento que incrementa la capacidad de soporte del suelo.
- **Geomembranas:** Se emplean principalmente para impermeabilizar y proteger el suelo en zonas donde la presencia de humedad elevada representa un riesgo para la estabilidad de la estructura vial.

De acuerdo con el MTC (2014), la combinación de geotextiles, en su función de separación y filtro, con geomallas en su función de refuerzo, constituye una alternativa eficaz para lograr la estabilización de subrasantes clasificadas como inadecuadas, potenciando los beneficios individuales de cada uno de estos materiales.

Figura 3

Estabilización física del suelo



Nota: <https://suelos-fsica-qumica-y-mecnica>

B. Estabilización mecánica

A diferencia de otros métodos, la estabilización mecánica no requiere la incorporación de agentes externos para modificar las propiedades del suelo. Esta categoría engloba diversas técnicas de intervención directa sobre el terreno, entre las que se destacan la compactación, la vibroflotación, la compactación dinámica y la voladura o blasting (Braja M. Das, 2013).

Según el MTC (2014), la estabilización mecánica tiene como característica fundamental el hecho de que mejora las condiciones del material

sin alterar su composición ni su estructura interna. El mecanismo principal que se emplea para lograr esta mejora es la compactación, a través de la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en la masa del suelo, incrementando así su densidad y estabilidad.

- a) **Compactación:** Consiste en un proceso de naturaleza mecánica mediante el cual se optimizan las propiedades resistentes del suelo, incluyendo su compresibilidad y su relación esfuerzo-deformación. Como resultado de su aplicación, se obtiene un incremento en la capacidad de soporte del suelo, una reducción de los asentamientos diferenciales y una disminución de la permeabilidad, lo que limita tanto el escurrimiento superficial como la infiltración del agua hacia las capas inferiores.
- b) **Vibroflotación:** Mediante la vibroflotación, los suelos naturales o de relleno que no hayan sido compactados previamente pueden compactarse a mayores profundidades. Para que esta técnica funcione, el suelo debe ser granular y contener pocas partículas no cohesivas. Las propiedades mecánicas del material, entre ellas su capacidad portante y su permeabilidad, mejoran, entre otras cosas, gracias a su objetivo principal.
- c) **Compactación dinámica:** Es una técnica de densificación aplicable tanto a suelos granulares como cohesivos, cuyo objetivo es aumentar la capacidad portante del terreno. El procedimiento consiste en dejar caer libremente una masa de entre 8 y 200 toneladas desde alturas que oscilan entre 15 y 40 metros,

generando impactos de alta energía que reorganizan y densifican las partículas del suelo en profundidad.

d) Voladura o Blasting: Esta técnica ha sido empleada para densificar suelos mediante el uso de dinamita al 60%, la cual se coloca a cierta profundidad por debajo del nivel del suelo saturado, en función del espesor de la capa que se desea compactar. Generalmente, se requiere entre 3 y 5 detonaciones sucesivas para alcanzar el nivel de compactación necesario en el área intervenida.

Figura 4

Estabilización mecánica del suelo



Nota: <https://Es/estabilizacion-de-suelos>

C. Estabilización química

La estabilización química consiste en la aplicación de agentes estabilizadores sobre el suelo con el propósito de inducir reacciones químicas que transformen sus propiedades internas y eleven su capacidad para soportar cargas dinámicas. Este enfoque representa una de las alternativas más



utilizadas en la ingeniería geotécnica para el mejoramiento de suelos problemáticos.

La selección de los productos químicos para este tipo de estabilización responde principalmente a dos criterios: su comprobada efectividad en el tratamiento del suelo y su accesibilidad económica frente a otras alternativas disponibles en el mercado. Sin embargo, su aplicación exige la supervisión de un especialista tanto en la fase de diseño como durante la ejecución de los trabajos constructivos (Roldán, 2010).

Dentro de los objetivos que persigue la estabilización química se distinguen los siguientes:

- Generar una fuerza cohesiva entre las partículas del suelo o recubrir e impermeabilizar su superficie.
- Producir una mezcla cementante que vincule las partículas del suelo, otorgándole mayor resistencia y durabilidad.
- En el caso de suelos finos arcillosos, reducir su plasticidad para controlar los cambios volumétricos ocasionados por la interacción del agua con la arcilla, mejorando así su resistencia mecánica (Delva, 2016).

La estabilización química puede mejorar las siguientes propiedades geotécnicas:

- **Estabilidad volumétrica:** Los suelos son susceptibles a experimentar expansión y contracción cíclica como consecuencia



de las variaciones estacionales en el contenido de humedad, afectando la estabilidad de la estructura vial.

- **Resistencia:** La estabilización química mejora la capacidad del suelo para resistir el esfuerzo de cizallamiento, lo que lo hace más resistente a las presiones ejercidas por los vehículos..
- **Permeabilidad:** Se entiende como la capacidad del suelo para permitir el paso de un fluido a través de su estructura interna sin alterarla, en un tiempo determinado. La estabilización química puede reducir esta propiedad en suelos susceptibles a la infiltración.
- **Compresibilidad:** Hace referencia a la reducción del volumen que experimenta un suelo cuando es sometido a presiones externas. Mediante la estabilización química es posible controlar este comportamiento bajo parámetros definidos de carga.

Entre los estabilizantes químicos más empleados en la práctica se encuentran los siguientes (Gutiérrez C., 2010):

- **Cal:** Actúa reduciendo la plasticidad de los suelos arcillosos y representa una de las opciones más económicas para su estabilización.
- **Cemento Portland:** Su principal efecto es el incremento de la resistencia del suelo, siendo especialmente eficaz en arenas y gravas finas.



- **Productos asfálticos:** Se utilizan preferentemente en materiales triturados sin cohesión, aportando impermeabilización y cohesión entre partículas.
- **Cloruro de sodio:** Su acción sobre el suelo se orienta a impermeabilizar la superficie y a suprimir la generación de polvo en suelos arcillosos y limosos.
- **Cloruro cálcico:** De manera similar al anterior, se emplea para impermeabilizar el suelo y controlar la emisión de partículas finas en suspensión.
- **Escorias de fundición:** Se incorporan en la carpeta asfáltica para fortalecer su resistencia, mejorar su impermeabilización y extender su vida útil.
- **Polímeros:** Su aplicación en la carpeta asfáltica tiene como propósito aumentar su resistencia estructural, reducir la permeabilidad y prolongar su durabilidad ante las condiciones de servicio.
- **Hule de neumáticos:** Se integra en mezclas asfálticas para incrementar la resistencia de la carpeta, mejorar su comportamiento ante la humedad y alargar su período de vida útil.

El Ministerio de Comunicaciones y Transporte también ofrece una guía de referencia para que los expertos la utilicen a la hora de decidir qué estabilizador es el más adecuado para un proyecto de carretera concreto y un tipo de suelo determinado.

Tabla 6

Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador

Área	Clase de suelo	Tipo de estabilizador recomendado		Restricción en LL e IP del suelo	Restricción en el porcentaje que pasa la malla 200	Observaciones	
1A	SW o SP	1	Asfalto				
		2	Cemento Portland				
		3	Cal - Cemento - cenizas volantes	IP no excede de 25			
1B	SW - SM o	1	Asfalto	IP no excede de 10			
	SP-SM o	2	Cemento Portland	IP no excede de 30			
	SW- SC o	3	Cal	IP no excede de 12			
	SP-PC	4	Cal - Cemento - cenizas volantes	IP no excede de 25			
1C	SM o	1	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso		
	SC o	2	Cemento Portland	(b)			
	SM-SC	3	Cal	IP no excede de 12			
		4	Cal - Cemento - cenizas volantes	IP no excede de 25			
2A	GW o Gp	1	Asfalto			Solamente material bien graduado.	
		2	Cemento Portland			El material deberá contener cuanto menos 45% en el peso de material que pasa la Malla N° 4.	
		3	Cal - Cemento - cenizas volantes	IP no excede de 25			
2B	GW- GM o	1	Asfalto	IP no excede de 10		Solamente material bien graduado.	
	GP- GM o	2	Cemento Portland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en el peso de material que pasa la Malla N° 4.	
	GW- GC o	3	Cal	IP no excede de 12			
	GP-GC	4	Cal - Cemento - cenizas volantes	IP no excede de 25			
2C	GM o	1	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	El material deberá contener cuanto menos 45% en el peso de material que pasa la Malla N° 4.	
	GC o	2	Cemento Portland	(b)			
	GM-GC	3	Cal	IP no excede de 12			
	CH o CL o	4	Cal - Cemento - cenizas volantes	IP no excede de 25			
3	MH o ML o OH o OL o	1	Cemento Portland	LL no menos de 40 IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios.	
	ML - CL	2	Cal	IP no menor de 20			
IP = Índice Plástico (b) $IP \geq 20 + (50 - \text{Porcentaje que pasa la malla N}^\circ 200) / 4$				Sin restricción u observación No es necesario aditivo estabilizador		Fuente : US Army Corps of Engineers	

Nota: (MTC, 2014)

Tabla 7

Guía complementaria referencial para la selección del tipo de estabilizador

TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	NORMAS TÉCNICAS	SUELO ¹	DOSIFICACIÓN ²	CURADO (APERTURA AL TRÁNSITO) ³	OBSERVACIONES
Cemento	EG-CBT-2008 Sección 3068 ASTM C150 AASHTO M85	A-1,A-2,A-3,A-4,A-5,A-6 y A-7 LL < 40% IP ≥ 18% CMO ² < 1.0% Sulfatos (SO ₄ 2) < 50% Abrasión < 50% AF ≤ 10% AG ≤ 12% Durabilidad SO ₄ Mg AF ≤ 15% AG ≤ 18	2 - 12 %	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association)
Emulsión	ASTM D2397 ó AASHTO M208	A-1,A-2 y A-3 Pasante malla N°200 ≤ 10% IP ≥ 18% Equivalencia de arena ≥ 40% CMO ² < 1.0% Sulfatos (SO ₄ 2) < 0.6 % Abrasión < 50% AF ≤ 10% AG ≤ 12% Durabilidad SO ₄ Mg AF ≤ 15% AG ≤ 18	4 - 8 %	Mínimo 24 horas	Cantidad de aplicación a ser definida de acuerdo a resultados del ensayo Marshall modificado o Illinois
Cal	EG-CBT-2008 Sección 3078 AASHTO M216 ASTM C977	A-2-6,A-2-,A-6 y A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMO ² < 3.0% Sulfatos (SO ₄ 2) < 0.2 % Abrasión < 50%	2 - 8 %	Mínimo 72 horas	Para IP > 50%, se puede aplicar cal en dos etapas Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma ASTM D 6276
Cloruro de calcio	ASTM D98 ASTM D345 ASTM E449 MTC E 1109	A-1,A-2,A-3 IP ≤ 15% CMO ² < 3.0% Sulfatos (SO ₄ 2) < 0.2 % Abrasión < 50%	1 a 3% en peso del suelo seco	24 horas	
Cloruro de sodio	EG-CBT-2008 Sección 309B ASTM E534 MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 8 % ≤ IP ≤ 15% CMO ² < 3.0% Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m ³	07 días	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba
Cloruro de Magnesio	MTC E 1109	A-1,A-2,A-3 IP ≤ 15% CMO ² < 3.0% PH mínimo 5 Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m ³	48 horas	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba
Enzimas	EG-CBT-2008 Sección 308B MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 6 % ≤ IP ≤ 15% 4.5 < Ph ≤ 8.5 CMO ² No debe contener Abrasión < 50% % < N° 200: 10 - 35%	1L / 30-33 m ³	De acuerdo a Especificaciones del fabricante	
Aceites sulfonados		Aplicable en suelos con partículas finas limosas o arcillosas, con LL bajo, arcillas y limos muy plásticos CMO ² < 1.0% Abrasión < 50%		De acuerdo a Especificaciones del fabricante	

1 Espesor de tratamiento por capas de 6 a 8"

Tamaño máximo: 2", debe carecer de restos vegetales

Los suelos naturales, materiales de bancos de préstamo o mezcla de ambos que sean objeto de estabilización, deben estar definidos en el Expediente Técnico del Proyecto

2 CMO: Contenido de materia orgánica

3 Los diseños o dosificaciones deben indicar: fórmula de trabajo, tipo de suelo, cantidad de estabilizador, volumen de agua, valor de CBR o resistencia a compresión simple o resultados de ensayos Marshall modificado o Illinois, según corresponda al tipo de estabilizador aplicado

4 Para altitudes mayores a 3000 msnm

5 Después de finalizado el proceso de compactación

Nota: (MTC, 2014)



D. Estabilización con enzimas orgánicas

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica cuya función principal es actuar como catalizadores en reacciones químicas, acelerando dichos procesos de manera casi inmediata. Su acción es altamente específica, ya que interactúan únicamente con sustancias que poseen una configuración molecular determinada. Una característica destacable de estos compuestos es que son completamente biodegradables, lo que los convierte en una alternativa ambientalmente compatible.

Desde el punto de vista de su comportamiento molecular, las proteínas que conforman las enzimas pueden sufrir un proceso denominado desnaturalización, no atraviesan membranas semipermeables y son susceptibles de alcanzar un estado de saturación. La desnaturalización implica una alteración en la estructura tridimensional de la molécula, lo que compromete sus propiedades físicas y químicas. Este fenómeno puede ser desencadenado por factores físicos como el incremento de temperatura, o por factores químicos como variaciones en el pH, la presencia de disolventes orgánicos o cambios en la fuerza iónica del medio (Ravines, 2010).

Acción enzimática o catalítica:

El proceso mediante el cual las enzimas desencadenan reacciones químicas se inicia cuando las moléculas reactivas, denominadas sustratos, entran en contacto con la enzima, dando lugar a lo que se conoce como reacción catalítica. Este proceso se desarrolla en tres etapas secuenciales:

- En la primera etapa, el sustrato se une al sitio activo de la enzima, formando el denominado complejo enzima-sustrato.
- En la segunda etapa, si la enzima requiere de un cofactor o coenzima para su funcionamiento, se produce el estado de saturación enzimática.
- En la tercera etapa, una vez concluida la reacción, la enzima se libera de su sitio activo y queda disponible para iniciar nuevamente el proceso con otras moléculas de sustrato.

Factores que afectan la actividad enzimática

El desempeño de las enzimas puede verse condicionado por diversos factores externos, entre los que destacan:

- 1. Concentración del sustrato:** La cantidad de sustrato disponible en el medio influye directamente en la velocidad de la reacción catalítica.
- 2. Temperatura:** La temperatura ejerce un efecto determinante sobre la actividad enzimática. Cuando la temperatura aumenta, las moléculas adquieren mayor energía cinética, lo que acelera la reacción; sin embargo, el exceso de calor provoca la desnaturalización de la enzima. Por el contrario, una disminución de la temperatura reduce la velocidad de encuentro entre la enzima y el sustrato, y en condiciones extremas también puede inducir la desnaturalización.

3. **pH:** Cada enzima requiere operar dentro de un rango específico de concentración de pH. Cuando las condiciones del medio se alejan de ese rango óptimo, la estructura de la enzima se ve comprometida, produciéndose igualmente su desnaturalización e inhibiendo su capacidad para catalizar los procesos bioquímicos correspondientes.

Funcionamiento enzimático defectuoso

Para que un sistema enzimático opere de manera eficiente, es indispensable que las enzimas se encuentren en niveles adecuados y en condiciones favorables. Cuando esto no ocurre, pueden presentarse tres tipos de alteraciones funcionales:

- **Deficiencia coenzimática:** La ausencia o insuficiencia de coenzimas impide que la enzima cumpla correctamente su función catalítica.
- **Competencia por iones metálicos:** Gran parte de las enzimas requieren iones metálicos para activarse. No obstante, cuando existe competencia entre diferentes iones por ocupar el sitio de unión, el ion original puede ser desplazado por uno extraño. Si este ion extraño se encuentra en altas concentraciones, la enzima puede adquirir una forma no funcional, alterando su desempeño.
- **Inhibidores enzimáticos:** Ciertos iones metálicos pueden desactivar las enzimas al formar sales o convertirlas en moléculas no catalíticas. Asimismo, cuando una molécula extraña se enlaza

con alta afinidad al sitio activo de la enzima, bloquea el acceso normal del sustrato, produciendo una inhibición que paraliza la reacción catalítica.

Aplicación de las enzimas en la estabilización de pavimentos

En el campo de la ingeniería vial, las enzimas son empleadas como agentes estabilizadores del suelo, actuando simultáneamente como material aglutinante y catalizador. Su incorporación en el suelo favorece el proceso de interacción con el agua, reduciendo progresivamente la cantidad de vacíos presentes en la masa del suelo y mejorando así su densidad y cohesión interna.

Dependiendo del tipo de enzima utilizada, es posible obtener mejoras tanto en las propiedades mecánicas como en las físicas del suelo en las distintas capas de la estructura del pavimento, incluyendo la subrasante, la subbase y la base. Los beneficios más relevantes que se obtienen con su aplicación son los siguientes:

- Incremento en los valores de densidad de compactación del suelo.
- Mejora significativa de la capacidad portante del terreno.
- Extensión de la vida útil de las vías y carreteras tratadas.
- Acción adhesiva que prolonga los intervalos de mantenimiento y reduce la pérdida de material pétreo.
- Mayor capacidad de las capas de rodadura tratadas para soportar cargas superiores a las contempladas en el diseño original.

- Reducción de los costos asociados al mantenimiento y conservación de la infraestructura vial.

2.2.4. Aditivos con Enzimas Orgánicas

2.2.4.1. Terrasil

Terrasil es un aditivo reactivo compuesto en su totalidad por organosilanos, caracterizado por ser soluble en agua, resistente a la radiación ultravioleta y estable frente a condiciones de elevada temperatura. Su principal mecanismo de acción consiste en generar una reacción química con las partículas del suelo, independientemente del tipo de material, produciendo un efecto de impermeabilización e hidrofugación de manera permanente.

El proceso de transformación del suelo tratado se produce a nivel superficial de las partículas, como resultado de la reacción entre los silicatos presentes en el suelo y los grupos silanol que contiene el aditivo. Esta reacción química modifica de manera irreversible la superficie de las partículas, confiriéndole al suelo propiedades hidrófobas duraderas que le permiten repeler activamente las moléculas de agua.

Terrasil ha sido desarrollado como una solución técnica integral para la estabilización de suelos, orientada a corregir deficiencias en la granulometría fina y problemas de plasticidad elevada, con el fin de conformar una capa de suelo firme, con mayor resistencia mecánica y mínima variación volumétrica. Gracias a su versatilidad, su campo de aplicación va más allá de los terraplenes y fondos de carretera, abarcando también los siguientes usos (Optimasoil Nanotechnology, 2020):

- Reparación y estabilización de vías de servicio y carreteras rurales.
- Mejora de la subbase para infraestructuras aeroportuarias.
- Estabilización de andenes ferroviarios, con especial atención a los tramos de alta velocidad.
- Preparación de terrenos para grandes iniciativas de renovación urbana.
- Mantener la estabilidad de los vertederos para permitir la construcción de nuevos complejos deportivos y de ocio.

Entre los beneficios técnicos que ofrece la estabilización con Terrasil se pueden destacar los siguientes: preservación de la porosidad natural del suelo, reducción de la erosión hídrica, eliminación de la expansividad en suelos arcillosos, incremento del valor de CBR, prolongación de la vida útil de la vía, capacidad de repeler el agua, y reducción del espesor de las capas que conforman la estructura del pavimento, lo que se traduce directamente en una disminución de los costos de construcción.

2.2.4.1.1 Ventajas

De acuerdo con Optimasoil Nanotechnology (2020), entre los principales beneficios que ofrece el uso del aditivo Terrasil en la estabilización de suelos se pueden destacar los siguientes:

Tabla 8

Ventajas del aditivo Terrasil

ECONÓMICAS	OPERATIVAS	MEDIOAMBIENTALES
- Su tratamiento es económico. - Los espesores de diseño se reducen. - Se reduce los mantenimientos. - Su ciclo de vida se alarga. - Posibilita el uso de suelos marginales. - Se ahorra el material de las canteras.	- Su aplicación es fácil y rápida. - Es muy concentrado, poco material a transportar. - En la mayoría de países no cuenta con arancel aduanero.	- Sostenibilidad e impacto ecológico positivo. - No hay Lixiviación. - No se modifica su color.
TÉCNICAS		
- Permeabilidad, los suelos son resistentes al agua. - Resistencia a compresión simple, aumenta. - CBR, se incrementa. - Mejora la adherencia con betún y polímeros. - No hay absorción de agua. - Para todo tipo de suelos.	- Disminuye los efectos del hielo / deshielo. - Disminuye la expansividad del suelo. - Evita las reacciones químicas. - Previene los movimientos de finos. - La transpirabilidad se mantiene.	

