



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



**NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE
SUELOS PARA SUBRASANTE**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FABIOLA NADIA RAMOS QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

A Dios

Por su infinito amor y bondad. A quien rindo mi vida entera y deposito toda mi confianza.

A mis queridos padres

***Mario y Doris** por todo el amor, la confianza, paciencia, comprensión y apoyo incondicional en mis estudios.*

A mis hermanas

*Claudia, Laura, Sara y Gabriela.
Que llenaron de alegría mi vida.*

Fabiola Nadia RAMOS QUISPE



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, salud, sabiduría e inteligencia. Por estar siempre conmigo, moldear mi vida y darme la fortaleza en mi proceso de alcanzar esta meta de concluir mis estudios de pregrado.

A mis padres, por inculcarme principios, valores e impulsarme a ser cada día mejor. Por sus oraciones, por ser el pilar y el soporte emocional en mi vida

A mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano, por haberme dado la oportunidad de formarme íntegramente en el camino de esta hermosa carrera. Por haberme dado grandes satisfacciones como estudiante y como persona. Mi profundo agradecimiento por ser parte de esta gran casa de estudios.

A mi Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por mi formación académica profesional en sus aulas durante años de esfuerzo, sacrificio, constancia, dedicación, noches interminables y grandes momentos inolvidables de alegría que me llevo, para recorrer una nueva etapa en mi vida.

A mis jurados de tesis Dr. Cesar Edwin Guerra Ramos, M.Sc. Mariano Roberto García Loayza e Ing. Jose Luis Cutipa Arapa. Por sus conocimientos, experiencias y sus recomendaciones.

A mi Director de tesis Dr. Samuel Huaquisto Cáceres, asesoramiento, dirección y confianza en el desarrollo y culminación de mi investigación.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por sus valiosas enseñanzas y conocimientos impartidos en las aulas universitarias.

A la empresa BREM Environmental Solutions S.A.C. por proporcionarme el producto nanotecnológico terrasil.

A las instalaciones del laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la FICA-UNA, al Bach. Deywid W. Marron Machaca, por su orientación en el laboratorio.

A mis apreciados amigos y compañeros de la EPIC, por compartir conocimientos, experiencias, anécdotas y alegrías en mi vida universitaria.

A mis hermanas y demás familiares, por el aliento y constante motivación.

Fabiola Nadia RAMOS QUISPE



ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 16

1.1.1. Problema General 16

1.1.2. Problema Específico 16

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... 16

1.2.1. Hipótesis General..... 16

1.2.2. Hipótesis Específico 17

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... 17

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 17

1.4.1. Objetivo General..... 17

1.4.2. Objetivos Específicos 18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... 19



2.2. BASES TEÓRICAS	24
2.2.1. Pavimento	24
2.2.2. Subrasante	24
2.2.3. Estabilización de suelos	24
2.2.4. Estabilización Mecánica	25
2.2.5. Estabilización Química	27
2.2.6. Estabilización a base de nanotecnología con Terrasil.	29
2.2.7. Aprobación de Normas referentes a estabilizaciones químicas en el Perú... 32	
2.2.8. Criterios para evaluación de subrasante.....	33
2.2.9. Pruebas de laboratorio	34
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	44
3.2. MATERIALES UTILIZADOS	45
3.2.1. Suelo de consistencia blanda.	45
3.2.2. Aditivo químico Terrasil.....	46
3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.....	47
3.3.1. Muestra de suelo.	47
3.3.2. Aditivo químico Terrasil.....	47
3.4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS PARA USO VIAL DEL SUELO	
NATURAL.....	47
3.4.1. Análisis Granulométrico	47
3.4.2. Humedad Natural	48
3.4.3. Limite Líquido	49
3.4.4. Limite Plástico	50



3.4.5. Índice de plasticidad IP	50
3.4.6. Clasificación de Suelos	51
3.4.7. Proctor Modificado	51
3.4.8. Valor Relativo De Soporte (CBR)	52
3.4.9. Expansión.....	53
3.4.10. Compresión Simple.....	54
3.5. ENSAYOS CON EL AGENTE ESTABILIZADOR - TERRASIL	55
3.5.1. LÍMITES DE CONSISTENCIA	55
3.5.2. Valor Relativo De Soporte (CBR)	58
3.5.3. Resistencia a la Compresión Simple (UCS)	63
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. RESULTADOS DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	65
4.1.1. Resultados del Límite Líquido.....	65
4.1.2. Resultados de Límite Plástico.....	69
4.1.3. Resultados del Índice de Plasticidad.....	70
4.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA	71
4.3. RESULTADOS DEL CBR.....	72
4.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR	73
4.5. RESULTADOS DE EXPANSIÓN	74
4.6. DISCUSIÓN DE LO RESULTADOS DE LA EXPANSIÓN	74
4.7. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS).....	76



4.8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA UCS.....	77
4.9. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA.....	80
V. CONCLUSIONES	85
VI. RECOMENDACIONES.....	86
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
ANEXOS.....	89