2.2.4.1.2 Estabilización con Terrasil

Según Optimasoil Nanotechnology (2020), el proceso de estabilización con Terrasil debe seguir una secuencia ordenada de etapas para garantizar resultados óptimos, la cual se describe a continuación:

- 1. Estudio previo de laboratorio:** Antes de iniciar cualquier intervención en campo, es indispensable realizar una caracterización del suelo en laboratorio. Esta etapa comprende la determinación del contenido óptimo de humedad para la compactación del material, así como la evaluación de las dosificaciones mínimas del aditivo necesarias para alcanzar el nivel de mejoramiento requerido según las condiciones del proyecto.
- 2. Evaluación de la humedad in situ:** Una vez concluidos los ensayos de laboratorio, se procede a medir el contenido de humedad del suelo en su estado natural en campo. Esta medición

tiene como propósito estimar con precisión la cantidad de agua adicional que será necesaria para llevar el suelo a su humedad óptima de compactación.

3. **Escarificación del suelo:** El suelo debe ser escarificado o roturado hasta alcanzar la profundidad de tratamiento establecida en el diseño. Esta operación permite desagregar el material y prepararlo adecuadamente para recibir el aditivo de manera uniforme en toda la masa a tratar.
4. **Aplicación del producto:** El aditivo Terrasil se incorpora al suelo mediante su dilución previa en el agua destinada a la compactación. Una vez preparada la solución, se procede a distribuirla sobre el material escarificado en la dosificación determinada por los ensayos de laboratorio, asegurando una cobertura homogénea sobre toda el área de intervención.
5. **Mezclado del material:** Tras la aplicación del producto, se realiza un mezclado exhaustivo del suelo con la solución de Terrasil, con el fin de garantizar una distribución uniforme del aditivo en toda la masa del suelo tratado y asegurar la efectividad de la reacción química.
6. **Compactación:** Una vez homogeneizada la mezcla, se ejecuta el proceso de compactación del material mediante el equipo adecuado, con el objetivo de alcanzar la densidad requerida y

reducir los vacíos presentes en el suelo, optimizando así sus propiedades mecánicas.

- 7. Riego de sellado:** Como etapa final del proceso, se aplica un riego de sellado sobre la superficie compactada. Esta operación tiene por finalidad proteger la capa tratada, consolidar los efectos del aditivo y garantizar la durabilidad del tratamiento frente a las condiciones climáticas y de servicio a las que estará expuesta la vía.

Figura 5

Presentación del aditivo Terrasil



2.2.4.1.3 Características del aditivo químico seleccionado

Terrasil

El Estado peruano ha puesto en marcha un programa certificado de mejoramiento vial que contempla tanto la apertura de nuevas rutas como la rehabilitación de carreteras interestatales en todo el territorio nacional. En este

contexto, la incorporación de agentes estabilizadores en los proyectos viales ha adquirido carácter obligatorio, dado que contribuye de manera decisiva a prolongar la vida útil de las vías y a rentabilizar los recursos destinados a infraestructura. En este escenario, Terrasil emerge como una alternativa técnica de alto valor, puesto que se trata de un producto líquido de naturaleza proteica, completamente biodegradable e inocuo para el entorno natural, cuyas características inherentes potencian de forma notable los resultados obtenidos en el diseño y ejecución de obras viales.

La incorporación de Terrasil en el suelo desencadena un proceso de transformación química y física en los materiales que lo componen, alterando favorablemente sus propiedades geotécnicas. Gracias a esta acción, se incrementa la cohesión entre las partículas sólidas, dando lugar a una masa de suelo con mayor estabilidad, densidad y capacidad resistente. Una ventaja destacable es que los suelos estabilizados con este producto logran niveles elevados de compactación sin requerir una alta demanda de energía mecánica durante el proceso. El aumento de densidad resultante también refuerza los vínculos entre partículas, lo que se traduce en una mayor capacidad del suelo para resistir deformaciones, controlar el ascenso capilar de finos y minimizar la retención de agua en el interior de la estructura vial.

Terrasil es un aditivo estabilizador cuyo origen se encuentra en procesos de fermentación controlada, a partir de los cuales se obtiene un producto con propiedades bioquímicas de alta efectividad. Su versión más avanzada incorpora los resultados de una interacción metabólica microbiana compleja, en la que participan activamente compuestos enzimáticos especializados. Al entrar en

contacto con el suelo, las moléculas activas del producto se vinculan con las partículas sólidas presentes en él, mejorando sus condiciones geotécnicas hasta alcanzar su máximo potencial. Entre los efectos observados se encuentran la reducción de la porosidad, la disminución de la plasticidad, la expulsión del agua atrapada entre partículas y el favorecimiento de una compactación más uniforme y eficiente. Esta acción consolidante estabiliza estructuralmente el suelo y reduce de forma significativa su vulnerabilidad ante los daños y deformaciones típicos de los suelos en estado saturado. El comportamiento estructural de la carretera se ve favorecido por el efecto positivo sobre la densidad y la resistencia del suelo, que se aprecia a lo largo de toda la vida útil de la carretera. Además, Terrasil tiene un efecto acelerador, lo que significa que el material de la base de la carretera se endurece y se consolida más rápidamente. Esto da como resultado una subbase más densa, más estable y más compacta, cuya resistencia a la compresión mejora gradualmente a medida que la infraestructura viaria se va desgastando.

a) Características del aditivo Terrasil y áreas de aplicación

1. Características de Terrasil

El aditivo Terrasil presenta un conjunto de propiedades que lo distinguen como una solución técnica versátil y de fácil implementación en proyectos viales. Entre sus características más relevantes se destacan las siguientes:

- Rendimiento y simplicidad de aplicación: Ofrece resultados de alto desempeño mediante un procedimiento de

aplicación sencillo, lo que facilita su implementación en obra sin necesidad de procesos complejos.

- Compatibilidad con equipos convencionales: Su aplicación no requiere maquinaria especializada, ya que puede ejecutarse con el equipo de compactación y construcción vial de uso habitual en cualquier proyecto.
- Versatilidad en tipos de suelo: Es aplicable en una amplia variedad de suelos, incluyendo aquellos que presentan características mediocres o deficientes, lo que amplía considerablemente su campo de uso.
- Origen natural: El producto está elaborado a partir de componentes de origen completamente natural, sin incorporación de sustancias de síntesis artificial.
- Compatibilidad ambiental: Su composición es compatible con el entorno natural, minimizando cualquier impacto negativo sobre el ecosistema del área de intervención.
- Perfil ecológico: Terrasil es un producto no tóxico y completamente biodegradable, lo que garantiza su inocuidad tanto para el medio ambiente como para las personas que lo manipulan.
- Manejo seguro: Su uso no representa riesgos para la salud de los operarios ni para el entorno, permitiendo una manipulación segura durante todas las etapas del proceso.



- No inflamable: El producto no presenta riesgo de ignición, lo que facilita su almacenamiento y transporte bajo condiciones estándar de seguridad.
- Formulaciones específicas: Existen versiones del producto adaptadas a diferentes condiciones del suelo, incluyendo formulaciones para suelos en condiciones normales y formulaciones especiales para suelos con alto contenido de materia orgánica o estiércol.

2. Áreas de aplicación de Terrasil

El aditivo Terrasil encuentra aplicación en una amplia variedad de contextos dentro de la ingeniería civil y la gestión de infraestructuras. Entre los principales campos de uso se identifican los siguientes:

- Infraestructura vial: Su uso abarca la construcción y rehabilitación de carreteras principales, caminos secundarios, vías de servicio, calles urbanas y zonas destinadas al control de la erosión del suelo, entre otras aplicaciones relacionadas con la red vial.
- Preparación de subbase en vías de alta circulación: Se emplea en el tratamiento y acondicionamiento de la subbase previa a la construcción de avenidas principales, áreas de estacionamiento y pistas de aterrizaje, garantizando una plataforma estructuralmente estable.

- Espacios sensibles desde el punto de vista ambiental: Es aplicable en predios rurales, granjas, parques recreativos, senderos peatonales y otras áreas en las que resulta prioritario preservar el equilibrio ecológico del entorno.
- Protección de estructuras hidráulicas: Actúa como agente estabilizador en la protección contra roturas e inundaciones en presas, cauces naturales y canales de conducción de agua, reforzando la resistencia del suelo ante la acción erosiva del agua.
- Mantenimiento y reparación vial: Puede utilizarse como material complementario en trabajos de reparación de caminos deteriorados y en el sellado de baches, contribuyendo a restablecer las condiciones de transitabilidad de la vía.
- Impermeabilización de estructuras de contención: Se aplica como sellador en el fondo y las paredes de lagunas de tratamiento, depósitos de almacenamiento de agua y rellenos sanitarios, evitando la filtración de líquidos hacia el subsuelo y protegiendo los recursos hídricos subterráneos.

b) Ventajas del aditivo Terrasil

1) Rendimiento superior y facilidad de aplicación.

Terrasil permite la construcción de vías secundarias con un mínimo requerimiento de material de base, garantizando una vida útil

prolongada incluso bajo condiciones climáticas adversas y cambiantes. Su proceso de aplicación es de primera categoría y no demanda esfuerzos constructivos excesivos, lo que simplifica considerablemente su implementación en campo.

2) Reducción de costos de mantenimiento y operación vial.

Al disminuir la penetración del agua en las capas de fundación de la vía, Terrasil fortalece estructuralmente la carretera y reduce de manera significativa la aparición de patologías como ondulaciones, ahuellamiento y baches. Como consecuencia directa, se extiende la vida útil de la infraestructura y se reducen los costos asociados tanto al mantenimiento vial como al desgaste de los vehículos que circulan por ella.

3) Aprovechamiento de materiales de menor costo y calidad.

Una de las ventajas más destacadas de Terrasil es su capacidad para trabajar con los materiales granulares disponibles localmente, incluyendo finos no granulares de menor calidad que se encuentran habitualmente en los primeros 10 a 15 cm de profundidad del suelo. En los casos en que se requiera incorporar material nuevo, es posible emplear materiales más blandos con un contenido más elevado de finos, con pasante por la malla N°200 de entre 20% y 30%. La combinación de una alta proporción de finos no granulares con la acción del aditivo permite obtener una base vial extraordinariamente resistente y estable.

4) Incremento de la resistencia a la compresión.

Al añadir un ingrediente reforzante, Terrasil aumenta la resistencia del material de la base de la carretera. Gracias a su incorporación, la resistencia a la compresión de la base aumenta de forma gradual y constante a lo largo de la vida útil de la carretera, lo que la hace más densa, más firme y estructuralmente más estable.

5) Aumento de la capacidad de soporte del suelo (CBR).

La mayor durabilidad de las carreteras y su mayor resistencia a las cargas del tráfico son consecuencias directas de esta mejora en la capacidad portante.

6) Optimización del proceso de compactación.

Terrasil actúa como un agente lubricante entre las partículas del suelo, mejorando su trabajabilidad y facilitando el proceso de compactación. Gracias a esta propiedad, es posible alcanzar la densidad óptima requerida con un menor número de pasadas del equipo compactador, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para esta etapa constructiva.

7) Mayor densificación del suelo.

Al redistribuir las cargas electroquímicas hacia las partículas del suelo y desplazar el agua atrapada entre ellas, Terrasil reduce eficazmente los vacíos presentes en la masa del suelo. El resultado es una base vial más seca, compacta y densa, con menor

presencia de espacios vacíos que puedan comprometer su estabilidad estructural.

8) Reducción de la susceptibilidad al agua.

La mayor densidad y cohesión que adquiere el suelo tratado con Terrasil dificulta la infiltración y el movimiento del agua a través de los espacios entre partículas. Las capas de base construidas con este aditivo ofrecen una resistencia notable frente a la penetración de agua, protegiendo la estructura vial del debilitamiento y deterioro que generalmente ocasiona la presencia de humedad excesiva.

9) Adaptabilidad a condiciones climáticas extremas.

Terrasil responde de manera eficiente ante variaciones bruscas de temperatura y condiciones climáticas severas, incluyendo zonas de gran altitud y ambientes con ciclos frecuentes de congelamiento y deshielo. Esta capacidad de adaptación garantiza el desempeño del suelo estabilizado en una amplia diversidad de entornos geográficos y climáticos.

c) Especificaciones del aditivo Terrasil

Para obtener resultados óptimos en la estabilización con Terrasil, es indispensable que el suelo sea mezclado de manera completamente homogénea con la solución del aditivo, respetando las especificaciones de diseño establecidas para cada proyecto. Asimismo, la correcta aplicación de las



técnicas de incorporación del producto resulta determinante para asegurar el mejor rendimiento y comportamiento de la vía durante su vida útil.

1. Granulometría

Método de ensayo: ASTM E-11, D-422 o equivalente.

Terrasil actúa catalíticamente sobre las partículas finas de naturaleza plástica presentes en el suelo. Para que el producto funcione de manera eficiente, el material que pasa por el tamiz N°200 debe representar como mínimo el 15% del total del material de construcción. Adicionalmente, se requiere que el suelo contenga al menos un 6% de arcilla disponible de forma libre para garantizar la reacción adecuada del aditivo.

2. Plasticidad

Método de ensayo: ASTM D-4318 (Límites de Atterberg).

Las condiciones de plasticidad más favorables para el tratamiento con Terrasil corresponden a suelos cuyo límite líquido (LL) sea inferior al 30% y cuyo índice de plasticidad (IP) se encuentre comprendido entre el 5% y el 18%. Suelos dentro de este rango presentan una respuesta óptima al proceso de estabilización con el aditivo.

3. pH del suelo

Método de ensayo según las especificaciones del fabricante para cada lote.

El rango de pH más adecuado para la aplicación de Terrasil se sitúa entre 4.5 y 9.5. En suelos con valores de pH por debajo de este rango, se recomienda aplicar un pretratamiento con carbonato de calcio (cal) para elevar la acidez a niveles aceptables. Para suelos con pH elevado, puede recurrirse al tratamiento con sulfato de sodio, sulfato de magnesio o ácido muriático. El concentrado de Terrasil presenta un pH propio que oscila entre 3.2 y 5.1.

4. Humedad natural del suelo

El contenido de humedad natural del suelo constituye un parámetro de referencia fundamental para determinar las dosificaciones adecuadas del aditivo y establecer la cantidad de agua necesaria para alcanzar el nivel óptimo de humedad de compactación. Los ensayos de campo realizados en la zona de intervención también pueden emplearse para evaluar el comportamiento de la vía y ajustar las tasas de aplicación del producto según las condiciones reales del terreno.

5. Densidad máxima seca y contenido óptimo de humedad (COH)

Método de ensayo: Proctor Modificado ASTM D-1557.

Realizar pruebas con el producto en dosis de 0,15; 0,20; 0,25 y 0,30 ml/kg en muestras de suelo típicas puede ayudar a determinar la dosis óptima de Terrasil. Tanto la densidad seca máxima como el contenido óptimo de humedad del suelo tratado aumentan con la adición de Terrasil, lo que indica que el aditivo mejora las



propiedades de compactación. El nivel de humedad ideal se reduce a un valor comprendido entre el 1 % y el 2 %.

6. Relación de soporte de California (CBR)

Método de ensayo: ASTM D-1883.

Este ensayo mide la capacidad del suelo para soportar cargas y se utiliza para evaluar en qué medida los suelos tratados soportan mejor las cargas que los no tratados. En zonas secas, el ensayo CBR en condiciones secas es la representación más precisa de las condiciones reales sobre el terreno. Si el ensayo se va a realizar en un entorno húmedo, es necesario dejar que las muestras tratadas se curen por completo antes de sumergirlas en agua. Para evaluar con precisión la mejora real de la capacidad portante del suelo, se recomienda realizar ensayos de campo 14 semanas después de la aplicación del tratamiento.

7. Permeabilidad

Método de ensayo: ASTM D-5084.

La aplicación de Terrasil genera una reducción significativa en la permeabilidad del suelo tratado, lo que influye positivamente en el desempeño estructural y en la durabilidad de la vía. En comparación con suelos sin tratamiento, los suelos estabilizados con Terrasil presentan de manera consistente valores de permeabilidad notablemente menores, lo que limita el ingreso y desplazamiento del agua a través de la estructura vial. Los ensayos

de campo permiten obtener información valiosa sobre este comportamiento, siendo de gran utilidad para los ingenieros y responsables de la gestión vial al momento de evaluar los beneficios reales del tratamiento con Terrasil en cada proyecto específico.

d) Procesos de aplicación del aditivo Terrasil

El momento más apropiado para aprovechar al máximo las propiedades del aditivo Terrasil es durante las labores de mantenimiento y rehabilitación de carreteras que presentan deterioros como ondulaciones, baches y deformaciones superficiales. Para garantizar el mejor desempeño del producto, es fundamental contar con el equipo y la maquinaria adecuados, así como aplicar correctamente los procedimientos establecidos para su incorporación en el suelo.

1. Rendimiento. El rendimiento estándar del producto es de 1 litro de Terrasil por cada 33 m³ de material tratado. La proporción de dilución en agua varía entre 1:500 y 1:2000, dependiendo del tipo de suelo y de su contenido de humedad inicial:
 - Suelos secos: dilución 1:2000
 - Suelos húmedos: dilución 1:500
2. Equipos para la aplicación. La maquinaria requerida para la construcción y rehabilitación de carreteras con Terrasil es equivalente a la utilizada convencionalmente en trabajos de pavimentación vial, entre la que se destacan:

- Motoniveladora o escarificador (120 CV): Se utiliza para fragmentar y remover la superficie de la calzada existente. En caso de no estar disponible, puede sustituirse por un escarificador articulado de 2 metros de ancho.
- Camión cisterna: Con capacidad de entre 9,500 y 19,000 litros (2,500 a 5,000 galones), equipado con sistema de distribución de agua mediante tuberías, para aplicar la solución de Terrasil de manera uniforme sobre el material.
- Rodillo compactador de tambor liso: Entre las máquinas para compactar materiales tratados se incluyen los compactadores de tambor liso, que pueden pesar entre 8 y 12 toneladas métricas y tener una anchura de entre 1,5 y 2 metros. Durante las dos primeras pasadas, se debe hacer funcionar el rodillo en modo vibratorio. El uso de un compactador de pies de goma ofrece resultados mucho mejores en suelos con un alto contenido de humedad superficial. Para reducir la adherencia del material a los bordes, utilice un rodillo neumático de entre 10 y 15 toneladas métricas en suelos muy duros.

Para garantizar la correcta ejecución de los trabajos con Terrasil, se recomienda organizar el área de intervención en tramos de aproximadamente 100 metros. Esta distribución permite dosificar el producto con mayor precisión y controlar de manera más eficiente las condiciones de humedad del suelo antes de iniciar la aplicación. Previamente a la incorporación del aditivo, es indispensable verificar el estado de la vía y contar con la información técnica



necesaria para asegurar el cumplimiento de los requisitos del tratamiento. Las jornadas de aplicación demostrativa pueden completarse en un solo día, lo que representa una oportunidad valiosa de capacitación práctica, permitiendo a los involucrados observar directamente el proceso y comparar el comportamiento de las áreas tratadas con Terrasil frente a las secciones sin tratamiento.

Para poder evaluar los resultados y mejorar los procesos de cara a futuros proyectos, es esencial llevar un registro meticuloso de las condiciones del suelo antes, durante y después de cada jornada de aplicación. Terrasil funciona mejor en suelos que presentan una distribución completa y equilibrada de los tamaños de partícula, lo que significa que hay una distribución equitativa de materiales de todos los tamaños, desde los muy grandes capaces de soportar cargas de tráfico hasta los muy pequeños, que son muy plásticos. Por el contrario, materiales como la piedra triturada y la arena de playa no han dado buenos resultados cuando se utilizan solos; necesitan material fino y roca adicionales. Por lo tanto, antes de comenzar el tratamiento, es fundamental realizar un estudio exhaustivo del suelo para determinar qué materiales son adecuados para las circunstancias necesarias con el fin de obtener los mejores resultados deseados.

2.3. Marco conceptual

1. Suelo: Constituye el elemento físico fundamental sobre el que se desarrollan los proyectos de ingeniería vial, obras civiles y construcciones arquitectónicas. Sus condiciones de comportamiento quedan determinadas por un conjunto de parámetros de identificación, estado y resistencia geomecánica (Braja, 2001).