TEMA: Estabilización de Suelos

ÁREA: Transportes

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de agosto del 2022



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Normativa referente a estabilización química en el Perú.....	32
Tabla 2:	Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad	33
Tabla 3:	Categorías de Subrasante	33
Tabla 4:	Resistencia a la compresión no confinada	33
Tabla 5:	Tamaño de la serie de tamices.	35
Tabla 6:	Lecturas de Carga	41
Tabla 7:	Consistencia del Suelo	43
Tabla 8:	Propiedades del suelo natural utilizado para la investigación.	46
Tabla 9:	Características del aditivo nanotecnológico - Terrasil.....	46
Tabla 10:	Compresión Simple del suelo natural.	54
Tabla 11:	Resultados de Límite Líquido	65
Tabla 12:	Resultados de Límite Plástico.....	69
Tabla 13:	Resultados del Índice de Plasticidad.....	70
Tabla 14:	Límites de consistencia.....	71
Tabla 15:	Índice de Plasticidad – Características.....	72
Tabla 16:	Dosificación de Terrasil Vs CBR.	72
Tabla 17:	Categorías de Subrasante.	74
Tabla 18:	Tiempo (hr) Vs Expansión (%).	74
Tabla 19:	Resultados de compresión simple.....	77
Tabla 20:	Dosificación de Terrasil Vs UCS.....	77
Tabla 21:	Consistencia del suelo.....	78
Tabla 22:	Promedio de UCS.	79
Tabla 23:	Recurso mano de obra - Cantera.....	81
Tabla 24:	Recurso materiales - Cantera.	81



Tabla 25: Recurso equipos - Cantera.	81
Tabla 26: Recurso mano de obra - Terrasil.	82
Tabla 27: Recurso materiales - Terrasil.	82
Tabla 28: Recurso equipo - Terrasil.	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Aspecto de gotas de agua depositadas sobre suelos tratados con Terrasil.	31
Figura 2:	Límites de Atterberg.....	36
Figura 3:	Ubicación geográfica del estudio - Google Earth.....	44
Figura 4:	Muestra extraída de una calicata, del Km 11+400 de un tramo de la carretera Puno - Moquegua.	45
Figura 5:	Ensayo Análisis Granulométrico. (a) Lavado de muestra. (b) Tamizado.	48
Figura 6:	Curva granulométrica del suelo natural.....	48
Figura 7:	Límite Líquido.....	50
Figura 8:	Relación Humedad-Densidad del suelo natural.....	52
Figura 9:	Tiempo (hr) Vs Expansión (%)	54
Figura 10:	Límites de Consistencia. (a) Dosificación de las muestras. (b) curado de las muestras dentro de una caja de tecnopor.	56
Figura 11:	Ensayo Límite Líquido. (a)Muestra de suelo mezclado con dosis de terrasil. (b) Ensayo de Límite Líquido en la cuchara Casagrande.....	57
Figura 12:	Ensayo límite plástico. (a) Rolado sobre el vidrio esmerilado. (b) Bastones de 3.2 mm.	58
Figura 13:	Preparación de la muestra con Terrasil para realizar CBR. (a) Terrasil agregado al CHO. (b) Mezcla de CHO – Terrasil, suelo y agua.	59
Figura 14:	Ensayo CBR. (a) Compactado de la muestra. (b) Enrasado de la muestra con la regla metálica.....	60
Figura 15:	Curado de las muestras. (a) Colocado de muestras en baldes con sus respectivas dosificaciones. (b)Muestras en baldes cerrados herméticamente por 7 días.	61



Figura 16: Ensayo CBR. (a) Colocado del vástago graduable y placas metálicas. (b) Moldes sumergidos en agua por 96 horas. (c) lectura del deformímetro para medir hinchamiento.	62
Figura 17: Ensayo CBR. (a) Vertido del agua retenida en la parte superior del molde durante 15 minutos. (b) Muestra sometida a la prensa CBR.	63
Figura 18: Ensayo de Compresión Simple. (a) Curado de probetas remoldeadas en caja de tecnopor por un periodo de 7 días. (b) Probetas sometidas a la máquina de compresión inconfiada.	64
Figura 19: Límite Líquido para dosificación de 0.0 L/m ³ (suelo natural).....	66
Figura 20: Límite Líquido para dosificación de 0.2 L/m ³	66
Figura 21: Límite Líquido para dosificación de 0.8 L/m ³	67
Figura 22: Límite Líquido para dosificación de 1.4 L/m ³	67
Figura 23: Límite Líquido para dosificación de 2.0 L/m ³	68
Figura 24: Reducción del Límite Líquido.....	68
Figura 25: Aumento del Límite Plástico.	69
Figura 26: Reducción del Índice de Plasticidad.....	70
Figura 27: Límites de consistencia.....	71
Figura 28: Dosificación de Terrasil Vs CBR.	73
Figura 29: Tiempo (hr) Vs Expansión (%)	75
Figura 30: Contenido de Terrasil (Lt/m ³) Vs Expansión (%).....	76
Figura 31: Dosificación de Terrasil Vs UCS	78
Figura 32: Dosificación de Terrasil Vs UCS.	79
Figura 33: Costo por m ³ de subrasante.	84



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

UNA	: Universidad Nacional del Altiplano
CBR	: California Bearing Ratio
MTC	: Ministerios de Transportes y Comunicaciones
NTP	: Norma Técnica Peruana
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
IG	: Índice de grupo
LL	: Límite Líquido
LP	: Límite Plástico
IP	: Índice de Plasticidad
ASTM	: American Society for Testing Materials
MDS	: Máxima Densidad Seca
CHO	: Contenido de humedad óptimo
UCS	: Resistencia a la compresión no confinada.



RESUMEN

Durante la ejecución de proyectos viales, el ingeniero civil se encuentra con diversos suelos, estos con problemas particulares; tales como, la presencia de suelos blandos, suelos con baja resistencia reflejados en el valor de CBR y la Resistencia a Compresión Simple. Frente a estas problemáticas, una de las soluciones es la estabilización de dichos suelos, por lo que esta investigación tiene como objetivo evaluar las propiedades geotécnicas para uso vial, de un suelo fino de consistencia blanda al incorporarle Terrasil, un producto nanotecnológico. La muestra estudiada se obtuvo de una calicata ubicada en el Km 11+400 de un tramo de la carretera Puno – Moquegua, ya que se trata de un suelo blando de baja resistencia, y además, actualmente se observa que dicha carretera no está en buenas condiciones ya que presenta fallas. Se determinó las siguientes propiedades geotécnicas del suelo natural: Contenido de humedad natural, análisis granulométrico, límites de consistencia, Proctor modificado, CBR, y compresión simple. Y se plantea la incorporación del agente estabilizador químico Terrasil en distintas dosificaciones de aplicación 0.2 L/m³, 0.8 L/m³, 1.4 L/m³, y 2.0 L/m³ en peso seco del suelo, estas dosificaciones fueron mezcladas con agua, siendo el contenido de humedad óptima, seguidamente se realizó el curado por 7 días, para luego realizar los ensayos correspondientes como son los límites de consistencia, CBR y compresión simple. Los resultados de los ensayos mostraron una disminución en el Índice de Plasticidad, incremento en el CBR, incidencia de forma positiva en la expansión del suelo e incremento en la resistencia a la compresión no confinada UCS. Todo ello con respecto al suelo natural. Por lo tanto, se concluye que el uso de Terrasil como estabilizador a base de nanotecnología mejora las propiedades geotécnicas de un suelo blando de subrasante.

Palabras Clave: Nanotecnología, terrasil, estabilización de suelos, subrasante.



ABSTRACT

During the execution of road projects, the civil engineer encounters various soils, these with particular problems; such as the presence of soft soils, soils with low resistance reflected in the CBR value and the Simple Compression Resistance. Faced with these problems, one of the solutions is the stabilization of these soils, so this research aims to evaluate the geotechnical properties for road use, of a fine soil with a soft consistency by incorporating Terrasil, a nanotechnological product. The sample studied was obtained from a pit located at Km 11+400 of a section of the Puno – Moquegua highway, since it is a soft soil of low resistance, and furthermore, it is currently observed that said highway is not in good condition. Conditions as it has faults. The following geotechnical properties of the natural soil were determined: natural moisture content, granulometric analysis, consistency limits, modified Proctor, CBR, and simple compression. And the incorporation of the chemical stabilizer agent Terrasil is proposed in different application dosages 0.2 L/m³, 0.8 L/m³, 1.4 L/m³, and 2.0 L/m³ in dry weight of the soil, these dosages were mixed with water, being the optimum moisture content, followed by curing for 7 days, to then carry out the corresponding tests such as consistency limits, CBR and simple compression. The results of the tests showed a decrease in the Plasticity Index, an increase in the CBR, a positive incidence in the expansion of the soil and an increase in the unconfined compressive strength UCS. All this with respect to the natural ground. Therefore, it is concluded that the use of Terrasil as a nanotechnology-based stabilizer improves the geotechnical properties of a soft subgrade soil.

Keywords: Nanotechnology, terrasil, soil stabilization, subgrade.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el Perú se tiene zonas de selva, en los que la mayor parte de las carreteras aún no están pavimentadas, esto debido a muchos factores. Una de ellas es porque en esas zonas generalmente predomina la presencia de suelos finos: limos y arcillas. Estos suelos de consistencia blanda, donde su Valor Relativo de Soporte (CBR) y Resistencia a Compresión Simple no son suficientes para utilizar como suelo de cimentación para los pavimentos. Superando así la solución tradicional, que es quitar toda esa capa de suelo blando y reemplazar con material de préstamo, que generalmente en zonas de selva, no se tiene cerca canteras con características deseables. Por lo que se tendría que recurrir grandes distancias para conseguirlos, y esto se traduciría en muy altos costos de traslado de material de cantera. Hoy en día el papel de los agentes de nanomateriales está aumentando en diversas aplicaciones; para el mejoramiento de suelos se encuentran disponibles varias técnicas convencionales de mejora del suelo, pero los suelos tratados con nanomateriales demostraron también ser eficientes. La alternativa que se plantea en esta investigación es la estabilización con la aplicación de nanotecnología usando nanomateriales como el Terrasil, ya que con esta presenta un mejor resultado en resistencia. Los nanomateriales interactúan en tamaños a nivel nano, lo que permite adquirir características y capacidades muy diferentes con propiedades totalmente nuevas a las que se presentan a nivel macro. Se investigará el efecto del nanomaterial en las propiedades geotécnicas para uso vial de un suelo de consistencia blanda. Se realizarán pruebas para estudiar el cambio en el comportamiento básico del suelo. Este estudio investiga la eficiencia del agente estabilizador Terrasil para mejorar las propiedades geotécnicas de un suelo blando para uso vial. El mejoramiento de suelos en pavimentos es un reto aún vigente y permanente



que va a la par con el avance de la tecnología. La estabilización de amplia variedad de suelos blandos presentes en todo el mundo y en el Perú, es un reto para los ingenieros que aún no se ha solucionado, por eso a nivel mundial los investigadores siguen intentando encontrar nuevos productos que puedan solucionar este inconveniente. Prueba de ello es que en la actualidad existen investigaciones con respecto al producto nanotecnológico que es el terrasil.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Problema General

- ¿Cómo será el comportamiento de las propiedades geotécnicas para uso vial, de un suelo fino de consistencia blanda al incorporarle terrasil, un producto nanotecnológico?