2. Carretera: Infraestructura destinada al transporte terrestre que se extiende a lo largo de una franja de terreno denominada derecho de vía. Su función principal es posibilitar la circulación fluida, continua y segura de los vehículos, brindando condiciones adecuadas de comodidad y seguridad a los usuarios (MTC, 2014).
3. Afirmado: Capa de material granular, ya sea natural o procesado, con una gradación definida, que se compacta y se coloca de una manera específica para resistir y distribuir las cargas y tensiones provocadas por el tráfico rodado (Glosario de términos comunes en proyectos de infraestructura viaria, 2018).
4. Calicata: Excavación manual o mecánica ejecutada sobre la plataforma de la vía, que permite acceder al perfil estratigráfico del suelo para evaluar in situ sus características físicas, mecánicas y de clasificación.
5. Carretera afirmada: Según el Glosario de términos comunes en proyectos de infraestructura viaria (2018), una carretera con base de material clasificado se define como una carretera cuya superficie de rodadura está formada por material clasificado, en lugar de por una capa de pavimento.
6. CBR (California Bearing Ratio): El Índice de Resistencia de California (CBR) es un método desarrollado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones en 2016 para evaluar la capacidad de carga potencial de diversos materiales de pavimentación, como

los materiales reciclados destinados a su uso en carreteras y aeródromos, así como la subbase, la base y la capa de base de un pavimento.

7. Subrasante: Superficie resultante de las operaciones de movimiento de tierras, ya sea por corte o por relleno, sobre la cual se asienta y apoya la estructura del pavimento o el afirmado de una carretera (Glosario de Términos Frecuentes en Proyectos de Infraestructura Vial, 2018).
8. Estabilización: Proceso mediante el cual se busca mejorar el comportamiento mecánico del suelo, reduciendo su sensibilidad ante la acción del agua y las cargas del tránsito. Su objetivo es lograr una mejora sostenida y duradera de la resistencia del suelo a lo largo de toda su vida útil, garantizando condiciones estables de soporte en todo momento.
9. Estabilización mecánica: Técnica de mejoramiento del suelo que consiste en aplicar una acción mecánica controlada sobre una masa de suelo que no ha alcanzado su máximo nivel de densificación. Para ello se emplean equipos compactadores que, mediante la aplicación de energía mecánica, reducen los vacíos del suelo e incrementan su capacidad de soporte.
10. Estabilización por drenaje: Método que comprende la implementación de sistemas de drenaje superficial y subterráneo, como canales de desvío y tuberías de captación, con el fin de

recolectar y evacuar eficientemente el agua de la zona de trabajo.

Su finalidad es eliminar o minimizar los efectos negativos de la humedad sobre la resistencia, estabilidad y durabilidad de la infraestructura vial.

11. Estabilización química: Técnica que consiste en la incorporación de agentes químicos estabilizadores, como cal, cemento Portland u otros productos similares, en la masa del suelo. Mediante las reacciones químicas que se producen entre el suelo y el estabilizador, se modifican las propiedades del material, mejorando su comportamiento ante las cargas y solicitaciones a las que será sometido.

12. Humedad del suelo: Propiedad del suelo que expresa la cantidad de agua contenida en su masa. El agua presente en el suelo puede encontrarse en forma libre o capilar, y su movimiento tiende a desplazarse desde las zonas de mayor contenido hacia las de menor contenido de humedad, generalmente en dirección vertical ascendente, aunque puede producirse en cualquier dirección dependiendo de las condiciones del terreno.

13. Asentamiento en el terreno de fundación: Fenómeno que se produce cuando un suelo blando y compresible experimenta deformaciones verticales como consecuencia de las cargas adicionales impuestas por terraplenes u otras estructuras construidas sobre él, representando uno de los problemas geotécnicos más relevantes en la construcción vial.

14. Mejoramiento del terreno de fundación: Intervención técnica necesaria cuando el suelo de cimentación no presenta condiciones suficientes de resistencia ni de compresibilidad para soportar de manera adecuada las cargas de la infraestructura vial. Las técnicas de mejoramiento disponibles son diversas, aunque su aplicación suele estar condicionada por factores económicos y espaciales que limitan su uso generalizado.
15. Sistema de clasificación AASHTO: En el sistema de clasificación de la AASHTO, los suelos se clasifican en ocho categorías según su comportamiento geotécnico. Estos grupos se identifican con las designaciones A-1 a A-8. Existen unos doce subgrupos entre las siete clases de suelos inorgánicos (A-1 a A-7). Los suelos ricos en materia orgánica son los únicos que se incluyen en el grupo A-8.
16. Compactación del suelo: El aumento mecánico de la compresibilidad, la deformación y la resistencia del suelo se conoce como compactación del suelo. La reducción del volumen de poros de aire en la masa del suelo implica un menor riesgo de variaciones volumétricas perjudiciales durante la vida útil del suelo. Cabe recordar que parte del agua intersticial queda retenida en el suelo compactado, ya que no se eliminó por completo durante la compactación.



CAPÍTULO III

MÉTODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El presente estudio se clasifica como una investigación de tipo aplicada, dado que parte de fundamentos teóricos consolidados para anticipar y analizar elementos concretos de una variable en la realidad (Vargas, 2009). Este tipo de investigación se distingue por su capacidad para abordar problemas específicos de manera directa y con posibilidad de aplicación inmediata de sus resultados (Fidias, 2012). En este marco, se empleará el conocimiento derivado de teorías relacionadas con los procesos de estabilización de suelos, con el propósito de establecer un referente práctico que permita alcanzar resultados concretos en el mejoramiento de la subrasante, orientados hacia objetivos de ingeniería vial. Para potenciar las propiedades mecánicas del suelo en estudio, se incorporará el aditivo Terrasil como agente estabilizador.

3.2. Nivel de investigación

Según Condori (2020), el nivel de investigación hace referencia al grado de profundidad y comprensión que el investigador alcanza respecto al problema, hecho o fenómeno que constituye el objeto de estudio. En función de ello, se optó por un nivel explicativo, dado que este permite trabajar con hipótesis de causalidad, es decir, posibilita el análisis de las razones subyacentes detrás de los fenómenos y procesos estudiados, orientándose principalmente hacia la verificación y confirmación de dichas hipótesis (Esteban, 2018). La aplicación de este nivel permitirá implementar estrategias metodológicas apropiadas para explicar los factores y efectos que producirá la incorporación del aditivo Terrasil sobre las propiedades de la subrasante.

3.3. Diseño de investigación

El presente estudio adopta un diseño de naturaleza experimental, entendido como el conjunto de estrategias y procedimientos de investigación orientados a analizar el impacto de una intervención determinada y examinar los cambios que esta puede generar en las variables de estudio (Manterola et al., 2019). En este tipo de diseño, los grupos de estudio no se conforman mediante selección aleatoria, sino que se encuentran previamente constituidos antes del inicio del proceso experimental (Hernández, 2014). El propósito central de la investigación es determinar los efectos que ejercen las variables independientes sobre la subrasante durante el proceso de estabilización, evaluando los cambios producidos en sus propiedades geotécnicas.

3.4. Enfoque de la investigación

Se adoptó un enfoque cuantitativo para el desarrollo de esta investigación, considerando que este paradigma se sustenta en el uso de muestras representativas y datos numéricos extraídos de la realidad, los cuales son procesados y analizados mediante procedimientos estadísticos con el fin de contrastar las hipótesis formuladas (Del Canto y Silva, 2013). El objetivo del estudio es obtener resultados precisos y medibles (Rojas, 2011) que permitan cuantificar las variaciones en las propiedades del suelo a medida que avanza el proceso de estabilización con el aditivo Terrasil. El enfoque central está orientado a generar información cuantitativa confiable que facilite la evaluación del impacto de las variables independientes sobre la resistencia, capacidad de carga y estabilidad de la subrasante intervenida.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población objeto de estudio en la presente investigación está constituida por los suelos plásticos que conforman la subrasante de la Av. Los Virreyes de la ciudad de Juliaca, los cuales presentan características geotécnicas desfavorables que justifican la aplicación de un proceso de estabilización.

3.5.2. Muestra

La obtención de la muestra se realizará mediante la ejecución de prospecciones de campo a través de calicatas. Para efectos de la presente investigación, se ejecutará una calicata en la Av. Los Virreyes de la ciudad de



Juliaca, con una profundidad mínima de 1.20 m por debajo del nivel de la subrasante proyectada. Del material extraído se obtendrán las muestras de suelo necesarias para la realización de los ensayos de laboratorio correspondientes, a las cuales se les incorporará el aditivo Terrasil en proporciones de 0%, 1% y 2%, con el fin de evaluar comparativamente el efecto de cada dosificación sobre las propiedades geotécnicas del suelo.

3.6. Métodos e instrumentos recolección de datos

3.6.1. Técnica

La recolección de datos se llevó a cabo aplicando los métodos fundamentales disponibles para este propósito. En primer lugar, se realizó una observación preliminar del área de estudio con el objetivo de validar las condiciones para la ejecución de los ensayos, así como para examinar y evaluar las características iniciales del suelo. Posteriormente, los resultados obtenidos en cada ensayo fueron registrados sistemáticamente en formatos tabulares, manteniendo una secuencia ordenada y coherente con los datos generados durante el proceso experimental.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos empleados para el registro de la información provienen de dos fuentes complementarias: por un lado, el laboratorio de suelos proporcionó los formatos estandarizados establecidos para cada tipo de ensayo; por otro lado, el investigador diseñó formatos adicionales adaptados a las necesidades específicas del estudio, con el propósito de garantizar el registro completo y ordenado de todos los datos requeridos para alcanzar los objetivos

planteados. A continuación, se presenta el listado de los formatos utilizados durante el desarrollo de la investigación.

Tabla 9

Técnicas e instrumentos de evaluación geotécnica utilizados en el estudio

Formato	Clasificación
Contenido de humedad (MTC E 108 - ASTM D2216)	Suelos Método SUCS (ASTM D2487)
Evaluación granulométrica por tamizado (MTC E107 - ASTM D422)	Suelos Método AASHTO (ASTM D3282)
Límite líquido (MTC E 110 - ASTM D4318)	
Límite plástico (MTC E110 - AST D4318)	
Índice de plasticidad (MTC E 111 - ASTM D4318)	
Proctor Modificado (MTC E 115 - ASTM D1557)	
CBR (MTC E132 - ASTM D1883)	

3.7. Procedimiento

Existe un procedimiento adecuado de tres pasos para llevar a cabo este tipo de estudio. Este proceso incluye el trabajo de campo, los ensayos de laboratorio y las tareas administrativas relacionadas con el análisis de datos.

3.8. Trabajos previos

3.8.1. Trabajos de campo

Se hizo calicatas de 1.20m de profundidad. Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada en el ancho de la subrasante.

Figura 6*Ubicación del proyecto*

La Avenida Los Virreyes se ubica en la ciudad de Juliaca, provincia de San Román, departamento de Puno, Perú, código postal 21102. Se ubica en la zona urbana de la ciudad, facilitando el tránsito hacia diversas áreas residenciales y comerciales en la zona oeste de Juliaca

Ubicación: Avenida Los Virreyes, Juliaca

Coordenadas (referencia ciudad):

- Latitud: S 15° 29' 27''
- Longitud: O 70° 07' 37''

Zona: Área urbana

3.8.2. Trabajos de laboratorio

A. Determinación del contenido de humedad

El procedimiento para la determinación del contenido de humedad de la muestra patrón se ejecutó siguiendo estrictamente los lineamientos establecidos en la norma MTC E 108. Con el fin de preservar las condiciones naturales del

material y evitar alteraciones en los resultados, el ensayo fue llevado a cabo inmediatamente después de obtenida la muestra en campo, tal como lo especifica el Manual de Ensayo de Materiales en su Sección N°1: Suelos.

El principio del ensayo consiste en cuantificar la cantidad de agua presente en el suelo mediante la eliminación de la humedad a través de un proceso de secado en horno a una temperatura controlada de 110 ± 5 °C, manteniéndose el material en estas condiciones hasta alcanzar un peso constante que indique la ausencia de humedad evaporable. Una vez concluido el secado, el peso del suelo remanente corresponde exclusivamente a la fracción de partículas sólidas. La diferencia entre el peso inicial de la muestra húmeda y el peso final del material seco representa la cantidad de agua que contenía el suelo, valor a partir del cual se calcula el contenido de humedad expresado como porcentaje respecto al peso seco del material.

Figura 7

Secado de la muestra en el horno



B. Ensayo de análisis granulométrico

El análisis granulométrico manual fue ejecutado únicamente sobre la muestra patrón, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma MTC E

107. Este ensayo resultó indispensable para llevar a cabo la clasificación del suelo y para determinar de manera cuantitativa la distribución de los distintos tamaños de partículas que conforman el material en estudio.

Procedimiento

- Como paso inicial, la muestra puede someterse a un secado natural bajo condiciones ambientales o, alternativamente, introducirse en un horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta lograr un peso estable y constante.
- A continuación, se procede al cuarteo de la muestra total para obtener una porción representativa del material. Dicha porción es sometida a remojo previo y posteriormente lavada sobre el tamiz N°200 con abundante agua, con el fin de eliminar las partículas finas adheridas a los granos más gruesos.
- La muestra lavada es nuevamente introducida en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar peso constante. Tras el secado, se deja enfriar a temperatura ambiente hasta que el material alcance una temperatura inferior a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, momento en el que puede ser manipulada con seguridad y pesada con precisión.
- Se seleccionan los tamices apropiados según las especificaciones del material a ensayar y se ordenan de manera decreciente conforme a la abertura de malla, desde la de mayor a la de menor tamaño.

- Se realiza el tamizado manual de la fracción gruesa del suelo, empleando tamices desde la malla de 3/4" hasta la malla N°4, durante el tiempo necesario para garantizar una separación completa de las partículas. El material retenido en cada tamiz es pesado con una precisión de 0.1 g.
- Para el tamizado de la fracción fina, es decir el material pasante por el tamiz N°4, se arma un juego de tamices dispuestos en orden descendente desde el tamiz N°10 hasta el tamiz N°200. Se coloca la tapa y el fondo correspondientes y se procede al tamizado mecánico del material. Una vez finalizado el proceso, se retiran los tamices y se pesan las partículas retenidas en cada uno de ellos.
- Finalmente, todas las masas retenidas en cada tamiz son registradas con una precisión de 0.1 g, y los datos obtenidos son procesados y expresados con una precisión de 0.1%, permitiendo así construir la curva granulométrica del suelo en estudio.

Figura 8

Tamizado manual de la muestra



C. Límites de Atterberg

Límite líquido

El ensayo de límite líquido se realizó de acuerdo a la norma MTC E 110 del manual ensayo de materiales. Objetivo Con la muestra inicial sin adición determinar la humedad del suelo que se encuentra al cerrar la ranura en 25 golpes. Para la muestra con adición de aceite agregar los porcentajes de aceite residual de motor diésel, mezclar y determinar la humedad del suelo que se encuentra al cerrar la ranura en 25 golpes siguiendo el mismo procedimiento.

Procedimiento

- De la muestra secada para el análisis granulométrico se tomó una parte, se desmenuzo con el martillo de goma y paso por el tamiz número 40, tomando una cantidad que este en el rango de 150 gr a 200 gr.
- Para el análisis de cada adición de aceite residual y realización de las 3 repeticiones, se pesó 800 gr de suelo pasante el tamiz N° 40. Luego en un recipiente impermeable se colocó el suelo.
- En un recipiente con una espátula se mezcló el suelo con el agua desmineralizada y se preparó hasta obtener una pasta homogénea y uniforme.
- Luego se colocó el material preparado en la copa de Casagrande, esparciéndola y generando una pequeña presión para que el material quedara de forma horizontal y sin burbujas de aire.

- Con el acanalador se realizó a lo largo de la pasta colocada en la copa, una ranura que separo en dos partes iguales el material.
- Con la manivela del equipo girando se dejó caer la copa, la cantidad de veces necesarias para cerrar la ranura.
- Agregando agua al material se encontraba el número de golpes necesarios con la que debía cerrar la ranura dentro de los rangos establecidos en la norma.
- Se tomaba una pequeña porción de material de la parte donde cerraba la ranura, para luego determinar el contenido de humedad.

Figura 9

Preparación y colocación de la muestra de suelo en el aparato de Casagrande



D. Determinación del límite plástico (LP) de los suelos e índice de plasticidad (IP)

El ensayo de límite plástico e índice de plasticidad se realizó de acuerdo a la norma MTC E 111 del manual ensayo de materiales. Objetivo Determinar la

humedad del suelo, que se encuentra formando barritas cilíndricas en una superficie lisa, se agrietan al llegar a un diámetro de 3.2 mm. Calcular el índice de plasticidad, realizando la diferencia del límite líquido y límite de plasticidad.

Procedimiento

- Como etapa inicial, se verificó la disponibilidad y correcta disposición de todos los equipos, herramientas e instrumentos necesarios para la ejecución del ensayo. Del material previamente preparado para la determinación del límite líquido, se tomaron 18 gramos correspondientes al material que cerró la ranura dentro del rango establecido de 30 a 35 golpes.
- Con la porción de material seleccionada, se procedió a formar manualmente una esfera mediante movimientos giratorios con las palmas de las manos. A partir de dicha esfera se extrajeron pequeñas porciones individuales de entre 1.5 y 2 gramos cada una, las cuales constituyeron las muestras para el proceso de rolado.
- Cada porción de suelo fue sometida al proceso de rolado sobre una superficie de vidrio esmerilado, empleando los dedos de la mano con movimientos de vaivén a una velocidad controlada de 80 a 90 ciclos por minuto. El rolado se continuó hasta obtener cilindros de suelo con un diámetro de 3.2 mm (1/8 de pulgada), momento en el que el material debía fracturarse en pequeños segmentos. Este proceso no debía exceder los 2 minutos por cada porción

ensayada, en cumplimiento con los criterios establecidos por la norma.

- Una vez que el cilindro de suelo alcanzó el diámetro requerido de 3.2 mm y comenzó a fragmentarse en porciones pequeñas, los pedazos obtenidos fueron recolectados y distribuidos en dos taras con un peso mínimo de 6 gramos cada una. Las taras con el material fueron introducidas en el horno y secadas a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar peso constante, para la posterior determinación del contenido de humedad correspondiente al límite plástico del suelo.

Figura 10

Formación de rollitos cilíndricos para la determinación del límite plástico



E. Proctor modificado

Uno de los procesos más importantes para estudiar y controlar la calidad de la compactación del suelo se describe en la norma MTC E-115, que se ha seguido para realizar este ensayo. Con una energía de compactación constante y especificada, este ensayo permite establecer la relación entre la densidad

máxima en seco y el contenido de humedad del suelo. A partir de estos resultados, podemos determinar el contenido de humedad ideal para la compactación de la subbase y verificar que las características estructurales de la carretera sean adecuadas.

Objetivo: Para la muestra en su estado natural, sin incorporación de aditivo, el ensayo tiene como finalidad determinar el contenido óptimo de humedad con el cual el suelo logra su máxima densidad seca. En el caso de las muestras a las que se incorpora el aditivo Terrasil, se procede a añadir los porcentajes establecidos del producto, mezclando de manera homogénea el suelo con el aditivo, para posteriormente determinar el contenido óptimo de humedad con el que la mezcla alcanza su máxima densidad seca. Este procedimiento se ejecuta siguiendo la misma metodología aplicada a la muestra patrón, lo que permite realizar una comparación directa entre los resultados obtenidos en ambas condiciones de ensayo.

Procedimiento

- Selección del método (A, B ó C), se tomó una porción representativa de muestra y mediante el análisis por tamizado de las mallas de interés se establecieron los porcentajes pasantes y retenidos, quedando como selección el método A, que consiste en pasar el material para el ensayo por el tamiz N°4.
- Se secó la muestra extraída de campo, utilizando un aparato de secado de tal modo que la temperatura no exceda en 60 °C.



- Del material seco, se realizó el desmoronamiento de los terrones, de tal forma que el material quedo totalmente suelto para posteriormente pasarlo por el tamiz N° 4.
- Para el análisis de cada adición de aceite residual y realización de las 4 repeticiones, se pesó 40 kg de suelo pasante el tamiz N° 4. Se calculó la cantidad de aceite, multiplicando el porcentaje de adición y los 40 kg de suelo, obteniendo en peso la cantidad de aceite a adicionar. Luego en un recipiente impermeable se colocó el suelo y de manera manual con ayuda de una botella plástica acondiciona con 2 huecos en la tapa y una espátula, se colocó el aceite de manera uniforme y con ayuda de la espátula se realizó la mezcla respectiva.
- Se pesó 2400 gr de material y se agregó un porcentaje de humedad.
- Se mezcló el material uniformemente con la cantidad de humedad agregada. - Se preparó los equipos y herramientas a utilizar
- Se realizó el peso del molde.
- Se compactó el suelo en 5 capas, utilizando un molde de 101.6 mm de diámetro y una energía de compactación de 44.5 N que cae una altura de 18 pulgadas. Se compacto cada capa con 25 golpes.
- Luego de compactado las 5 capas, se quitó el collarín y se enraso con un cuchillo todo el suelo adyacente a la parte superior del molde. 48

- Se pesó el suelo compactado más molde.
- Del material compactado en el molde se toma una porción y se determina la humedad.
- Todo este procedimiento se realizó en un mínimo de 4 repeticiones agregando diferentes contenidos de humedad.