1.1.2. Problema Específico

- ¿Cuál será la dosificación óptima del agente estabilizador, terrasil, requerido en un suelo blando de subrasante?
- ¿Cómo será el comportamiento del valor relativo de soporte (CBR), expansión, resistencia a la compresión simple (UCS) e índice de plasticidad (IP) de un suelo blando de subrasante, al incorporarle terrasil, como agente estabilizador?

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Hipótesis General

- Las propiedades geotécnicas para uso vial, de un suelo fino de consistencia blanda al incorporarle Terrasil, un producto nanotecnológico, tienen mejora aceptable.



1.2.2. Hipótesis Específico

- La dosificación óptima del agente estabilizador, terrasil, requerido en un suelo blando de subrasante, se encuentra entre los valores de 0.2 a 2.0 Kg/m³.
- El comportamiento del valor relativo de soporte (CBR), expansión, resistencia a la compresión simple (UCS) e índice de plasticidad (IP) de un suelo blando de subrasante, al incorporarle terrasil, como agente estabilizador, tienen mejora aceptable.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación tiene como finalidad resolver los problemas críticos en los suelos de fundación (subrasante), tales como: pérdida de capacidad portante, agrietamientos debido a expansión y contracción durante los ciclos de humedad sequedad, incapacidad de trabajar en suelos expansivos. Asimismo, los ingenieros en el Perú acostumbran a desperdiciar los materiales que no cumplen con la calidad requerida en el sitio de la construcción por ello se ven obligados a introducir en los proyectos el transporte de suelos desde canteras, lo que siempre resulta una opción costosa y complicada. Esta problemática se resuelve con el mejoramiento de suelos locales, mediante estabilizaciones convencionales, siendo mi propuesta la estabilización con la aplicación de nanotecnología usando nanomateriales, ya que esta tendrá un mejor resultado en resistencia y durabilidad. Los aditivos químicos representan una solución que podría usarse para superar el problema del suelo blando.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar las propiedades geotécnicas para uso vial, de un suelo fino de consistencia blanda al incorporarle terrasil, un producto nanotecnológico.



1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar la dosificación óptima del agente estabilizador, terrasil, requerido en un suelo blando de subrasante.
- Determinar el comportamiento del valor relativo de soporte (CBR), expansión, resistencia a la compresión simple (UCS) e índice de plasticidad (IP) de un suelo blando de subrasante, al incorporarle terrasil, como agente estabilizador.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Majeed y Taha (2012), en su estudio sobre el efecto del tratamiento con nanomateriales en las propiedades geotécnicas de un suelo blando de Penang, usaron una muestra de suelo del campus de la universidad de Malasia, el tipo de suelo que se uso de acuerdo al SUCS es OL, dicho suelo analizaron con 3 diferentes tipos de aditivos nano óxido de cobre, nano óxido de magnesio y nano arcilla. Se añadió varias cantidades de nanomateriales de 0.05 % a 1% al suelo blando, para estudiar su efecto en los límites de consistencia, compactación y resistencia a la compresión no confinada. Con la adición de los nanomateriales se obtienen resultados mejorando las propiedades geotécnicas del suelo blando de Penang. La máxima resistenica a la compresión no confinada fue alcanzada con el suelo tratado con nanoarcilla, también hubo reducciones en los índices de plasticidad. Por lo tanto la adición de los nanomateriales, incluso en dosis bajas, puede realzar sus propiedades.

Taha et al. (2015), en su investigación sobre tratamiento de suelos blandos con nanoóxido de magnesio, usaron un suelo residual obtenido del campus de la universidad nacional de Malasia. Se investiga el efecto del nanoóxido de magnesio en algunas propiedades geotécnicas de un suelo local identificado de acuerdo al SUCS como CL, Se usaron cuatro diferentes contenidos de agua remoldeados, estos contenidos de agua representan las condiciones óptimas. El suelo se mezcló con nano óxido de magnesio que oscila entre 0 y 1.0 % en peso seco del suelo. Se realizaron límites de consistencia y pruebas de compresión no confinada para estudiar el cambio en el comportamiento básico



del suelo. Se consideró tiempos de curado de 1 día, 7 días, 21 días y 28 días. Los resultados del estudio indicaron que el índice de plasticidad exhibe una reducción significativa en comparación con el suelo no tratado, la reducción es proporcional al tiempo de curado y a la dosis del nanoóxido de magnesio. La resistencia a la compresión no confinada del suelo tratado aumentó significativamente con el tiempo al aumentar el porcentaje de nanoóxido de magnesio. Se evidenció y demostró que se debe trabajar mejor con el contenido de humedad óptima porque alcanza mejores resistencias. Los resultados también revelaron que la rigidez se desarrolló desde un suelo blando en caso del suelo original hasta un suelo muy rígido para el suelo tratado. Por lo que el uso de nanoóxido de magnesio indujo una mayor capacidad para mejorar las propiedades geotécnicas de un suelo residual tropical.