Figura 11

*Proceso de compactación de la muestra de suelo mediante el ensayo Proctor
Modificado*



F. CBR de suelos (laboratorio)

Con el fin de medir la resistencia mecánica de los suelos en condiciones controladas de contenido de humedad y densidad, se llevó a cabo el ensayo de índice de resistencia de California (CBR) siguiendo los protocolos descritos en la norma MTC E 132. Los resultados del ensayo permiten determinar la capacidad portante del suelo de la subbase, un elemento crucial en el diseño estructural del pavimento.



El ensayo CBR tiene como finalidad establecer la capacidad de soporte del suelo, expresada mediante un índice de resistencia, aplicado sobre la primera muestra en su estado natural sin ningún tipo de tratamiento previo. Para su ejecución, se toman como referencia los parámetros de humedad y densidad previamente obtenidos a través del ensayo Proctor modificado. El índice de resistencia se obtiene a partir de la preparación de la muestra de suelo, incorporando proporciones variables de aceite de motor diésel usado, manteniendo las condiciones de humedad y densidad determinadas en el ensayo de compactación mencionado.

Procedimiento

- Como primera etapa, se verificó la correcta disposición de todos los equipos y herramientas requeridos para la ejecución del ensayo, procediendo posteriormente al pesaje individual de cada uno de los moldes a utilizar durante el proceso.
- Se cuantificó la totalidad del suelo necesario para cada dosificación de aditivo. La cantidad de Terrasil a incorporar en cada mezcla se obtuvo multiplicando el porcentaje de adición establecido por el peso total del suelo requerido, garantizando así una dosificación precisa y controlada.
- Se pesaron porciones de 5,000 gramos de suelo seco, a las cuales se incorporó el contenido de humedad determinado previamente mediante el ensayo Proctor Modificado. Una vez añadida el agua,



se procedió al mezclado uniforme del material hasta obtener una mezcla homogénea lista para la compactación.

- Se ensamblaron los moldes cilíndricos con todos sus componentes, incluyendo las placas de base, los collares de extensión, los discos espaciadores y el papel filtro, verificando el correcto ajuste de cada elemento antes de iniciar la compactación.
- La compactación del material se realizó en cinco capas iguales para cada uno de los tres moldes de CBR, aplicando energías de compactación diferenciadas: el primer molde recibió 12 golpes por capa, el segundo 25 golpes por capa y el tercero 55 golpes por capa. Una vez compactado cada molde, se procedió al enrasado de la superficie y al registro del peso correspondiente.
- Tras completar el pesaje de los moldes con el material compactado, se colocaron las sobrecargas sobre cada espécimen y se instaló el trípode con su deformímetro respectivo, asegurando que el instrumento quedara correctamente posicionado para registrar las deformaciones.
- Los moldes fueron sumergidos en agua y se ajustaron los deformímetros para garantizar una medición precisa del hinchamiento. Las lecturas de expansión fueron registradas a intervalos regulares de 24 horas a lo largo de todo el período de inmersión.

- Los moldes se sacaron del agua y, tras 96 horas de inmersión, se retiraron los pesos, el trípode y el deformómetro. Pesamos cada molde con el material saturado en su interior tras dejar que las probetas se escurrieran durante 15 minutos. Una vez equipados los moldes con anillos de carga, las muestras se enviaron a la prensa hidráulica de compresión para someterlas al ensayo de penetración. A lo largo del ensayo, medimos meticulosamente la carga y la penetración, manteniendo constante la velocidad de la prensa a 0,05 pulgadas por minuto.
- Para garantizar un examen exhaustivo de los resultados, se tomaron muestras representativas de cada muestra una vez finalizado el ensayo de penetración. Esto nos permitió calcular el contenido de humedad final de las muestras en condiciones de saturación.

Figura 12

Determinación de la resistencia del suelo mediante el ensayo de CBR





CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Análisis de la información

4.1.1. Resultados de los ensayos

a) Contenido de humedad

Tabla 10

Análisis de las pruebas de Contenido de humedad normal

N° de pruebas	Contenido de humedad (W%)	MTC E – 108 COA (W%)
Muestra N° 1	18.44	6.47
Muestra N° 2	17.14	6.47
Muestra N° 3	17.86	6.47
Promedio	17.81	6.47

b) Análisis granulométrico**Tabla 11***Análisis granulométrico del suelo natural*

N° de pruebas	Granulometría			Cu	MTC E – 107 EG - 2013 Cu
	Grava	Arena	Finos		
	(%)	(%)	(%)		
Muestra N° 1	4.41	92.35	3.24	0.92	1 - 3
Muestra N° 2	5.38	89.97	4.65	0.92	1 - 3
Muestra N° 3	4.57	88.74	6.68	0.75	1 - 3
Promedio	4.79	90.35	4.86	0.86	1 - 3

c) Determinación de límite líquido, límite plástico e índice plástico**Tabla 12***Características plásticas del suelo natural*

N° de pruebas	Límites de consistencia			MTC E – 110 EG - 2013 IP (W%)
	LL (W%)	LP (W%)	IP (W%)	
Muestra N° 1	34.26	18.23	16.03	< 10.00
Muestra N° 2	35.12	17.89	17.27	< 10.00
Muestra N° 3	28.14	11.85	16.29	< 10.00
Promedio	32.51	15.99	16.52	< 10.00

d) Clasificación de suelos (SUCS Y AASHTO)

En cuanto a las referencias normativas aplicadas, se empleó la norma ASTM D 2487-93, correspondiente al Sistema Unificado de Clasificación de

Suelos (SUCS), contenida en el Manual de Ensayo de Materiales, Sección N° 1:
Suelos.

Con los resultados obtenidos en laboratorio para el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP), se procedió a realizar la clasificación del suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande. Para ello, se localizó el punto de cruce entre los valores de LL e IP dentro del diagrama, cuyo resultado se puede apreciar en la Tabla N° 13.

Tabla 13

Características del suelo natural

N de muestras	Clasificación		MTC E – 145
	SUCS	AASHTO	EG - 2013 AASHTO
Muestra N°1	CL	A - 3	A - 3
Muestra N°2	CL	A - 4	A - 3
Muestra N°3	CL	A - 4	A - 3
Promedio	CL	A - 4	A - 3

e) Prueba Proctor

Tabla 14

Parámetros de compactación obtenidos en las muestras de suelo de la subrasante

N° de muestras	Compactación		MTC E – 115
	MDS (gr/cm ³)	COA (W%)	EG - 2013 MDS (gr/cm ³)
Muestra N° 1	1.429	7.09	>1.6



Muestra N° 2	1.423	6.52	>1.6
Muestra N° 3	1.451	6.77	>1.6
Promedio	1.434	6.79	>1.6

f) Ensayo de CBR

Según lo establecido en la norma MTC E 132-2000, el método AASHTO T-193 y los fundamentos experimentales de Bowles.

Tabla 15

Determinación del índice CBR al 95% y 100% de compactación en la subrasante

N° de muestras	Compactación		MTC E – 115 EG - 2013 AI 100%
	AI 95%	AI 100%	
Muestra N° 1	12.11	17.78	>20.00
Muestra N° 2	11.91	16.55	>20.00
Muestra N° 3	13.84	19.20	>20.00
Promedio	12.62	17.84	>20.00

Tabla 16

Comparación entre los resultados de laboratorio y los criterios normativos del MTC EG-2013 para suelos de subrasante

Ensayos de laboratorio	Suelo de subrasante	MTC E EG - 2013
Contenido de humedad	17.81	6.47
Análisis granulométrico	0.86	1 – 3
Límites de consistencia	16.52	<10.00
Clasificación de suelos	A – 4	A – 3
Densidad Seca máxima por compactado	1.434	>1.6
Relación soporte California (CBR)	17.84	>20.00

Interpretación de resultados

a) Contenido de humedad normal

- Los resultados obtenidos fueron evaluados tomando como referencia los parámetros establecidos en el Manual EG-2013.
- El contenido de humedad natural promedio registrado en los suelos del área de cimentación asciende a 17.81%, valor determinado a partir de los ensayos realizados en campo y laboratorio.
- El contenido óptimo de humedad obtenido mediante el ensayo Proctor Modificado fue de 6.47%.

- La comparación entre ambos valores evidencia que el contenido de humedad natural del suelo es considerablemente elevado y no satisface los requisitos mínimos establecidos por la normativa vigente.

b) Granulometría

- Los resultados granulométricos fueron contrastados con los criterios del Manual EG-2013, el cual establece valores admisibles para el coeficiente de curvatura (C_c) comprendidos entre 1 y 3.
- La distribución granulométrica promedio del suelo estudiado presenta la siguiente composición: grava 4.18%, arena 90.99% y finos 4.83%.
- El valor promedio del coeficiente de curvatura (C_c) determinado para los suelos del área de fundación fue de 0.67.
- Dado que el valor obtenido del coeficiente de curvatura (C_c) se encuentra fuera del rango admisible establecido por la normativa, se concluye que el suelo no cumple con los requisitos granulométricos requeridos.

c) Límites de resistencia



- Los valores obtenidos fueron evaluados conforme a los criterios del Manual EG-2013, el cual exige un índice de plasticidad (IP) inferior al 10% para considerar el suelo apto.
- El índice de plasticidad (IP) promedio determinado para los suelos del área de estudio fue de 16.52%.
- Al ser el valor del índice de plasticidad (IP) superior al límite máximo permitido del 10%, se concluye que el suelo de la subrasante no reúne las condiciones adecuadas para su uso sin tratamiento previo.

d) Clasificación de suelos

- La clasificación obtenida fue evaluada en función de los criterios del Manual EG-2013, el cual establece como referencia la clasificación AASHTO A-3 para suelos adecuados en subrasante.
- El resultado promedio de la clasificación AASHTO de los suelos analizados corresponde al grupo A-4.
- La clasificación obtenida de A-4 según el sistema AASHTO indica que el suelo no cumple con los requisitos mínimos establecidos para su empleo directo como material de subrasante.

e) Densidad seca máxima por compactación

- Los valores obtenidos fueron contrastados con las especificaciones del Manual EG-2013, el cual establece como valor mínimo aceptable una densidad seca máxima de 1.6 g/cm^3 .
- La densidad seca máxima promedio determinada mediante el ensayo Proctor Modificado fue de 1.434 g/cm^3 .
- Al ser el valor obtenido inferior al mínimo exigido por la normativa, se concluye que la densidad seca máxima del suelo en estudio no satisface los requerimientos técnicos establecidos para la subrasante.

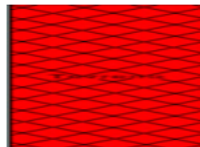
f) Relación soporte california (CBR)

- Los resultados fueron evaluados considerando los criterios del Manual EG-2013, el cual establece un valor mínimo de CBR del 20% para suelos de subrasante en condiciones adecuadas de servicio.
- El valor promedio de CBR obtenido para los suelos de la subrasante fue de 17.84%.
- Al encontrarse el valor de CBR por debajo del umbral mínimo exigido, se determina que los suelos de la subrasante presentan una capacidad de soporte insuficiente, lo que justifica la necesidad de implementar un proceso de estabilización para mejorar sus propiedades mecánicas.

4.1.2. Caracterización estratigráfica de los suelos plásticos presentes en la subrasante

Tabla 17

Perfil estratigráfico y clasificación geotécnica de los suelos de la subrasante

Ubicación	Profundidad	Clasificación	Descripción	Símbolo
Calicata	0.30	CH (A – 4)	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad	
	0.60	CL (A – 4)	Arcilla orgánica de media compresibilidad	

- **Compresibilidad:** Ambos niveles son arcillosos. Esto significa que el suelo puede asentarse (hundirse) significativamente bajo el peso de una estructura si no se trata adecuadamente.
- **Sensibilidad al Agua:** Las arcillas tipo CH son conocidas por expandirse cuando se mojan y contraerse cuando se seca, lo que puede causar grietas en pavimentos o cimentaciones.
- **Calificación Global (A-4):** Según la norma AASHTO, un suelo A-4 se considera de calidad "Pobre a Regular" para ser usado como subrasante de carreteras. Generalmente requiere de un proceso de estabilización (con cal o cemento) o ser reemplazado por material granular de mejor calidad.

4.1.3. Estabilización de suelos plásticos de la subrasante mediante la incorporación del aditivo Terrasil

Con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos plásticos que conforman la subrasante, se aplicaron procesos de estabilización considerando las siguientes etapas y proporciones de incorporación del aditivo:

- Verificación y cumplimiento de las especificaciones técnicas del aditivo Terrasil.
- Evaluación del mejoramiento de las propiedades mecánicas con la incorporación del 1% de Terrasil respecto al peso seco del suelo.
- Evaluación del mejoramiento de las propiedades mecánicas con la incorporación del 2% de Terrasil respecto al peso seco del suelo.

4.1.3.1. Mejoramiento de características automático de los suelos plásticos de la subrasante, con empleo del 1 % del aditivo Terrasil

Para evaluar el efecto de la incorporación del 1% de Terrasil sobre las propiedades mecánicas del suelo, se ejecutaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Determinación de los límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad).
- Determinación de la densidad seca máxima mediante el ensayo de compactación Proctor Modificado.
- Determinación de la Relación de Soporte California (CBR).

El desarrollo de los ensayos se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones y consideraciones metodológicas:

- a) Se elaboraron tres especímenes de prueba para cada ensayo, con el fin de garantizar la representatividad estadística de los resultados obtenidos y asegurar la confiabilidad de las conclusiones derivadas del análisis.
 - b) A cada uno de los especímenes preparados con el suelo de la subrasante se le incorporó el aditivo Terrasil en una proporción del 1% respecto al peso seco del suelo, siguiendo los procedimientos de mezclado establecidos para garantizar una distribución homogénea del producto en toda la masa del material tratado.
- a) **Determinación de límite líquido, límite plástico e índice plástico**

Tabla 18

Evaluación de los límites de consistencia en suelos de la subrasante tratados con 1% de aditivo Terrasil

N° de pruebas	Límites de consistencia			MTC E – 110
	LL (W%)	LP (W%)	IP (W%)	EG - 2013 IP (W%)
Muestra N° 1	21.46	11.72	9.74	< 10.00
Muestra N° 2	28.17	18.21	9.96	< 10.00
Muestra N° 3	23.01	13.56	9.45	< 10.00
Promedio	24.21	14.50	9.72	< 10.00

b) Prueba Proctor

Tabla 19

Parámetros de compactación Proctor Modificado en suelos de la subrasante tratados con 1% de aditivo Terrasil

N° de muestras	Compactación		MTC E – 115
	MDS (gr/cm3)	COA (W%)	EG - 2013 MDS (gr/cm3)
Muestra N° 1	1.541	7.02	>1.6
Muestra N° 2	1.552	6.71	>1.6
Muestra N° 3	1.563	6.81	>1.6
Promedio	1.563	6.85	>1.6

c) Ensayo de CBR**Tabla 20**

Determinación del índice CBR en suelos de la subrasante estabilizados con 1% de aditivo Terrasil

N° de muestras	Compactación		MTC E – 115
	AI 95%	AI 100%	EG - 2013 AI 100%
Muestra N° 1	29.72	31.49	>20.00
Muestra N° 2	25.81	34.00	>20.00
Muestra N° 3	23.79	33.21	>20.00
Promedio	26.44	32.90	>20.00

Tabla 21

Síntesis de los resultados geotécnicos obtenidos en la subrasante con adición del 1% de Terrasil y su conformidad con el MTC EG-2013

Ensayos de laboratorio	Suelo de subrasante + 1% de terrasil	MTC E EG - 2013
Lím. de consistencia	9.72	<10.00
Den. Seca máxima por compactado	1.563	>1.6
Rel. soporte California (CBR)	32.90	>20.00

a) Análisis de resultados

Límites de consistencia

- Los resultados fueron evaluados tomando como referencia los criterios establecidos en el Manual EG-2013, el cual fija como valor máximo admisible un índice de plasticidad inferior al 10%.
- El índice de plasticidad (IP) promedio obtenido para los suelos de la subrasante tratados con el 1% de Terrasil fue de 9.72%.
- El valor determinado cumple satisfactoriamente con el parámetro normativo establecido. Al situarse por debajo del umbral del 10%, el resultado indica que el suelo ha alcanzado una baja plasticidad como consecuencia del tratamiento. Este comportamiento se atribuye a la acción del aditivo Terrasil sobre las partículas del suelo, el cual reduce significativamente la capacidad del material

para retener agua, previniendo así su reblandecimiento excesivo y la pérdida de resistencia ante variaciones de humedad.

Espesor seco más extremo por compactación

- Los resultados fueron contrastados con las especificaciones del Manual EG-2013, el cual establece como valor mínimo requerido una densidad seca máxima superior a 1.60 g/cm^3 .
- La densidad seca máxima promedio registrada para la subrasante tratada con el 1% de Terrasil fue de 1.563 g/cm^3 .
- El valor obtenido se encuentra ligeramente por debajo del mínimo exigido por la normativa, lo que sugiere que, con esta proporción de aditivo, el suelo no logra alcanzar un nivel de densificación suficiente bajo la energía de compactación aplicada, evidenciando que el acomodo entre partículas aún no es óptimo para este porcentaje de incorporación.

Proporción de apoyo de California (CBR)

- Según el manual EG-2013, hemos podido estimar una cifra superior al 20 %.
- Dado el estado de deterioro de la sede de la fundación en Juliaca, situada en la Av. Los Virreyes, la tasa de rentabilidad típica de la CBR es del 32,90 %.
- El suelo ha pasado de ser probablemente un suelo pobre a una subrasante de categoría "Muy Buena". Esta alta resistencia

compensa significativamente la ligera deficiencia en la densidad seca máxima.

4.1.3.2. Estabilización de suelos plásticos de la subrasante mediante la aplicación del 2% de aditivo Terrasil

a) Determinación de límite líquido, límite plástico e índice plástico

Tabla 22

Análisis de las pruebas de Límites de suelos de la subrasante, con aditivo del 2 % de Terrasil

N° de pruebas	Límites de consistencia			MTC E – 110
	LL	LP	IP	EG - 2013
	(W%)	(W%)	(W%)	IP (W%)
Muestra N° 1	26.40	18.54	7.86	< 10.00
Muestra N° 2	25.89	18.53	7.35	< 10.00
Muestra N° 3	22.71	14.97	7.74	< 10.00
Promedio	25.00	17.35	7.65	< 10.00

b) Prueba Proctor

Tabla 23

Parámetros de compactación Proctor Modificado en suelos de la subrasante tratados con 2% de aditivo Terrasil

N° de muestras	Compactación		MTC E – 115
	MDS (gr/cm3)	COA (W%)	EG - 2013
			MDS (gr/cm3)

Muestra N° 1	1.641	8.50	>1.6
Muestra N° 2	1.671	7.81	>1.6
Muestra N° 3	1.682	8.26	>1.6
Promedio	1.665	8.19	>1.6

c) Ensayo de CBR

Tabla 24

Determinación del índice CBR en suelos de la subrasante estabilizados con 2% de aditivo Terrasil

N° de muestras	Compactación		MTC E – 115
	Al 95%	Al 100%	EG - 2013 Al 100%
Muestra N° 1	32.51	41.31	>20.00
Muestra N° 2	33.83	41.78	>20.00
Muestra N° 3	36.72	42.15	>20.00
Promedio	34.35	42.15	>20.00

Tabla 25

Consolidado de parámetros geotécnicos de la subrasante estabilizada con 2% de Terrasil frente a las especificaciones del MTC EG-2013

Ensayos de laboratorio	Suelo de subrasante + 2% de terrasil	MTC E EG - 2013
Lím. de consistencia	7.65	<10.00
Den. Seca máxima por compactado	1.665	>1.6
Rel. soporte California (CBR)	42.15	>20.00



a) Análisis de resultados

Límites de obstrucción

- El Manual EG-2013 especifica un índice de plasticidad máximo admisible inferior al 10 %; este valor se utilizó para evaluar los resultados. Los suelos de la subbase tratados con un 2 % de Terrasil presentaban un índice de plasticidad (PI) medio del 7,65 %.
- El valor alcanzado se sitúa considerablemente por debajo del límite máximo admitido por la normativa, lo que refleja una reducción más pronunciada de la plasticidad del suelo en comparación con los resultados obtenidos con la dosificación del 1%, cuyo IP fue de 9.72%.
- Este comportamiento evidencia que el incremento en la proporción del aditivo Terrasil potencia su efecto estabilizador, mejorando de manera más eficiente la estabilidad volumétrica del suelo frente a las variaciones en el contenido de humedad.

Espesor seco más extremo por compactación

- Los resultados fueron contrastados con las especificaciones técnicas del Manual EG-2013, el cual establece como valor mínimo requerido una densidad seca máxima superior a 1.60 g/cm³.
- La densidad seca máxima promedio obtenida para los suelos de la subrasante tratados con el 2% de Terrasil fue de 1.665 g/cm³.

- El valor determinado supera el umbral mínimo exigido por la normativa, lo que indica que con esta dosificación el suelo logra un nivel de densificación adecuado bajo la energía de compactación aplicada, evidenciando una mejora significativa respecto a los resultados obtenidos con la proporción del 1% de aditivo, cuya densidad seca máxima no alcanzó el valor mínimo requerido.
- A diferencia del ensayo anterior, aquí la densidad supera el mínimo de 1,6 exigido por la norma. Esto sugiere que el 2% de aditivo facilita un mejor alojamiento de las partículas durante la compactación, logrando una estructura de suelo más densa y sólida.

Proporción de apoyo de California (CBR)

- La cifra calculada supera el 20 % y se basa en estimaciones realizadas de conformidad con el manual EG-2013.
- Los ingresos habituales del CBR son del 42,15 %.
- Un CBR de esta magnitud categoriza a la subrasante como "Excelente".

4.2. Discusión de resultados

La comparación de los datos en la Tabla 26 revela cómo la adición progresiva de Terrasil transforma un suelo inicialmente deficiente en un subrasante de alto rendimiento que cumple con las normativas del MTC E EG - 2013

Tabla 26

Contraste de los parámetros geotécnicos del suelo natural frente a los tratados con dosificaciones de 1% y 2% de aditivo Terrasil

Ensayos de laboratorio	Suelo natural	Suelo de subrasante + 1% de terrasil	Suelo de subrasante + 2% de terrasil	MTC E EG - 2013
Límites de consistencia	16.52	9.72	7.65	<10.00
Densidad Seca máxima	1.434	1.563	1.665	>1.6
Relación soporte California (CBR)	17.84	32.90	42.15	>20.00

1. Límites de Consistencia

- El suelo natural presenta un índice de 16.52%, superando el límite permitido de 10.00%, lo que lo clasifica como un suelo plástico e inestable ante la humedad.
- Al agregar 1%, el valor baja a 9.72%, logrando el cumplimiento normativo. Con el 2%, se reduce aún más hasta 7.65%, lo que minimiza el riesgo de expansión o contracción del suelo bajo el pavimento.
- El aditivo reduce eficazmente la hidrofilia de las arcillas, convirtiendo un suelo inestable en uno técnicamente apto.

2. Optimización de la Densidad Estructural

- El suelo natural tiene una densidad muy baja de 1.434 gr/cm³, insuficiente para soportar cargas estructurales según el estándar (> 1.6 gr/cm³).
- La mezcla al 1% mejora la densidad a 1.563 gr/cm³, pero sigue sin alcanzar el mínimo de 1.6 gr/cm³. Es solo con la dosificación del 2% que se logra un valor de 1.665 gr/cm³, cumpliendo finalmente con la exigencia del MTC.
- El 2% de Terrasil no solo impermeabiliza, sino que facilita mecánicamente una mejor compactación de las partículas.

3. Incremento exponencial de la capacidad de soporte (CBR)

- Este es el indicador más crítico para el diseño de carreteras. El suelo natural posee un CBR de 17,84%, por debajo del 20,00% requerido.
- Al 1% de Terrasil: El CBR sube a 32.90%, casi duplicando la resistencia original.
- Al 2% de Terrasil: El CBR alcanza un 42,15%, lo que representa un incremento del 136% respecto al suelo natural.

Un CBR superior al 40% permite categorizar esta subrasante como "Excelente", lo que garantiza una base muy rígida que prolongará la vida útil de la vía y reducirá los costos de mantenimiento.

La discusión de los resultados demuestra que, aunque el 1% de Terrasil mejora las propiedades del suelo, solo la dosificación al 2% logra el cumplimiento



total de todos los parámetros del MTC (especialmente la densidad seca máxima).

Esta dosificación es la recomendada para garantizar la estabilidad mecánica y durabilidad de la subrasante.

121

CONCLUSIONES

Primera: El uso de Terrasil incrementó la capacidad de soporte de la subrasante. Al aplicar el 2% de aditivo, el CBR alcanzó un 42.15%, lo que representa un incremento del 136% respecto al estado natural. Este aumento permite categorizar la subrasante como "Excelente", garantizando una base rígida que impermeabiliza el suelo y prolonga la vida útil de la vía. Se concluye que el aditivo Terrasil influye de manera positiva y significativa en la estabilización, siendo la dosificación del 2% recomendable para garantizar el cumplimiento de todos los parámetros técnicos de pavimentación en la región.

Segunda: Se determine que el suelo natural de la subrasante de la Av. Los Virreyes presentan los siguientes resultados.

Propiedades físicas:

- Índice de Plasticidad (IP) de 16.52%. El MTC exige que este valor sea menor a 10%, por lo que el suelo reprobó esta prueba.
- humedad natural del 17.81%, lo que hace que el terreno sea inestable y resbaladizo por dentro.

Propiedades mecánicas:

- Su densidad máxima fue de solo 1.434 gr/cm³, cuando la norma pide que sea al menos de 1.60.
- (CBR): La prueba de (CBR) arrojó un 17.84%. (El MTC exige mínimo 20%).

Tercera: La incorporación del aditivo Terrasil logró el mejoramiento de la subrasante obteniendo los siguientes resultados.

Propiedades físicas:

- Índice de Plasticidad (IP) de un deficiente 16.52% a un óptimo 7.65%. Este descenso es fundamental desde la perspectiva geotécnica, ya que satisface el requerimiento normativo que exige un IP estrictamente menor al 10.00%, garantizando así la mitigación de los fenómenos de expansión y contracción ante variaciones de humedad en la subrasante.

Propiedades mecánicas:

- La acción lubricante e impermeabilizante del Terrasil permitió una mejor acomodación de las partículas bajo la energía de compactación aplicada, elevando la Densidad Seca Máxima (MDS) a 1.665 gr/cm³. Este incremento representa un hito clave en la investigación, dado que supera el umbral mínimo de 1.60 gr/cm³ establecido por la normativa vigente, resolviendo la deficiencia de compactibilidad que presentaba el suelo en su estado natural y asegurando una base con un índice de vacíos minimizado.
- (CBR): La muestra estabilizada al 2% alcanzó un valor de 42.15%, superando con amplio margen el límite mínimo del 20.00% requerido por el MTC para subrasantes de uso en pavimentación. Este notable desempeño mecánico no solo certifica el cumplimiento normativo, sino que eleva la clasificación geotécnica



del terreno a la categoría de subrasante "Excelente", asegurando una plataforma de cimentación altamente rígida que disipará eficientemente los esfuerzos inducidos por las cargas de tránsito vehicular.

124



RECOMENDACIONES

Primera: Se sugiere ampliar el campo de investigación evaluando el comportamiento del aditivo químico Terrasil en proporciones superiores al 2%, con el propósito de identificar una dosificación óptima que permita maximizar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la subrasante en suelos de alta plasticidad, superando los resultados obtenidos en el presente estudio.

Segunda: Se recomienda extender el alcance de los estudios de estabilización incorporando el aditivo Terrasil en diferentes tipos de suelos, variando sistemáticamente las dosificaciones empleadas, con la finalidad de analizar las reacciones que se producen en cada caso y generar propuestas técnicas fundamentadas que contribuyan al mejoramiento de la construcción de carreteras en diversas condiciones geotécnicas.

Tercera: Se propone impulsar nuevas investigaciones orientadas a evaluar la efectividad de otros aditivos estabilizadores disponibles en el mercado para el mejoramiento de suelos en vías no pavimentadas, considerando la diversidad de tipos de suelo que pueden presentarse en diferentes zonas del país, con el fin de ampliar las alternativas técnicas disponibles para los profesionales de la ingeniería vial.

Cuarta: Se recomienda fomentar el desarrollo de investigaciones aplicadas en caminos vecinales mediante el uso del aditivo Terrasil, orientadas específicamente a incrementar la densidad seca máxima de suelos naturales de tipo limo-arcilloso. De comprobarse su efectividad, estos suelos podrían ser aprovechados directamente como material de construcción, eliminando la



necesidad de trasladar material de préstamo desde canteras externas y reduciendo así los costos de ejecución de los proyectos viales.



BIBLIOGRAFÍA

Álvarez Benites, N. C., & Gutiérrez Gallegos, J. A. (2020). Estudio experimental del efecto en el comportamiento mecánico al adicionar caucho triturado en un suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa Llama-Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

Aswari, S., & Prasada Raju, G. (2022). Estabilización de suelos expansivos con residuos industriales de coco y Terrasil. *Revista Internacional de Ingeniería Geotécnica*, 15(3), 45-58.

Braja, M. D. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.

Das, B. M. (2013). *Principios de ingeniería de suelos* (8.^a ed.). Cengage Learning.

Delva, J. (2016). *Estabilización química de suelos finos: fundamentos y aplicaciones prácticas*. Editorial Técnica Peruana.

Flores Quiñones, E. R., & Flores Sánchez, 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 Nacional de Trujillo].

Gonzales Zevallos, J. R. (2022). Estudio comparativo de estabilización química con Terrasil y Permazyme para afirmado del camino vecinal Santiago



Pampa – Pampa Yanamayo, Sandia 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].

Gutiérrez, C. (2010). Productos químicos para estabilización de suelos en pavimentos. *Revista Técnica de Pavimentos*, 8(2), 34-47.

Gutiérrez, R. (2017). Carreteras no pavimentadas: diseño y mantenimiento. Editorial UPC.

Hidalgo Bruna, M. (2022). Estabilización del suelo con Terrasil para mejorar la carretera afirmada Patapampa – Apissi, ubicada en Arapa, Azángaro, Puno [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].

Huamán, J., & Zamalloa, C. (2022). Evaluación de aditivos químicos (Terrasil y Permaroad) para el mejoramiento de la subrasante en vías de Acobamba – Apurímac [Informe técnico]. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Karumanchi, S., Reddy, K. R., & Kumar, P. (2020). Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020215. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003215)

Meeravali, K., Rubén, N., & Rangaswamy, K. (2020). Estabilización de arcilla blanda utilizando nanomateriales: Terrasil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(5), 489-497. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1578943>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.



Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos (Ed. abril 2014). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.htm

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de ensayos de materiales (EM-2000). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.htm

Montejo, V. A. (2002). Mecánica de suelos: Fundamentos de ingeniería geotécnica. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Optimasoil Nanotechnology. (2020). Terrasil: Aditivo enzimático para estabilización de suelos [Folleto técnico]. <https://www.optimasoil.com>

Pérez, L. (2012). Tipos de estabilización de suelos en obras viales. Revista Iberoamericana de Ingeniería de Pavimentos, 7(1), 23-35.

Pérez, L. (2014). Estabilización de suelos: Técnicas y aplicaciones en pavimentos. Editorial Técnica del MTC.

Ramos Quispe, F. N. (2022). Efecto del aditivo nanotecnológico Terrasil sobre las propiedades geotécnicas de suelos finos en la carretera Puno-Moquegua (km 11+400) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].

Ravines, M. (2010). Enzimas orgánicas en la estabilización de suelos para pavimentos. Revista Científica de Ingeniería Civil, 18(2), 78-92.



Roldán, A. (2010). Estabilización química de suelos: Agentes estabilizadores y dosificaciones. Editorial Universitaria.

Rodríguez Vínces, D. I. (2016). Análisis comparativo de la compactación y humedad de la subrasante natural y la subrasante utilizando productos químicos biodegradables (Terrasil), de la vía ecológica del Cantón Quevedo, Provincia de Los Ríos [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo].

Ruiz, F. (2022). Caracterización geotécnica de suelos para proyectos viales. Editorial Académica Española.

Normas técnicas citadas

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D422-63: Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D4318-17: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D1557-12: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International.



American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D1883-16: Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D5084-15: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM E11-17: Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves. ASTM International.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). AASHTO T 193-18: Standard method of test for The California Bearing Ratio. AASHTO.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 107: Análisis granulométrico de suelos. En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 108: Contenido de humedad de suelos. En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 110: Límite líquido de suelos. En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.



Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 111: Límite plástico e índice de plasticidad de suelos. En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 115: Compactación de suelos (Proctor modificado). En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 132: CBR de suelos (laboratorio). En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). MTC E 145: Clasificación de suelos. En Manual de ensayos de materiales (Sección 1: Suelos). Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.



ANEXOS



ANEXO 01

MATRIZ DE CONSISTENCIA



TITULO: INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Método y Técnicas
Problema General: ¿Cómo influye el uso de aditivo terrasil en la estabilización de suelos para mejorar la subrasante con fines de pavimentación en la región de Puno 2025?	Objetivo General: Analizar la influencia del uso de aditivo Terrasil en la estabilización de suelos para mejorar la subrasante con fines de pavimentación en la región de Puno 2025.	Hipótesis General: El mejoramiento de las propiedades mecánicas de la subrasante de la ciudad de Juliaca con fines de pavimentación; se logran con adición de aditivos Terrasil.	Variable Independiente Uso del aditivo Terrasil	Dosificación	0%, 1%, y 2%	Enfoque de investigación: Cuantitativo Nivel y tipo de investigación: Según el estudio de la investigación es de nivel explicativo de tipo aplicativo Diseño de la investigación: Experimental
Problemas Específicos: ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Los Virreyes de la ciudad de Juliaca con fines de pavimentación? ¿Cómo es el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de Av. Los Virreyes de la ciudad de Juliaca; con procesos de estabilización de suelos empleando aditivo Terrasil?	Objetivos Específicos: Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Los virreyes de la ciudad de Juliaca con fines de pavimentación. Proponer el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Los virreyes de la ciudad de Juliaca; con procesos de estabilización de suelos empleando aditivo Terrasil.	Hipótesis Específicos: Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos plásticos de la sub rasante de la Av. Los virreyes de la ciudad de Juliaca con fines de pavimentación; no son compatibles con las especificaciones del Manual EG – 2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. El mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos plásticos de la sub rasante de la Av. Los virreyes de la ciudad de Juliaca; se logran con adición de agregados y aditivo Terrasil en proporciones adecuadas.	Variable Dependiente Estabilización de suelos (Mejora de la subrasante)	Propiedades físicas y mecánicas	Densidad seca y contenido de humedad CBR. Límites de Atterberg.	Población: La población de estudio en esta investigación estuvo dada por los suelos plásticos de la subrasante de la Av. Lo virreyes de la ciudad de Juliaca. Muestra: Para obtener la muestra se deberá efectuar prospecciones de campo (calicata), en este caso se realizará una calicata de la Av. Los virreyes de la ciudad de Juliaca. La profundidad de la calicata será como mínimo 1.20 m debajo de la subrasante proyectada. De la cual se obtendrá la muestra de suelo para los respectivos ensayos de laboratorio adicionándole porcentajes de aditivo Terrasil en 0%, 1% y 2%.

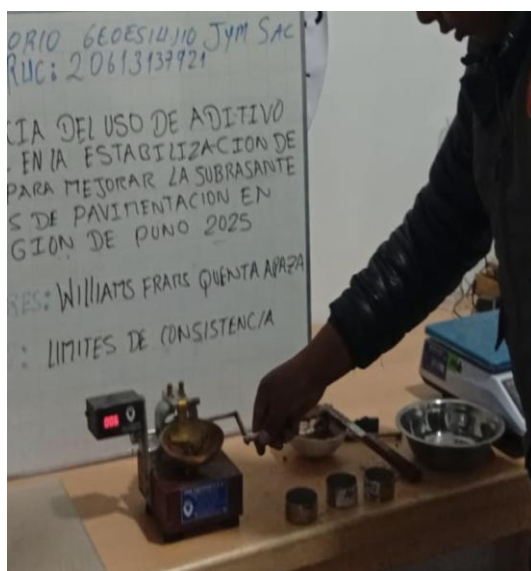
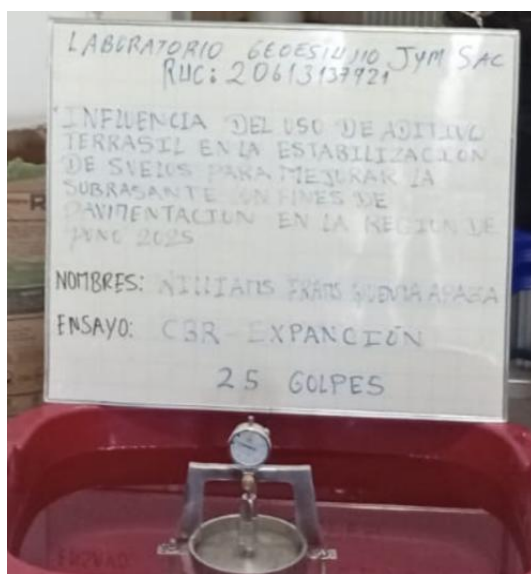


ANEXO 02

PANEL FOTOGRAFICO









ENSAYOS DE LABORATORIO



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

CONTENIDO DE HUMEDAD

(ASTM D - 2216 - MTC - E 108 - NTP 400.012)

DESCRIPCIÓN	MUESTRA N° 1	MUESTRA N° 2	MUESTRA N° 3
N° de Tara	T-01	T-02	T-03
Peso de Tara (g)	25.30	26.15	24.80
Peso Tara + Suelo Húmedo (g)	126.21	128.65	126.63
Peso Tara + Suelo Seco (g)	110.50	113.65	111.20
Peso del Agua (g)	15.71	15.00	15.43
Peso del Suelo Seco (g)	85.20	87.50	86.40
Contenido de Humedad W(%)	18.44	17.14	17.86

CONTENIDO DE HUMEDAD PROMEDIO W(%)	17.81 %
---	----------------

Fórmula: $W(\%) = [(Ww / Ws) \times 100]$ donde: Ww = Peso del agua, Ws = Peso del suelo seco

OBSERVACIONES Y COMENTARIOS
Las tres muestras presentan valores de humedad consistentes entre sí, con una variación máxima de 1.30%. El suelo se clasifica como arcilla de baja plasticidad (CL) según SUCS.