Meeravali et al. (2020), en su estudio sobre estabilización de arcilla blanda mediante el nanomaterial Terrasil, usaron una muestra de arcilla blanda para el programa de pruebas que se tomó de Champakkulam cerca de la región de Kuttanad en Kerala, se extrajo de una profundidad de 2 m. y se clasificó según SUCS como CH. Se realizaron límites de consistencia, resistencia a la compresión no confinada (UCS) y valor relativo de soporte (CBR). Terrasil se introduce en el suelo arcilloso del 0,02 al 0,15% del peso seco del suelo. El índice de plasticidad se redujo del 31,91% (sin tratar) al 22,24% (tratado). Se afirma que el suelo se vuelve menos plástico con la adición de un nivel óptimo de 0,03% de nanoquímicos en el suelo arcilloso. Por lo que está comprobado que el Terrasil endurece más el suelo. El UCS del suelo aumentó de 31,3 kpa (suelo no tratado) a 75,7 kpa (para suelo óptimo al final de 28 días de curado). El UCS del suelo mezclado con una dosis óptima de 0,03% de producto químico terrasil se mejora aproximadamente un 2,5% más que la resistencia del suelo arcilloso. Esta mejora se debe a la reacción del químico con las partículas del suelo y, como resultado, restringe el



ingreso de agua a la superficie. El valor de resistencia de California Bearing Ratio del suelo mezclado con una dosis óptima de 0,03% de nanoquímico terrasil se mejora aproximadamente tres veces el valor de resistencia de California Bearing Ratio de suelo arcilloso. El análisis SEM muestra que las partículas están más compactas para suelos tratados con nanoquímicos que para suelos no tratados. En conclusión, la mezcla de suelo 1,5% de cemento agregada con 0,03% de terrasil es la proporción óptima de mezcla del suelo, que muestra la resistencia a la compresión inconfiada, el valor menos permeable, el menor asentamiento y los valores altos de CBR.

Karumanchi et al. (2020), en su investigación sobre mejora de los límites de consistencia, densidades específicas y características de permeabilidad de suelos blandos con nanomaterial Nanoarcilla, extrajeron una muestra de Kanigiri- India, a una altura de 1m. por debajo de la superficie del suelo, y el suelo se clasificó como arcilla de baja compresión (CL). El suelo tiene MDS y CHO de 1,62 g / cc y 18,18%, respectivamente. El suelo de arcilla blanda se ha mezclado con un contenido de humedad óptimo, una densidad seca máxima y los porcentajes de nanoarcilla tales como 0.05, 0.10, 0.15, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4 y 5% del peso seco del suelo. Los límites de líquido y plástico cambiaron con la adición de nanoarcilla. Entre todos los porcentajes 0.05, 0.10, 0.15, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4 y 5 % del peso seco del suelo, el porcentaje de 0.15 de nanoarcilla reduce el índice de plasticidad de 21% a 19.5% y mejora la densidad seca máxima de 1.62 a 1.81 kN / m². Las características de resistencia a la compresión no confinada aumentaron de 36 a 128 kN / m² al 0,15% de nanoarcilla en períodos de curado de 18 días. Los espacios porosos del suelo se llenan de partículas de nanoarcilla y se obtiene una resistencia a la compresión mejorada del suelo. El coeficiente de las características de consolidación aumentó con la dosis óptima de nanoarcilla (0.15%) en el periodo de



curado de 18 días, al mismo tiempo, el asentamiento final disminuyó de 4.2 a 1.1 mm. Por lo que se concluye que la dosis óptima de nanoarcilla es de 0.15%.

Kushwaha et al. (2021), en su estudio sobre los efectos del estabilizador iónico y copolímero de base nanoquímica en propiedades del suelo para la construcción de pavimentos, el suelo utilizado para la investigación se ha recogido de una aldea de la región occidental del estado de Rajasthan en la India, identificándose un suelo CL de acuerdo al SUCS. Se utilizó un estabilizador iónico líquido de base nanoquímica junto con un copolímero en un suelo expansivo con un FSI del 57%. El suelo no tratado y el suelo con nueve permutaciones de dosis de estabilizador, copolímero y cemento se probaron para determinar los límites de Attenberg, hinchamiento, características de compactación, CBR y UCS. Se encontró que el suelo tratado tenía IP reducido. Las curvas de compactación también se vieron afectadas por el tratamiento, y hubo reducción en el CHO y aumento en MDS. Como se desprende de los resultados de UCS, con el aumento del tiempo de curado, la resistencia del suelo también aumentó. Los valores de CBR solo se vieron afectados marginalmente por la inclusión de nanoquímicos, pero después de la inclusión de cemento al 3%, CBR experimentó un aumento drástico. Por lo tanto, se puede decir que cuando se aplica en cantidades apropiadas a un suelo adecuado para la estabilización a través de este mecanismo, el suelo tratado podría usarse para aplicaciones de pavimento, especialmente para carreteras de bajo volumen. Por lo tanto, de este estudio se puede concluir que el uso de estabilizadores basados en nanoquímicos mejora las propiedades geotécnicas del suelo para la construcción de pavimentos sujetos a la idoneidad del suelo para el tratamiento, y se recomienda la aplicación de dosis apropiadas de aditivos ya que varía de un suelo a otro.