Observaciones:

GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC 20613137921

Kevin Quiapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

(ASTM C136 / NTP 400.012 / MTC E 107)

MUESTRA 01

TAMICES ASTM	APERTURA (mm)	PESO RET. (g)	%RET. PARCIAL	%RET. ACUM.	% QUE PASA	ESPEC.	DESCRIPCIÓN / CARACTERÍSTICAS / CLASIFICACIÓN
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	100.00		DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00		P.I. = 3700.00 g
2"	50.600	0.00	0.00	0.00	100.00		P.L. = 3453.00 g
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	100.00		P.P. = 247.00 g
1"	25.400	37.00	1.00	1.00	99.00		% w = 22.84
3/4"	19.050	32.00	0.86	1.86	98.14		LÍMITES DE CONSISTENCIA
1/2"	12.700	19.00	0.51	2.38	97.62		L.L. = 34.26
3/8"	9.525	14.00	0.38	2.76	97.24		L.P. = 18.23
1/4"	6.350	27.00	0.73	3.49	96.51		I.P. = 16.03
No4	4.760	34.00	0.92	4.41	95.59	500	CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS
No8	2.380	102.00	2.76	7.16	92.84		D10 = 0.530 mm
No10	2.000	146.00	3.95	11.11	88.89		D30 = 0.150 mm
No16	1.190	204.00	5.51	16.62	83.38		D60 = 0.400 mm
No20	0.840	114.00	3.08	19.70	80.30		Cu = 0.92
No30	0.590	187.00	5.05	24.76	75.24		Cc = 0.11
No40	0.420	489.00	13.22	37.97	62.03		CLASIFICACIÓN
No50	0.300	708.00	19.14	57.11	42.89		SUCS : CL
No60	0.250	427.00	11.54	68.65	31.35		AASHTO : A-3
No80	0.180	333.00	9.00	77.65	22.35		TAMAÑO MÁXIMO:
No100	0.149	458.00	12.38	90.03	9.97		3700.00 g
No200	0.074	250.00	6.76	96.78	3.22		
BASE	0.000	119.00	3.22	100.00	0.00		
TOTAL TOTAL		3700.00	100.00				OBSERVACIONES:
% PÉRDIDA		3.24					

RESUMEN GRANULOMÉTRICO

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Cu	Cc
Muestra N° 1	4.41	92.35	3.24	0.92	0.11

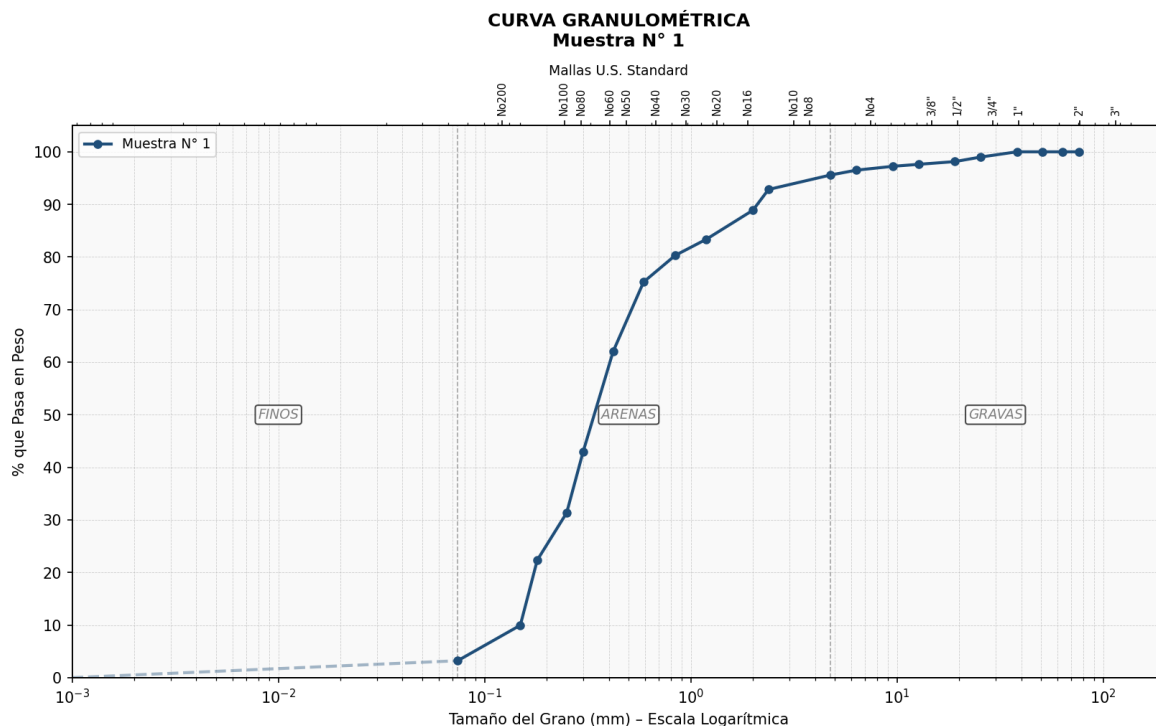
Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC/ 20613137921

Kevin Quiapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



Observaciones:





PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

(ASTM C136 / NTP 400.012 / MTC E 107)

MUESTRA 02

TAMICES ASTM	APERTURA (mm)	PESO RET. (g)	%RET. PARCIAL	%RET. ACUM.	% QUE PASA	ESPEC.	DESCRIPCIÓN / CARACTERÍSTICAS / CLASIFICACIÓN
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	100.00		DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00		P.I. = 5200.00 g
2"	50.600	0.00	0.00	0.00	100.00		P.L. = 3453.00 g
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	100.00		P.P. = 247.00 g
1"	25.400	53.00	1.02	1.02	98.59		% w = 22.84
3/4"	19.050	46.00	0.88	1.90	97.51		LÍMITES DE CONSISTENCIA
1/2"	12.700	26.00	0.50	2.40	97.03		L.L. = 35.12
3/8"	9.525	20.00	0.38	2.79	96.50		L.P. = 17.89
1/4"	6.350	37.00	0.71	3.50	95.50		I.P. = 17.27
No4	4.760	46.00	0.88	4.38	94.62	500	CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS
No8	2.380	150.00	2.88	7.27	90.67		D10 = 0.530 mm
No10	2.000	207.00	3.98	11.25	85.95		D30 = 0.150 mm
No16	1.190	293.00	5.63	16.88	79.75		D60 = 0.400 mm
No20	0.840	162.00	3.12	20.00	76.26		Cu = 0.92
No30	0.590	266.00	5.12	25.12	70.48		Cc = 0.12
No40	0.420	705.00	13.56	38.67	55.69		CLASIFICACIÓN
No50	0.300	998.00	19.19	57.87	37.67		SUCS : CL
No60	0.250	609.00	11.71	69.58	27.08		AASHTO : A-4
No80	0.180	476.00	9.15	78.73	19.07		TAMAÑO MÁXIMO:
No100	0.149	642.00	12.35	91.08	8.47		3700.00 g
No200	0.074	338.00	6.50	97.58	2.72		
BASE	0.000	126.00	2.42	100.00	0.00		
TOTAL TOTAL		5200.00	100.00				OBSERVACIONES:
% PÉRDIDA		4.65					

RESUMEN GRANULOMÉTRICO

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Cu	Cc
Muestra N° 2	5.38	89.97	4.65	0.92	0.12

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC/ 20613137921

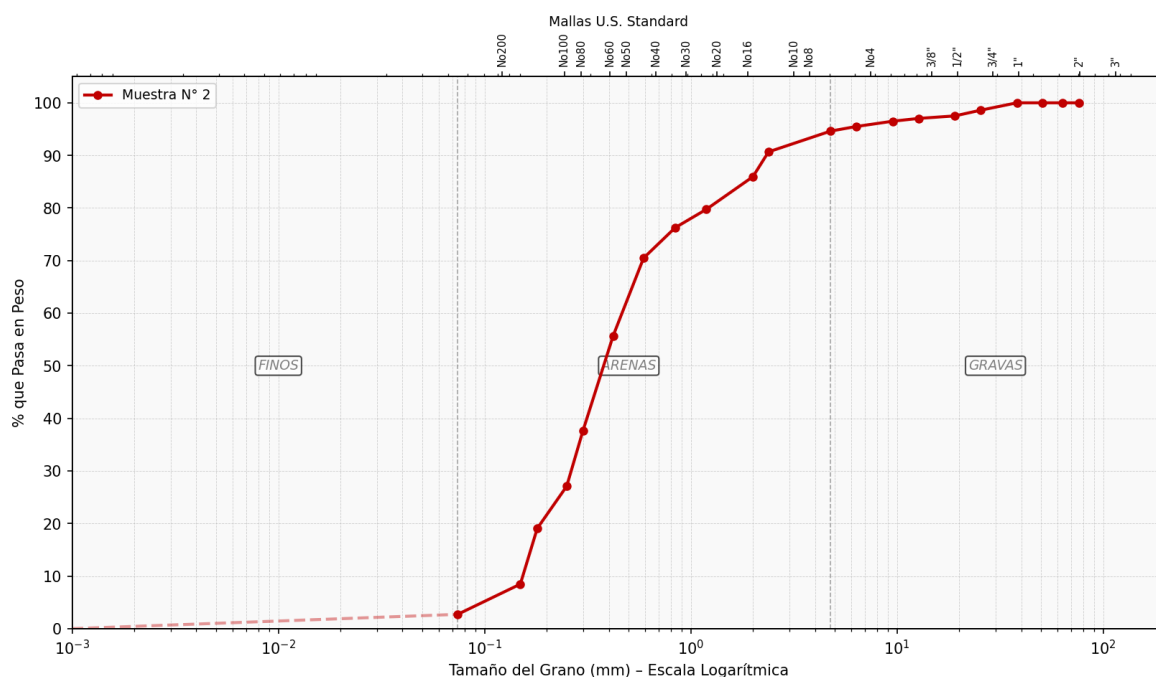
Kevin Quispapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



CURVA GRANULOMÉTRICA

Muestra N° 2



Observaciones:





PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : NOBIEMBRE DEL 2025

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

(ASTM C136 / NTP 400.012 / MTC E 107)

MUESTRA 03

TAMICES ASTM	APERTURA (mm)	PESO RET. (g)	%RET. PARCIAL	%RET. ACUM.	% QUE PASA	ESPEC.	DESCRIPCIÓN / CARACTERÍSTICAS / CLASIFICACIÓN
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	100.00		DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	100.00		P.I. = 3700.00 g
2"	50.600	0.00	0.00	0.00	100.00		P.L. = 3453.00 g
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	100.00		P.P. = 247.00 g
1"	25.400	38.00	1.03	1.03	98.97		% w = 22.84
3/4"	19.050	33.00	0.89	1.92	98.08		LÍMITES DE CONSISTENCIA
1/2"	12.700	20.00	0.54	2.46	97.54		L.L. = 28.93
3/8"	9.525	15.00	0.41	2.86	97.14		L.P. = 11.78
1/4"	6.350	28.00	0.76	3.62	96.38		I.P. = 17.15
No4	4.760	35.00	0.95	4.57	95.43	500	CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS
No8	2.380	98.00	2.65	7.22	92.78		D10 = 0.530 mm
No10	2.000	140.00	3.78	11.00	89.00		D30 = 0.150 mm
No16	1.190	196.00	5.30	16.30	83.70		D60 = 0.400 mm
No20	0.840	110.00	2.97	19.27	80.73		Cu = 0.75
No30	0.590	180.00	4.86	24.14	75.86		Cc = 0.11
No40	0.420	470.00	12.70	36.84	63.16		CLASIFICACIÓN
No50	0.300	680.00	18.38	55.22	44.78		SUCS : CL
No60	0.250	410.00	11.08	66.30	33.70		AASHTO : A-4
No80	0.180	320.00	8.65	74.95	25.05		TAMAÑO MÁXIMO:
No100	0.149	440.00	11.89	86.84	13.16		3700.00 g
No200	0.074	240.00	6.49	93.32	6.68		
BASE	0.000	247.00	6.68	100.00	0.00		
TOTAL TOTAL		3700.00	100.00				OBSERVACIONES:
% PÉRDIDA		6.68					

RESUMEN GRANULOMÉTRICO

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Cu	Cc
Muestra N° 3	4.57	88.74	6.68	0.75	0.11

Observaciones:



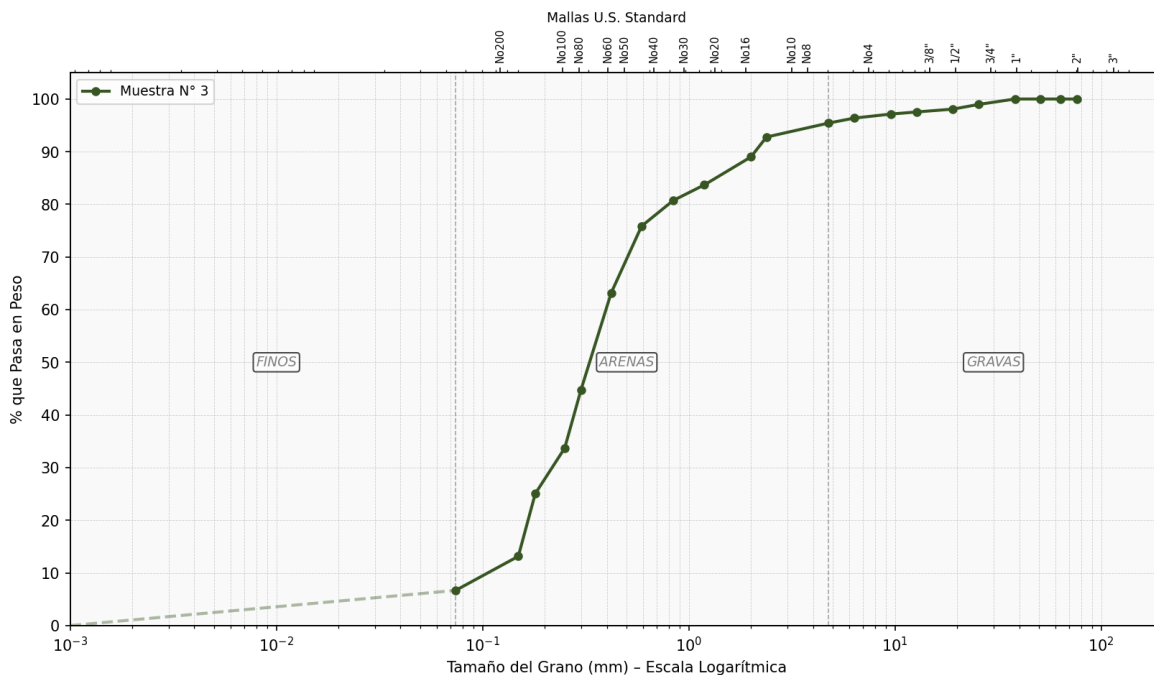
GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quilapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

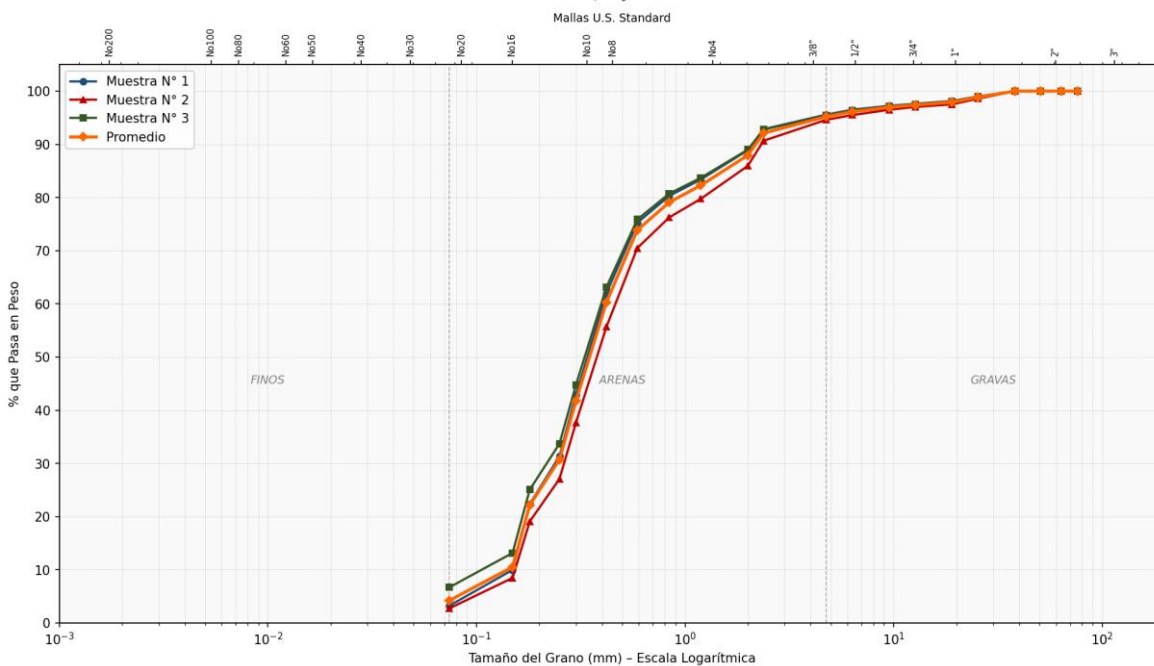
Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



CURVA GRANULOMÉTRICA Muestra N° 3



CURVAS GRANULOMÉTRICAS COMPARATIVAS Muestras N° 1, 2 y 3 + Promedio



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe

INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 01

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° F	TARRO N° G	TARRO N° H
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	32.15	34.8	32.9
SUELO SECO + TARRO	gr	29.13	31.5	30.1
PESO DEL TARRO	gr	18.91	19.55	18.47
PESO DEL AGUA	gr	3.02	3.3	2.8
PESO DEL SUELO SECO	gr	10.22	11.95	11.63
HUMEDAD %	%	29.55	27.62	24.08
N° DE GOLPES		25	23	22
LÍMITE LÍQUIDO				34.26

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° P1	TARRO N° P2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	11.93	12.14
SUELO SECO + TARRO	gr	11.4	11.73
PESO DEL TARRO	gr	8.65	8.6
PESO DEL AGUA	gr	0.53	0.41
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.75	3.13
HUMEDAD %	%	19.27	13.1
LÍMITE PLÁSTICO			18.23
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			16.03

Observaciones:

GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quiapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 02

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° A	TARRO N° B	TARRO N° C
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	35.4	33.8	36.2
SUELO SECO + TARRO	gr	32.1	30.6	32.7
PESO DEL TARRO	gr	19.8	18.9	19.4
PESO DEL AGUA	gr	3.3	3.2	3.5
PESO DEL SUELO SECO	gr	12.3	11.7	13.3
HUMEDAD %	%	26.83	27.35	26.32
N° DE GOLPES		27	24	21
LÍMITE LÍQUIDO				35.12

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° Q1	TARRO N° Q2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	10.58	11.35
SUELO SECO + TARRO	gr	10.12	10.82
PESO DEL TARRO	gr	7.9	8.15
PESO DEL AGUA	gr	0.46	0.53
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.22	2.67
HUMEDAD %	%	20.72	19.85
LÍMITE PLÁSTICO			17.89
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			17.27

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quiapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 03

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° X	TARRO N° Y	TARRO N° Z
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	28.6	30.4	29.8
SUELO SECO + TARRO	gr	26.4	28.1	27.6
PESO DEL TARRO	gr	17.8	18.5	18.2
PESO DEL AGUA	gr	2.2	2.3	2.2
PESO DEL SUELO SECO	gr	8.6	9.6	9.4
HUMEDAD %	%	25.58	23.96	23.4
N° DE GOLPES		26	23	21
LÍMITE LÍQUIDO				28.14

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° R1	TARRO N° R2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	9.84	10.25
SUELO SECO + TARRO	gr	9.42	9.78
PESO DEL TARRO	gr	7.2	7.55
PESO DEL AGUA	gr	0.42	0.47
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.22	2.23
HUMEDAD %	%	18.92	21.08
LÍMITE PLÁSTICO			11.85
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			16.29

Observaciones:


 GEOESTUDIO J & M S.A.C.
 RUC: 20613137921
 Kevin Quiapaza Ortiz
 TÉCNICO LABORATORISTA


 Julio Ronaldo Yucra Quispe
 INGENIERO CIVIL
 CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

PRUEBA PROCTOR MODIFICADO — RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD

(MÉTODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO A)

MUESTRA 01

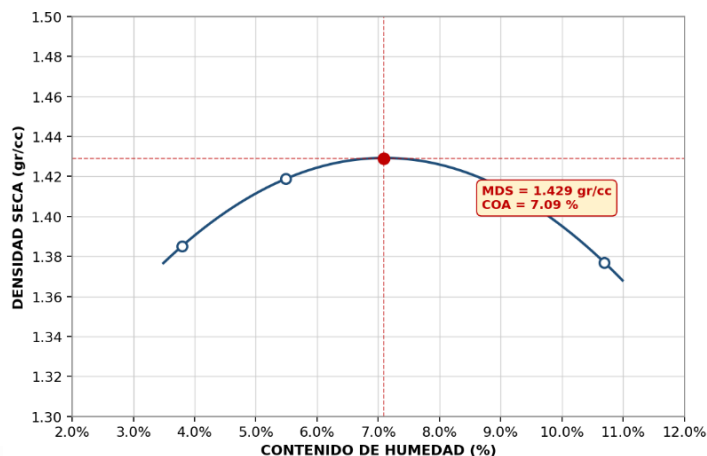
VOLUMEN DEL MOLDE	2067 cc
GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5
PESO DEL MOLDE	6000 gr

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	8972	9094	9163	9187	9151
PESO DEL MOLDE	gr	6000	6000	6000	6000	6000
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	2972	3094	3163	3187	3151
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.438	1.497	1.530	1.542	1.524
% DE HUMEDAD (PROMEDIO)	%	3.79	5.49	7.09	8.99	10.69
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.385	1.419	1.429	1.415	1.377

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	CÁPSULA N° 1	CÁPSULA N° 2	CÁPSULA N° 3	CÁPSULA N° 4	CÁPSULA N° 5
SUELO HÚMEDO + CÁPSULA	gr	433.95	456.29	478.72	502.91	526.79
SUELO SECO + CÁPSULA	gr	419.55	434.60	449.65	464.70	479.75
PESO DEL AGUA	gr	14.40	21.69	29.07	38.21	47.04
PESO DE LA CÁPSULA	gr	39.55	39.60	39.65	39.70	39.75
PESO DEL SUELO SECO	gr	380.00	395.00	410.00	425.00	440.00
% DE HUMEDAD	%	3.79	5.49	7.09	8.99	10.69

MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)	1.429 gr/cc	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (COA)	7.09 %
----------------------------	-------------	-----------------------------------	--------

CURVA DE COMPACTACIÓN



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921
Kevin Quilapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
N° 388059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

PRUEBA PROCTOR MODIFICADO — RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD

(MÉTODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO A)

MUESTRA 02

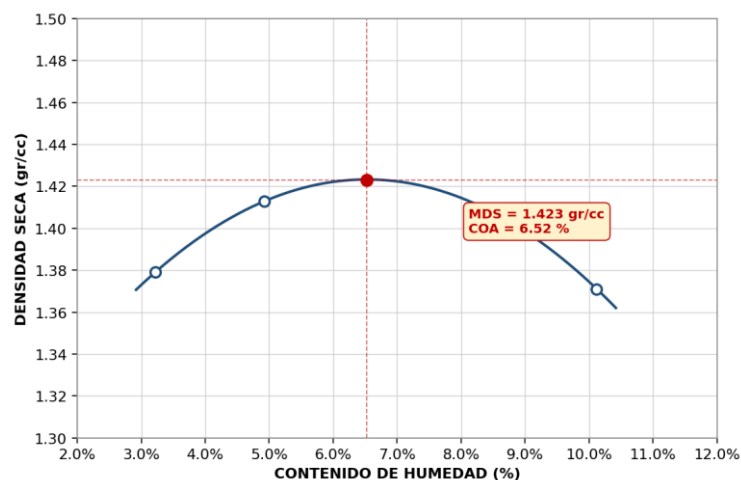
VOLUMEN DEL MOLDE	2067 cc
GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5
PESO DEL MOLDE	6000 gr

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	8943	9064	9133	9157	9121
PESO DEL MOLDE	gr	6000	6000	6000	6000	6000
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	2943	3064	3133	3157	3121
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.424	1.482	1.516	1.527	1.510
% DE HUMEDAD (PROMEDIO)	%	3.22	4.92	6.52	8.42	10.12
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.379	1.413	1.423	1.409	1.371

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	CÁPSULA N° 1	CÁPSULA N° 2	CÁPSULA N° 3	CÁPSULA N° 4	CÁPSULA N° 5
SUELO HÚMEDO + CÁPSULA	gr	431.64	453.88	476.23	500.33	524.13
SUELO SECO + CÁPSULA	gr	419.40	434.45	449.50	464.55	479.60
PESO DEL AGUA	gr	12.24	19.43	26.73	35.78	44.53
PESO DE LA CÁPSULA	gr	39.40	39.45	39.50	39.55	39.60
PESO DEL SUELO SECO	gr	380.00	395.00	410.00	425.00	440.00
% DE HUMEDAD	%	3.22	4.92	6.52	8.42	10.12

MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)	1.423 gr/cc	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (COA)	6.52 %
----------------------------	-------------	-----------------------------------	--------

CURVA DE COMPACTACIÓN



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quilapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

PRUEBA PROCTOR MODIFICADO — RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD

(MÉTODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO A)

MUESTRA 03

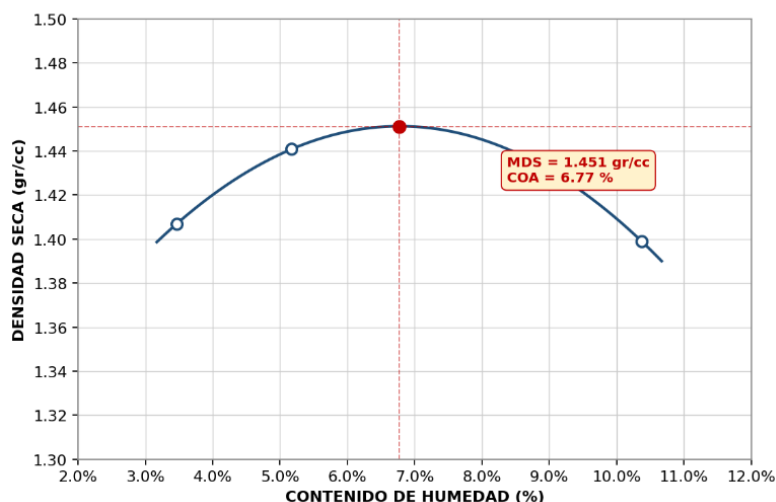
VOLUMEN DEL MOLDE	2067 cc
GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5
PESO DEL MOLDE	6000 gr

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	9010	9132	9202	9227	9192
PESO DEL MOLDE	gr	6000	6000	6000	6000	6000
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3010	3132	3202	3227	3192
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.456	1.515	1.549	1.561	1.544
% DE HUMEDAD (PROMEDIO)	%	3.47	5.17	6.77	8.67	10.37
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.407	1.441	1.451	1.437	1.399

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	CÁPSULA N° 1	CÁPSULA N° 2	CÁPSULA N° 3	CÁPSULA N° 4	CÁPSULA N° 5
SUELO HÚMEDO + CÁPSULA	gr	432.84	455.12	477.51	501.65	525.48
SUELO SECO + CÁPSULA	gr	419.65	434.70	449.75	464.80	479.85
PESO DEL AGUA	gr	13.19	20.42	27.76	36.85	45.63
PESO DE LA CÁPSULA	gr	39.65	39.70	39.75	39.80	39.85
PESO DEL SUELO SECO	gr	380.00	395.00	410.00	425.00	440.00
% DE HUMEDAD	%	3.47	5.17	6.77	8.67	10.37

MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)	1.451 gr/cc	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (COA)	6.77 %
----------------------------	-------------	-----------------------------------	--------

CURVA DE COMPACTACIÓN



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC/20613137921

Williams Frams Quenta Apaza

Julio Ronaldo Yucra Quispe



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

ENSAYO DE C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO)

(ASTM D-1883 ASTM D-1557-91 AASHTO T-193)

MUESTRA 01

SUELOS DE	SUBRASANTE
PROFUNDIDAD	: 0.60 mt.
VOLUMEN DEL SUELO	: 2323.46 cc
MÉTODO COMPACT.	ASTM D-1557-91, C

DATOS DE COMPACTACIÓN				
DESCRIPCIÓN	Unid.	MOLDE N° III (12 golpes)	MOLDE N° II (25 golpes)	MOLDE N° I (56 golpes)
N° DE CAPAS		5	5	5
N° DE GOLPES POR CAPA		12	25	56
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	11262	11465	11575
PESO DEL MOLDE	gr	8021	8033	8020
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3241	3432	3555
VOLUMEN DEL SUELO	cc	2323.46	2323.46	2323.46
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.395	1.477	1.530
% DE HUMEDAD (SIN SATURAR)	%	7.32	7.09	6.53
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.300	1.379	1.436

EXPANSIÓN				
FECHA	TIEMPO	MOLDE III — Dial / Exp.(mm) / %	MOLDE II — Dial / Exp.(mm) / %	MOLDE I — Dial / Exp.(mm) / %
13/12/2018	0:00 h	0 / 0 / 0%	0 / 0 / 0%	0 / 0 / 0%
14/12/2018	24:00 h	0.4 / 0.4 / 0.31496%	0.33 / 0.33 / 0.25984%	0.13 / 0.13 / 0.10236%
15/12/2018	48:00 h	0.8 / 0.8 / 0.62992%	0.67 / 0.67 / 0.52756%	0.26 / 0.26 / 0.20472%
16/12/2018	72:00 h	1.09 / 1.09 / 0.85827%	0.91 / 0.91 / 0.71654%	0.35 / 0.35 / 0.27559%
17/12/2018	96:00 h	1.25 / 1.25 / 0.98425%	1.04 / 1.04 / 0.8189%	0.4 / 0.4 / 0.31496%

PENETRACIÓN			
PENETRACIÓN (mm)	MOLDE III — Esf.(Kg/cm²)	MOLDE II — Esf.(Kg/cm²)	MOLDE I — Esf.(Kg/cm²)
0.63	2	3.7	4.9
1.27	3.3	6	7.9
1.91	4.3	8	10.6
2.54	5.3	9.7	12.9
3.81	7	12.9	17.1
5.09	8.6	15.8	21
6.35	10.1	18.4	24.5
7.62	11.4	21	27.8
8.84	12.7	23.2	30.9
10.16	14	25.6	34
CBR (%)	7.54	13.81	18.34

MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.429 gr/cc	HUMEDAD ÓPTIMA	7.09 %
CBR AL 95% DE M.D.S.	12.11 %	CBR AL 100% DE M.D.S.	17.78 %

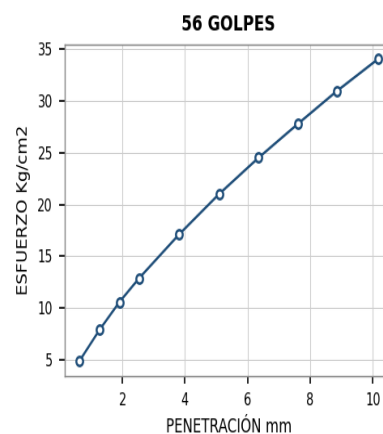
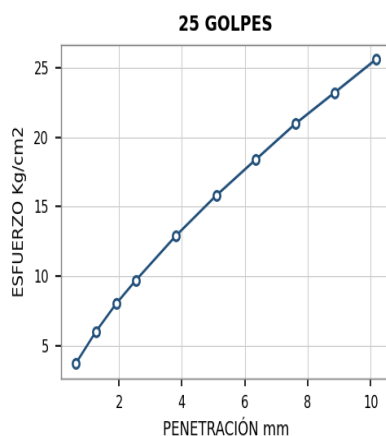
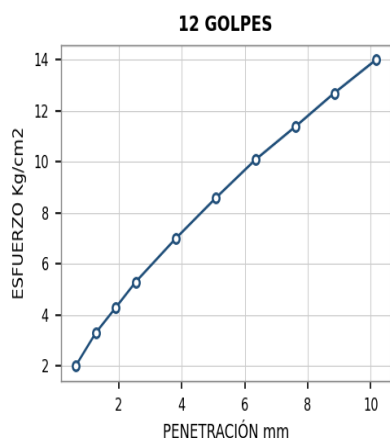
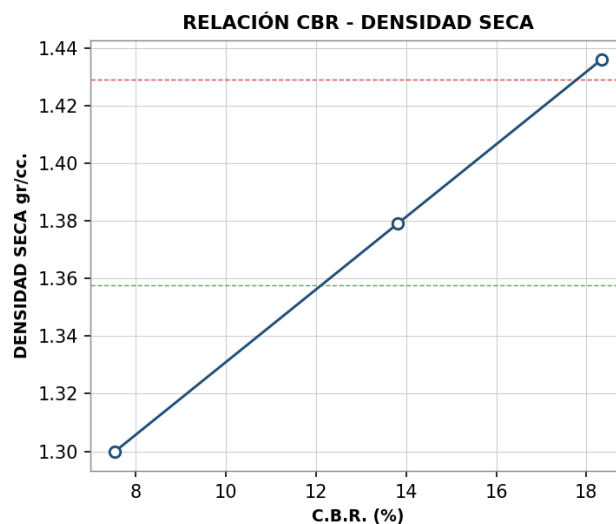
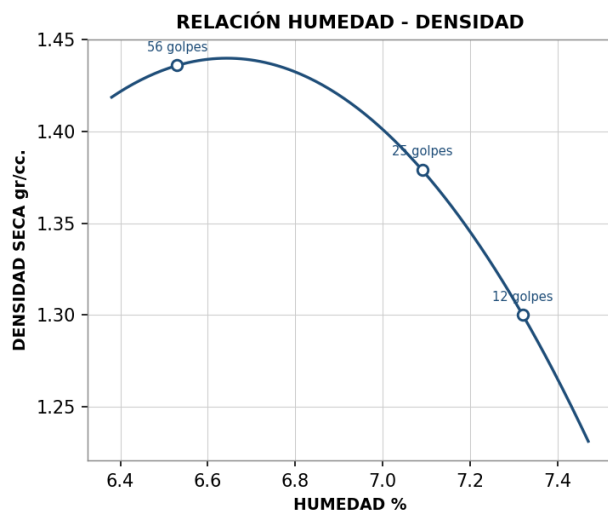
Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20025197921

Kevin Quapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Judio Ronaldo Yucra Quispe



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quiapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA



Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

ENSAYO DE C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO)

(ASTM D-1883 ASTM D-1557-91 AASHTO T-193)

MUESTRA 02

SUELOS DE	SUBRASANTE
PROFUNDIDAD	: 0.60 mt.
VOLUMEN DEL SUELO	: 2323.46 cc
MÉTODO COMPACT.	ASTM D-1557-91, C

DATOS DE COMPACTACIÓN

DESCRIPCIÓN	Unid.	MOLDE N° III (12 golpes)	MOLDE N° II (25 golpes)	MOLDE N° I (56 golpes)
N° DE CAPAS		5	5	5
N° DE GOLPES POR CAPA		12	25	56
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	11232	11432	11540
PESO DEL MOLDE	gr	8021	8033	8020
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3211	3399	3520
VOLUMEN DEL SUELO	cc	2323.46	2323.46	2323.46
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.382	1.463	1.515
% DE HUMEDAD (SIN SATURAR)	%	6.75	6.52	5.96
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.295	1.373	1.430

EXPANSIÓN

FECHA	TIEMPO	MOLDE III — Dial / Exp.(mm) / %	MOLDE II — Dial / Exp.(mm) / %	MOLDE I — Dial / Exp.(mm) / %
13/12/2018	0:00 h	0 / 0 / 0%	0 / 0 / 0%	0 / 0 / 0%
14/12/2018	24:00 h	0.4 / 0.4 / 0.31496%	0.33 / 0.33 / 0.25984%	0.13 / 0.13 / 0.10236%
15/12/2018	48:00 h	0.8 / 0.8 / 0.62992%	0.67 / 0.67 / 0.52756%	0.26 / 0.26 / 0.20472%
16/12/2018	72:00 h	1.09 / 1.09 / 0.85827%	0.91 / 0.91 / 0.71654%	0.35 / 0.35 / 0.27559%
17/12/2018	96:00 h	1.25 / 1.25 / 0.98425%	1.04 / 1.04 / 0.8189%	0.4 / 0.4 / 0.31496%

PENETRACIÓN

PENETRACIÓN (mm)	MOLDE III — Esf.(Kg/cm²)	MOLDE II — Esf.(Kg/cm²)	MOLDE I — Esf.(Kg/cm²)
0.63	2.2	3.5	4.5
1.27	3.5	5.8	7.4
1.91	4.7	7.7	9.8
2.54	5.8	9.3	12
3.81	7.7	12.4	15.9
5.09	9.4	15.2	19.5
6.35	10.9	17.7	22.7
7.62	12.4	20.2	25.8
8.84	13.8	22.4	28.6
10.16	15.2	24.7	31.6
CBR (%)	8.20	13.29	17.01

MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.423 gr/cc	HUMEDAD ÓPTIMA	6.52 %
CBR AL 95% DE M.D.S.	11.91 %	CBR AL 100% DE M.D.S.	16.55 %

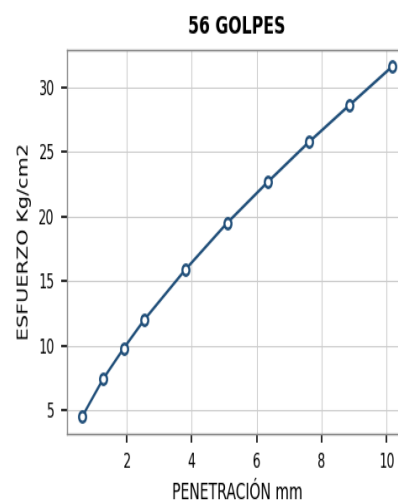
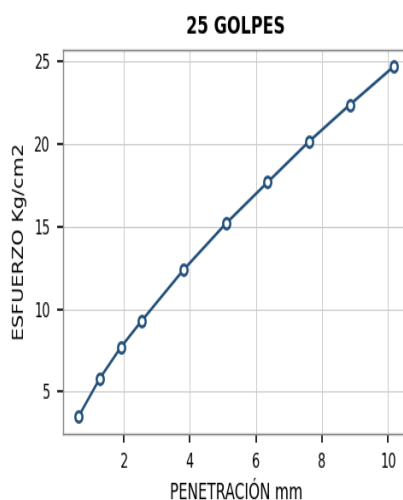
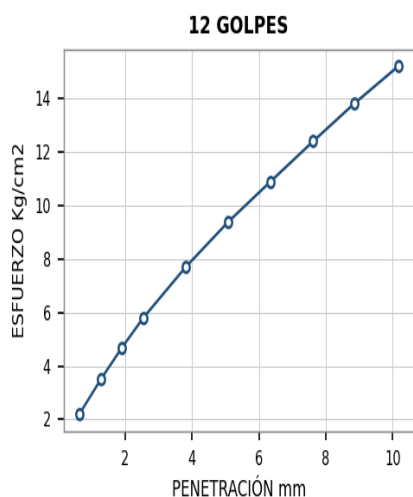
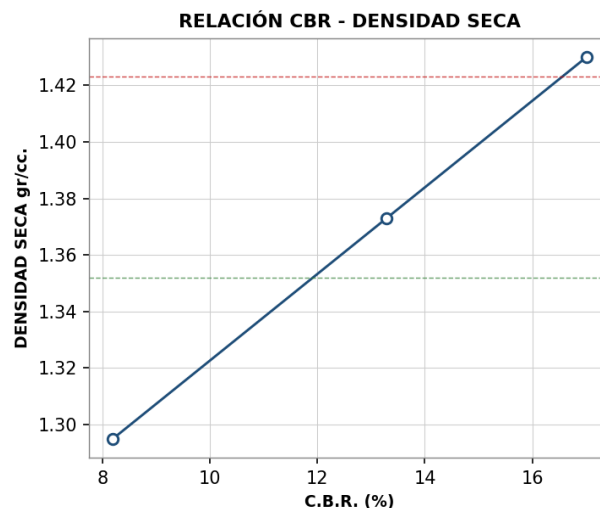
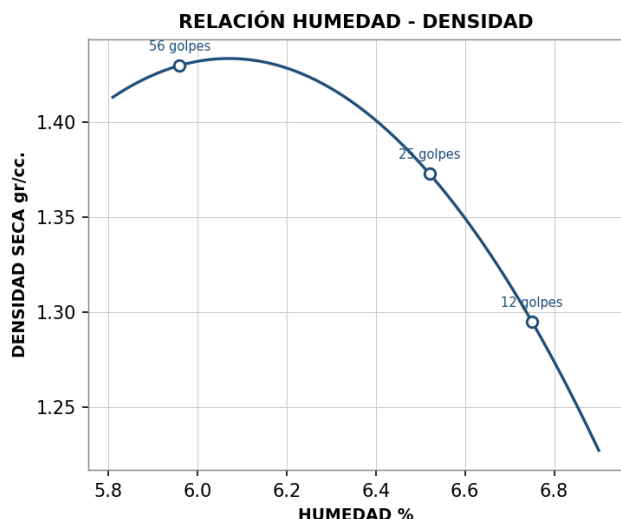
Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quiapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA



Julio Ronald Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

ENSAYO DE C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO)

(ASTM D-1883 ASTM D-1557-91 AASHTO T-193)

MUESTRA 03

SUELOS DE	SUBRASANTE
PROFUNDIDAD	: 0.60 mt.
VOLUMEN DEL SUELO	: 2323.46 cc
MÉTODO COMPACT.	ASTM D-1557-91, C

DATOS DE COMPACTACIÓN				
DESCRIPCIÓN	Unid.	MOLDE N° III (12 golpes)	MOLDE N° II (25 golpes)	MOLDE N° I (56 golpes)
N° DE CAPAS		5	5	5
N° DE GOLPES POR CAPA		12	25	56
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	11302	11507	11619
PESO DEL MOLDE	gr	8021	8033	8020
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3281	3474	3599
VOLUMEN DEL SUELO	cc	2323.46	2323.46	2323.46
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.412	1.495	1.549
% DE HUMEDAD (SIN SATURAR)	%	7.00	6.77	6.21
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.320	1.400	1.458

EXPANSIÓN				
FECHA	TIEMPO	MOLDE III — Dial / Exp.(mm) / %	MOLDE II — Dial / Exp.(mm) / %	MOLDE I — Dial / Exp.(mm) / %
13/12/2018	0:00 h	0 / 0 / 0%	0 / 0 / 0%	0 / 0 / 0%
14/12/2018	24:00 h	0.4 / 0.4 / 0.31496%	0.33 / 0.33 / 0.25984%	0.13 / 0.13 / 0.10236%
15/12/2018	48:00 h	0.8 / 0.8 / 0.62992%	0.67 / 0.67 / 0.52756%	0.26 / 0.26 / 0.20472%
16/12/2018	72:00 h	1.09 / 1.09 / 0.85827%	0.91 / 0.91 / 0.71654%	0.35 / 0.35 / 0.27559%
17/12/2018	96:00 h	1.25 / 1.25 / 0.98425%	1.04 / 1.04 / 0.8189%	0.4 / 0.4 / 0.31496%