Hurtado (2020), en su estudio sobre aplicación de organosilano en el comportamiento físico y mecánico de la subrasante en la Av. Los Geranios Huaral, 2020,



extrajeron 2 muestras de 2 calicatas, y el suelo se clasificó de acuerdo al SUCS como un suelo CL, se trabajó con 3 dosificaciones de organosilano 0.08%, 0.13% y 0.18%. En cuanto al índice de plasticidad se observó que cuando se le agregó distintas dosificaciones de organosilano el suelo natural obtuvo cambios ya que se obtuvo un mejor resultado con la dosificación de 0.18 de organosilano, el índice de plasticidad descendió de 10% hasta tener un valor de 2.6 % demostrando una disminución de 7.4 %. Se demostró que el contenido óptimo de humedad cambiaba con la adición de diversas cantidades de organosilano, ocurriendo cambios a medida que se añadían dosis de organosilicio de manera ascendente, comenzando con un contenido óptimo de humedad de 9,2%, que pertenece al suelo patrón sin la adición de organosilano. Se concluyó que el contenido de humedad óptima que mejor se comporta es el que tiene mayor dosificación como es 0.18% de organosilano donde se obtiene un óptimo contenido de humedad de 8.9%. En cuanto al estudio California Bearing Ratio (CBR) se observa que el uso de organosilano en el suelo tiene un impacto positivo ya el valor del CBR aumenta. Por lo que se concluyó que la mejor opción en cuanto al CBR fue la que adquiere al incorporarle 0.18% de organosilano ya que con esa dosificación se obtiene el mejor CBR de todas las dosificaciones que fue de 12.1% al 95% y 16.8 al 100%.

Flores y Flores (2020), estudiaron sobre la influencia que genera en un suelo de sub rasante, de una vía no pavimentada, la adición de encimas orgánicas terrasil y perma zyme como agentes estabilizantes, esto en el departamento de la Libertad, Provincia de Otuzco y distrito de Mache. En este trabajo se realizaron 11 calicatas de las cuales se obtuvieron las muestras para realizar los ensayos de caracterización, del cual se determinó que se trataba, según la clasificación AASHTO, de suelos A-7 en su mayoría y con la clasificación según SUCS obtuvieron: ML, CL, SC, CH. Con respecto a la plasticidad determinaron que se trataba de un suelo con mediana plasticidad. Con respecto al CBR



obtuvieron que todos los suelos en estudio tuvieron mejoras, pasando de la categoría de suelos de subrasante pobre a categorías de regular y buena, incluso uno de ellos, el de clasificación ML pasa a ser categorizada como sub rasante muy buena.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Pavimento

Pavimento se puede definir como una estructura de una o varias capas, el cual se apoya en toda su área. El pavimento debe ser funcional, durante toda su vida útil, para tal objetivo se diseña y construye. En este periodo el pavimento, debe recibir mantenimiento con el objetivo de poder alargar su puesta en servicio. Se emplaza sobre material seleccionado y diseñado, el mismo que esta apto para soportarlo. La función primordial es la de brindar una superficie que resista al desgaste y sea suave al deslizamiento (Vivar, 1995).

2.2.2. Subrasante

Se conoce como subrasante al espesor superior de suelo de cimentación, el mismo que previamente se ha escarificado, nivelado, perfilado y finalmente compactado. Sirve como apoyo a las capas superiores que conforma la estructura del pavimento (Vivar, 1995).

2.2.3. Estabilización de suelos

Cuando se habla de estabilizar un suelo, se refiere también a mejorarlo, que consiste en alterar las propiedades en el mismo lugar en la que se encuentra, para lograr mejorar su propiedad de resistencia y durabilidad, ello para tener un suelo de cimentación de la vía requerido o mejor (Montejo, 2002).

Mayormente se conoce dos técnicas para mejorar las propiedades del suelo, los mismos que se conocen como la estabilización mecánica y la estabilización química.



2.2.4. Estabilización Mecánica

Cuando se habla de estabilización mecánica implica metodologías que aumenten sus propiedades ingenieriles del suelo en cuestión, ello sin la necesidad de adicionarle algún agente o algo que pueda unir las partículas del suelo. En otras palabras, en este procedimiento, no se genera reacciones químicas o de enlace de partículas.

2.2.4.1. Vibroflotación

Se denomina vibroflotación a la técnica mediante el cual se densifica los suelos granulares sueltos que se encuentran en el lugar de la obra en gruesas capas. Para realizar esto, se requiere una unidad vibratoria, el que generalmente tiene un largo de 2.1m. Dicha unidad posee en su interior un peso excéntrico por lo que logra una fuerza centrífuga, y esto permite que la unidad vibratoria tenga vibración horizontal. La unidad vibratoria está dispuesta, tanto en la parte inferior y superior, de aberturas para los chorros de agua. Esta estabilización consiste en poner el chorro en la parte de abajo del Vibroflot dentro del suelo, este chorro de agua permite que la unidad vibratoria se hunda en el suelo, posterior a ello de la parte superior del agujero se vierte el material granular y el agua conduce el material granular con dirección al agujero. La unidad vibratoria se eleva unos 0.3m y vibra, aproximadamente, durante 30 segundos en cada levantamiento. Este proceso densifica el suelo al peso unitario requerido (Das, 2015).