PENETRACIÓN			
PENETRACIÓN (mm)	MOLDE III — Esf.(Kg/cm²)	MOLDE II — Esf.(Kg/cm²)	MOLDE I — Esf.(Kg/cm²)
0.63	2.5	4.1	5.2
1.27	4.1	6.7	8.5
1.91	5.5	8.9	11.4
2.54	6.7	10.8	13.9
3.81	8.9	14.4	18.4
5.09	10.9	17.6	22.6
6.35	12.7	20.6	26.3
7.62	14.4	23.4	29.9
8.84	16	26	33.2
10.16	17.7	28.6	36.6
CBR (%)	9.52	15.43	19.72

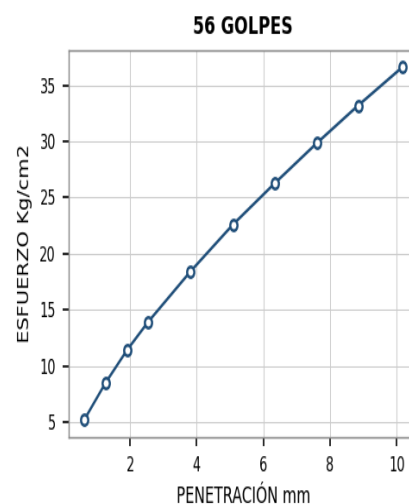
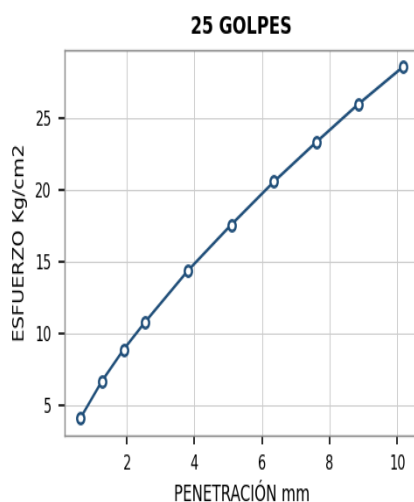
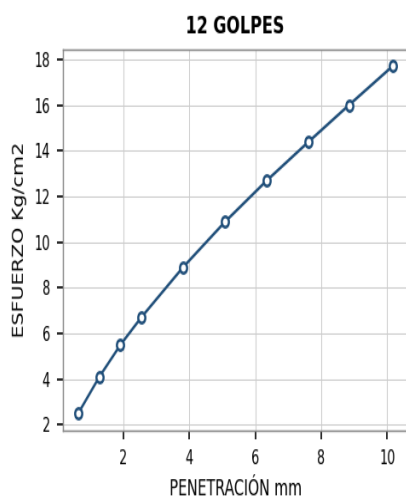
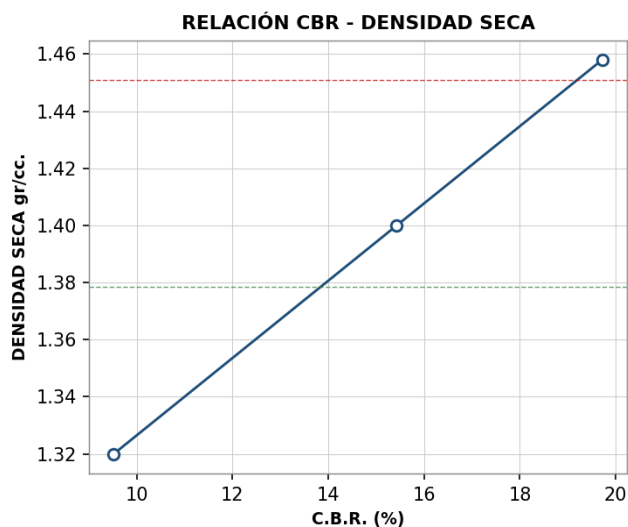
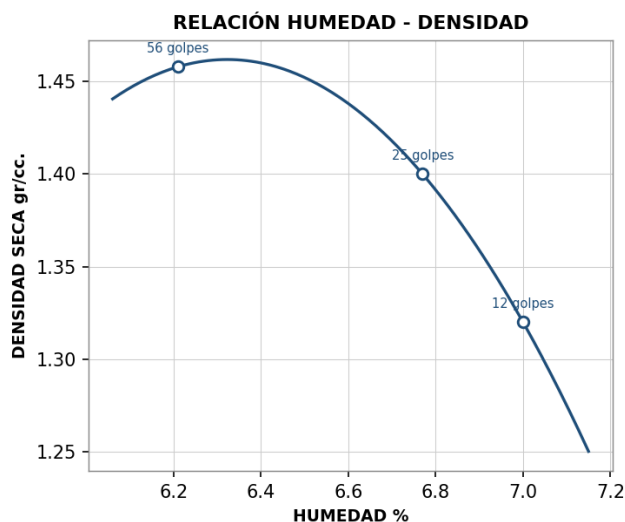
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.451 gr/cc	HUMEDAD ÓPTIMA	6.77 %
CBR AL 95% DE M.D.S.	13.84 %	CBR AL 100% DE M.D.S.	19.20 %

Observaciones



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921
Kevin Quapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP: 208059



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quilapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA



Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 01 CON 1% DE ADITIVO TERRASIL

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° F	TARRO N° G	TARRO N° H
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	24.8	26.4	25.1
SUELO SECO + TARRO	gr	23.1	24.5	23.6
PESO DEL TARRO	gr	17.2	17.9	17.5
PESO DEL AGUA	gr	1.7	1.9	1.5
PESO DEL SUELO SECO	gr	5.9	6.6	6.1
HUMEDAD %	%	28.81	28.79	24.59
N° DE GOLPES		26	23	20
LÍMITE LÍQUIDO				21.46

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° P1	TARRO N° P2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	9.45	10.2
SUELO SECO + TARRO	gr	9.05	9.78
PESO DEL TARRO	gr	7.1	7.6
PESO DEL AGUA	gr	0.4	0.42
PESO DEL SUELO SECO	gr	1.95	2.18
HUMEDAD %	%	20.51	19.27
LÍMITE PLÁSTICO			11.72
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			9.74

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 02 CON 1% DE ADITIVO TERRASIL

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° A	TARRO N° B	TARRO N° C
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	30.2	31.8	29.5
SUELO SECO + TARRO	gr	27.6	28.9	27
PESO DEL TARRO	gr	18.1	18.6	17.9
PESO DEL AGUA	gr	2.6	2.9	2.5
PESO DEL SUELO SECO	gr	9.5	10.3	9.1
HUMEDAD %	%	27.37	28.16	27.47
N° DE GOLPES		27	24	21
LÍMITE LÍQUIDO				28.17

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° Q1	TARRO N° Q2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	11.3	10.85
SUELO SECO + TARRO	gr	10.65	10.28
PESO DEL TARRO	gr	8	7.75
PESO DEL AGUA	gr	0.65	0.57
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.65	2.53
HUMEDAD %	%	24.53	22.53
LÍMITE PLÁSTICO			18.21
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			9.96

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 03 CON 1% DE ADITIVO TERRASIL

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° X	TARRO N° Y	TARRO N° Z
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	25.6	27.1	26.3
SUELO SECO + TARRO	gr	23.8	25	24.4
PESO DEL TARRO	gr	16.9	17.4	17.1
PESO DEL AGUA	gr	1.8	2.1	1.9
PESO DEL SUELO SECO	gr	6.9	7.6	7.3
HUMEDAD %	%	26.09	27.63	26.03
N° DE GOLPES		26	22	20
LÍMITE LÍQUIDO				23.01

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° R1	TARRO N° R2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	9.95	10.6
SUELO SECO + TARRO	gr	9.48	10.08
PESO DEL TARRO	gr	7.3	7.65
PESO DEL AGUA	gr	0.47	0.52
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.18	2.43
HUMEDAD %	%	21.56	21.4
LÍMITE PLÁSTICO			13.56
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			9.45

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quisapaza Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 01 CON 2% DE ADITIVO TERRASIL

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° F	TARRO N° G	TARRO N° H
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	28.9	30.1	29.5
SUELO SECO + TARRO	gr	26.7	27.6	27.1
PESO DEL TARRO	gr	18.2	18.6	18.4
PESO DEL AGUA	gr	2.2	2.5	2.4
PESO DEL SUELO SECO	gr	8.5	9	8.7
HUMEDAD %	%	25.88	27.78	27.59
N° DE GOLPES		26	23	20
LÍMITE LÍQUIDO				26.40

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° P1	TARRO N° P2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	11.05	10.6
SUELO SECO + TARRO	gr	10.4	10.05
PESO DEL TARRO	gr	7.8	7.55
PESO DEL AGUA	gr	0.65	0.55
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.6	2.5
HUMEDAD %	%	25	22
LÍMITE PLÁSTICO			18.54
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			7.86

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 02 CON 2% DE ADITIVO TERRASIL

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° A	TARRO N° B	TARRO N° C
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	27.6	29.2	28.1
SUELO SECO + TARRO	gr	25.5	26.8	25.9
PESO DEL TARRO	gr	17.8	18.3	18
PESO DEL AGUA	gr	2.1	2.4	2.2
PESO DEL SUELO SECO	gr	7.7	8.5	7.9
HUMEDAD %	%	27.27	28.24	27.85
N° DE GOLPES		27	24	21
LÍMITE LÍQUIDO				25.89

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° Q1	TARRO N° Q2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	10.8	11.3
SUELO SECO + TARRO	gr	10.18	10.65
PESO DEL TARRO	gr	7.65	7.95
PESO DEL AGUA	gr	0.62	0.65
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.53	2.7
HUMEDAD %	%	24.51	24.07
LÍMITE PLÁSTICO			18.53
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			7.35

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

(ASTM D-424 D-4318 / AASHTO T-90)

MUESTRA 03 CON 2% DE ADITIVO TERRASIL

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° X	TARRO N° Y	TARRO N° Z
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	24.8	26.3	25.4
SUELO SECO + TARRO	gr	23.1	24.3	23.6
PESO DEL TARRO	gr	16.9	17.5	17.1
PESO DEL AGUA	gr	1.7	2	1.8
PESO DEL SUELO SECO	gr	6.2	6.8	6.5
HUMEDAD %	%	27.42	29.41	27.69
N° DE GOLPES		26	22	20
LÍMITE LÍQUIDO				22.71

FÓRMULA: $LL = W_n \times (N/25)^{0.121}$

Donde: LL = Límite Líquido | W_n = Contenido de Humedad Promedio (%) | N = Número de Golpes

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	Unid.	TARRO N° R1	TARRO N° R2
SUELO HÚMEDO + TARRO	gr	9.65	10.15
SUELO SECO + TARRO	gr	9.18	9.62
PESO DEL TARRO	gr	7	7.35
PESO DEL AGUA	gr	0.47	0.53
PESO DEL SUELO SECO	gr	2.18	2.27
HUMEDAD %	%	21.56	23.35
LÍMITE PLÁSTICO			14.97
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			7.74

Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC: 20613137921

Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL
CIP. 308059



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

PRUEBA PROCTOR MODIFICADO — RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD

(MÉTODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO A)

MUESTRA 01 CON 1% DE ADITIVO TERRASIL

VOLUMEN DEL MOLDE	2067 cc
GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5
PESO DEL MOLDE	6000 gr

DESCRIPCIÓN	Unid.	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	9210	9336	9409	9437	9405
PESO DEL MOLDE	gr	6000	6000	6000	6000	6000
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3210	3336	3409	3437	3405
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.553	1.614	1.649	1.663	1.647
% DE HUMEDAD (PROMEDIO)	%	3.72	5.42	7.02	8.92	10.62
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.497	1.531	1.541	1.527	1.489

DESCRIPCIÓN	Unid.	CÁPSULA N° 1	CÁPSULA N° 2	CÁPSULA N° 3	CÁPSULA N° 4	CÁPSULA N° 5
SUELO HÚMEDO + CÁPSULA	gr	433.64	455.96	478.38	502.56	526.43
SUELO SECO + CÁPSULA	gr	419.50	434.55	449.60	464.65	479.70
PESO DEL AGUA	gr	14.14	21.41	28.78	37.91	46.73
PESO DE LA CÁPSULA	gr	39.50	39.55	39.60	39.65	39.70
PESO DEL SUELO SECO	gr	380.00	395.00	410.00	425.00	440.00
% DE HUMEDAD	%	3.72	5.42	7.02	8.92	10.62

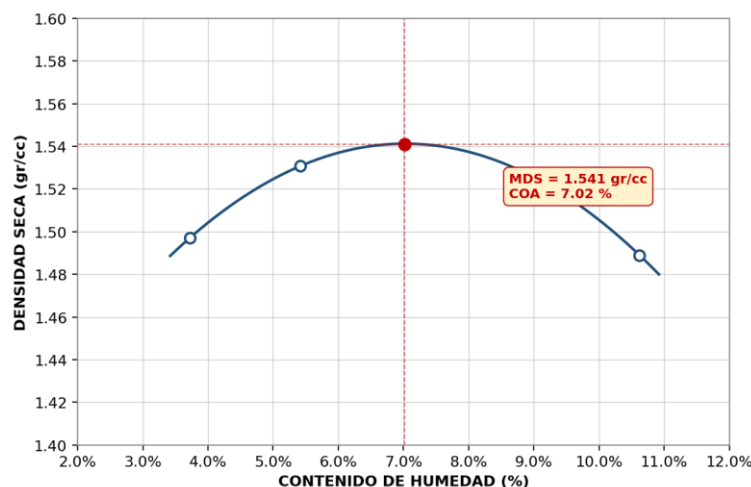
MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)

1.541 gr/cc

CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (COA)

7.02 %

CURVA DE COMPACTACIÓN



Observaciones: J & M S.A.C.
RUC: 20925197921



Keshi Quilapaza Ortiz

Quispe



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

PRUEBA PROCTOR MODIFICADO — RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD

(MÉTODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO A)

MUESTRA 02 CON 1% DE ADITIVO TERRASIL

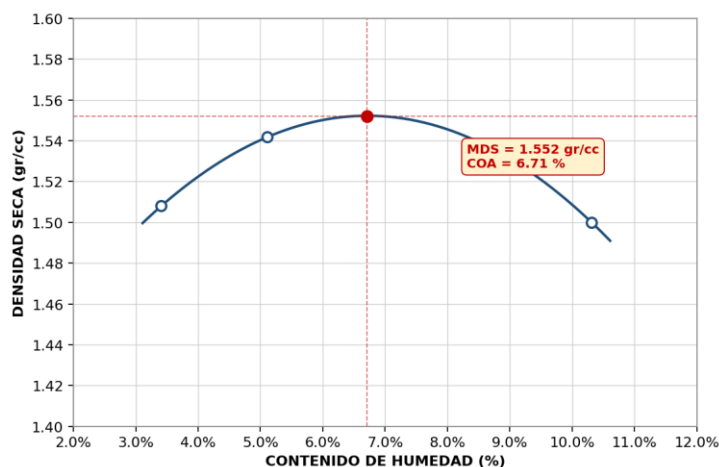
VOLUMEN DEL MOLDE	2067 cc
GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5
PESO DEL MOLDE	6000 gr

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	9224	9350	9423	9452	9421
PESO DEL MOLDE	gr	6000	6000	6000	6000	6000
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3224	3350	3423	3452	3421
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.560	1.621	1.656	1.670	1.655
% DE HUMEDAD (PROMEDIO)	%	3.41	5.11	6.71	8.61	10.31
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.508	1.542	1.552	1.538	1.500

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	CÁPSULA N° 1	CÁPSULA N° 2	CÁPSULA N° 3	CÁPSULA N° 4	CÁPSULA N° 5
SUELO HÚMEDO + CÁPSULA	gr	432.31	454.58	476.96	501.09	524.91
SUELO SECO + CÁPSULA	gr	419.35	434.40	449.45	464.50	479.55
PESO DEL AGUA	gr	12.96	20.18	27.51	36.59	45.36
PESO DE LA CÁPSULA	gr	39.35	39.40	39.45	39.50	39.55
PESO DEL SUELO SECO	gr	380.00	395.00	410.00	425.00	440.00
% DE HUMEDAD	%	3.41	5.11	6.71	8.61	10.31

MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)	1.552 gr/cc	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (COA)	6.71 %
----------------------------	-------------	-----------------------------------	--------

CURVA DE COMPACTACIÓN



Observaciones:



GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC/20613137921

Kevin Quispe Ortiz

Julio Ronaldo Yucra Quispe



PROYECTO : INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

SOLICITANTE : Bach. WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

UBICACIÓN : AV. LOS VIRREYES

LUGAR : JULIACA

FECHA : JULIO DEL 2025

PRUEBA PROCTOR MODIFICADO — RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD

(MÉTODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO A)

MUESTRA 03 CON 1% DE ADITIVO TERRASIL

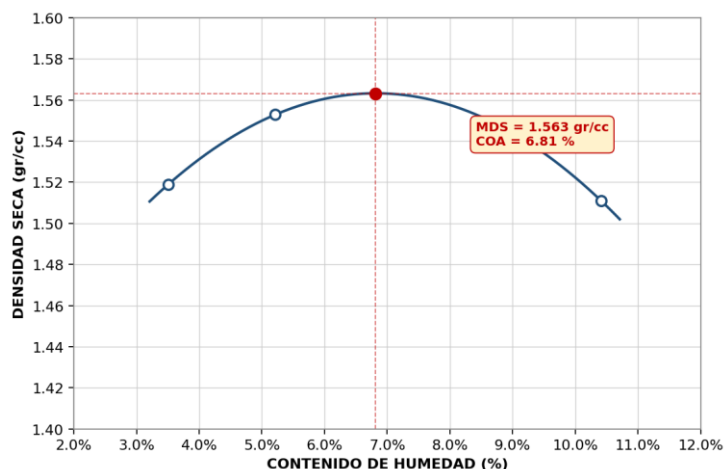
VOLUMEN DEL MOLDE	2067 cc
GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5
PESO DEL MOLDE	6000 gr

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE	gr	9251	9377	9451	9480	9449
PESO DEL MOLDE	gr	6000	6000	6000	6000	6000
PESO DEL SUELO HÚMEDO	gr	3251	3377	3451	3480	3449
DENSIDAD DEL SUELO HÚMEDO	gr/cc	1.573	1.634	1.669	1.683	1.668
% DE HUMEDAD (PROMEDIO)	%	3.51	5.21	6.81	8.71	10.41
DENSIDAD DEL SUELO SECO	gr/cc	1.519	1.553	1.563	1.549	1.511

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
DESCRIPCIÓN	Unid.	CÁPSULA N° 1	CÁPSULA N° 2	CÁPSULA N° 3	CÁPSULA N° 4	CÁPSULA N° 5
SUELO HÚMEDO + CÁPSULA	gr	433.04	455.33	477.72	501.87	525.70
SUELO SECO + CÁPSULA	gr	419.70	434.75	449.80	464.85	479.90
PESO DEL AGUA	gr	13.34	20.58	27.92	37.02	45.80
PESO DE LA CÁPSULA	gr	39.70	39.75	39.80	39.85	39.90
PESO DEL SUELO SECO	gr	380.00	395.00	410.00	425.00	440.00
% DE HUMEDAD	%	3.51	5.21	6.81	8.71	10.41

MÁXIMA DENSIDAD SECA (MDS)	1.563 gr/cc	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD (COA)	6.81 %
----------------------------	-------------	-----------------------------------	--------

CURVA DE COMPACTACIÓN



Observaciones: GEOESTUDIO J & M S.A.C.
RUC/20613137921



Kevin Quispe Ortiz
TÉCNICO LABORATORISTA

Julio Ronaldo Yucra Quispe
INGENIERO CIVIL



ANEXO 1 FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital ☒

Fecha de entrega: 08-06-26

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: WILLIAMS FRAMS QUENTA APAZA

Dirección: JR SAN FRANCISCO DE ASIS 106

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 75981527

Teléfono: 987838393 email: williamsquenta09@gmail.com

Nombres y Apellidos: _____

Dirección: _____

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____

Teléfono: _____ email: _____

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA CIVIL

Título o Grado Académico a optar: INGENIERO CIVIL

Asesor: M.Sc. JESUS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación ☐ Tesis ☒ Trabajo de Suficiencia Profesional ☐ Trabajo Académico ☐

Título: INFLUENCIA DEL USO DE ADITIVO TERRASIL EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR LA
SUBRASANTE CON FINES DE PAVIMENTACIÓN EN LA REGIÓN DE PUNO 2025

Palabras claves, (3 a 5 términos): Terrasil, estabilización, subrasante, suelos plasticos.

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1, 2}?

1, 2

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entre otros relacionados.

² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

☐ Bachiller ☒ Título ☐ 2da Especialidad ☐ Maestría ☐ Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

- ☒ Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- ☐ Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____
- ☐ No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- ☐ Sí autorizo
- ☒ No autorizo

Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción "internacional" o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción "internacional" emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción "internacional" goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

☐

Internacional

☒

Nacional

Línea de investigación: TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN – P17

Firma de Autor



huella digital

04 – Junio – 2026

Fecha