2.2.4.2. Compactación por medios mecánicos

Esta técnica aumenta la compacidad del suelo por medios mecánicos, generalmente rodillos. La compactación in situ puede consistir en elegir un suelo adecuado de préstamo, carga, transporte a obra y vertido, extendido por capas, modificación de la humedad, mezcla del material de préstamo vertido y compactación del suelo de acuerdo con un método especificado o hasta obtener propiedades determinadas.



Los tipos principales de maquinarias de compactación son los rodillos de llantas lisas, los de neumáticos, pata de cabra y los vibratorios (Lambe & Whitman, 2004).

2.2.4.3. Compactación Dinámica

La compactación dinámica es el procedimiento mediante el cual se permite caer, en varios momentos, un gran peso sobre un suelo, ello a intervalos regulares. El martillo con el cual se realiza dicho procedimiento, en cuanto a su peso tiene una variación de 80 a 360 kN, y en relación a la altura de caída tiene variación desde 7.5 hasta 30.5 m. Al caer dicho martillo, genera ondas de tensión los cuales ayudan a la densificación de las partículas de suelo. La compacidad del suelo que se logra en un punto determinado, está relacionado directamente con el peso del martillo, la altura desde la cual se deja caer, y la separación de los puntos en los que impacto dicho martillo (Das, 2015).

2.2.4.4. Blasting

Blasting, denominado también como voladura, es una técnica que se usa para poder densificar a los suelos granulares. Los suelos, con determinados tamaños de granos, que son considerados adecuados para realizar la compactación por la técnica de granallado, son los mismos también para la compactación por vibroflotación. Esta técnica consiste en detonar cargas explosivas, esto a una cierta profundidad del suelo con los poros llenos de agua. La distancia lateral entre carga explosiva puede variar de 3 a 10 m. Para lograr una densificación adecuada, normalmente se requiere, hacer con éxito, entre 3 a 5 detonaciones. Esta técnica se puede emplear para lograr hasta un 80% de la densidad relativa, y que involucra a una profundidad de hasta 20 m sobre una superficie grande. Generalmente las cargas explosivas se disponen, aproximadamente, a una profundidad de dos terceras partes del espesor de la capa de suelo que se desea densificar. (Das, 2015).



2.2.4.5. Precarga

Consiste en colocar una carga en la superficie del terreno, previa a la construcción, con la finalidad de lograr una preconsolidación del terreno de fundación, ya sea que se trate de un suelo blando. Posterior a dicha precarga, el terreno de fundación adquiere características más resistentes y menos compresible, por lo que la capacidad de carga de dicho suelo blando aumenta, y por consiguiente disminuye considerablemente los asentamientos (Lambe & Whitman, 2004).

2.2.4.6. Drenaje

El drenaje es un método de mejora del terreno por disminución de la cantidad y/o presión del agua presente en los poros. Al drenar el agua, presente en los poros, se aumenta la compacidad. Existen muchas técnicas de drenaje como son; drenes verticales de arena, drenes horizontales, zanjas que se extienden a lo largo de una carretera y pozos-dren en una excavación. La electroósmosis, que es aplicar una corriente eléctrica directa, puede favorecer el drenaje. (Lambe & Whitman, 2004).

2.2.5. Estabilización Química

La estabilización química se trata de aplicar ciertos aditivos de naturaleza química, esto con el objetivo de mejorar el comportamiento del suelo. Ello se plantea cuando se requiere reducir la capacidad de expansión, contracción y la plasticidad de los suelos. Cuando se trata de arcillas dispersivas, con la estabilización química se busca flocular sus partículas. Cuando se tiene suelos arcillosos que son complicados de compactar, se podría añadir aditivos químicos para así, ligeramente, dispersar sus partículas y poder ayudar en la densificación (Das, 2015).



2.2.5.1. Estabilización con cal

La estabilizar con cal se adapta a la mayoría de suelos para lograr buenos resultados. La adición de cal tiene como efecto, mejorar las características plásticas de los suelos, del mismo modo mejora de manera significativa la resistencia, así también la adición de la cal, en los suelos cohesivos, baja la susceptibilidad a la presencia del agua esto se evidencia en la reducción de la expansión. Como también se puede usar en combinación con otros estabilizantes (Montejo, 2002).

2.2.5.2. Estabilización con cemento

El cemento se utiliza para estabilizar suelos en la construcción de carreteras y presas de tierra. En 1935, en Estados Unidos se realizó la primera aplicación controlada de suelo y cemento, esto cerca de Johnsonville, Carolina del Sur. El cemento puede ser utilizado, como agente estabilizador, en superficies arenosas y arcillosas. La estabilización de un suelo arcilloso con cemento, tiene eficacia cuando su límite líquido es menor que 45 a 50 y su índices de practicidad es menos de 25 aproximadamente (Das, 2015).

2.2.5.3. Estabilización con asfalto

Trata de estabilizar suelos con productos bituminosos, tales como: asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas y alquitrán. Cuando se trata de suelos arenosos sin plasticidad, la acción de ligante la da el asfalto, ello sumado a la fricción del suelo se logra impedir las deformaciones con la presencia de las cargas de tránsito. Cuando se trata de suelos cohesivos, al usar como estabilizante el asfalto, logra agrupar las partículas de arcilla para obturar los vacíos, de esta manera los protege del ingreso o salida del agua, en otras palabras impermeabiliza el suelo tratado asfalto (Montejo, 2002).



2.2.5.4. Estabilización con ceniza volante

El proceso de combustión del carbón pulverizado, que está conectado a las plantas de generación de energía eléctrica, produce como subproducto cenizas volantes. Es una sustancia de grano fino, similar a la escoria, conformada en su mayoría de sílice, alúmina y una variedad de óxidos y álcalis. La ceniza volante es de naturaleza puzolánica y puede reaccionar con la cal viva y así obtener productos cementosos. Por ello, las bases y subbases de las carreteras se pueden estabilizar utilizando la combinación de cenizas volantes y cal. Se pueden hacer mezclas efectivas con 10% y 35% de cenizas volantes y entre 2 y 10% de cal. Con la finalidad de obtener suelos estabilizados con ceniza y cal, la compactación debe realizar en condiciones controladas, y con adecuadas cantidades de humedad (Das, 2015).

2.2.6. Estabilización a base de nanotecnología con Terrasil.

Para estabilizar un suelo, se tiene el producto nanotecnológico terrasil, de última generación, que es un producto estabilizador químico, que en su totalidad está formado por organosilanos, que es capaz de repeler el agua, disminuir la expansión y absorción del agua. Por lo que se puede decir, en adición a los estabilizadores racionales, se trata de un producto impermeabilizante de suelos. Del las cuales se puede indicar las siguientes características:

- Forma: Líquida
- Color: Rojizo pálido
- Punto de inflamación: > 90 °C (recipiente cerrado)
- Punto de ebullición: 200 °C
- Propiedades Explosiva: No explosivo
- Densidad: 1,04 g/ml
- Viscosidad (25°C): 100-500 cps



- **Beneficios**

- De forma permanente, el suelo tratado posee propiedades hidrófobas.
- El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor).
- Reduce el índice de plasticidad de los suelos.
- Se aumentan los valores de CBR.
- La expansión se reduce.
- Mejora el Módulo Resiliente.
- Se mejoran los datos de densidad y compactación en obra.
- Es posible reducir la cantidad de agua necesaria para la compactación del material.

- **Modo de acción**

Terrasil es un agente que modifica las superficies, conformado en su totalidad por organosilanos, este producto es soluble en agua, además es estable al calor y la radiación UV. Por lo tanto, su función principal es impermeabilizar superficies. Tiene grupos silanol, por lo que reaccionan con los silicatos que se encuentran en el suelo tratado, cambiando su superficie y dándole propiedades hidrofóbicas perenes. Y a consecuencia de ello, las moléculas de agua son rechazadas por el suelo tratado, de esta manera se encuentra impermeabilizado y así se previene inconvenientes procedentes de la presencia de esta.

Debido a la inexistencia de grupos polares en la superficie de los suelos, las gotas de agua no sufren ruptura en sus moléculas constitutivas, al no formarse los enlaces de hidrógeno necesarios para ello. De esta manera, las repulsiones de tipo sustancia polar-sustancia apolar originan que se mantenga la tensión superficial en las gotas de agua, permaneciendo sobre la superficie del suelo.

Figura 1:

Aspecto de gotas de agua depositadas sobre suelos tratados con Terrasil.



Fuente: Ficha Técnica del aditivo estabilizador químico Terrasil.

El aspecto de las gotas de agua depositadas sobre el suelo tratado con terrasil, como se puede observar, la repelencia de la gota es total.

- **Presentación**

La presentación de los productos se realiza en bidones de 20 Kg.

En el anexo N° 6 se presenta la ficha técnica del aditivo estabilizador químico Terrasil.



2.2.7. Aprobación de Normas referentes a estabilizaciones químicas en el Perú.

Tabla 1

Normativa referente a estabilización química en el Perú.

AÑO	ACONTECIMIENTO
2000	Por Resolución Directoral N°1146-2000-MTC/15.17 aprueban la norma denominado: "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras - EG-2000", cuyo capítulo 3 Subbases y Bases, en las secciones 306, 307 y 308 contemplan el empleo del suelo estabilizado con: Cemento Portland, Cal y Compuestos Multienzimáticos.
2003	El MTC-DGC y F, mediante Resolución Ministerial N° 062-2003 MTC/02 Constituye la "Comisión Técnica para tratar la problemática sobre estabilizadores de suelos".
2003	La Comisión emite la Directiva N° 05-2003-MTC/14, que estipula pautas para Evaluar la Aplicabilidad de Estabilizadores de suelos, aprobada con Resolución Directoral N° 040-2003-MTC/14.
2004	Se aprueba mediante Resolución Directoral N° 007-2004-MTC/14, MTC E 1109 2004 Norma Técnica de Estabilizadores Químicos. Estabilización química de suelos- Caracterización del estabilizador y evaluación de propiedades de comportamiento del suelo mejorado.
2005	Se da la directiva N° 007-2005-MTC/14 denominado "Evaluación de la Aplicabilidad de Estabilizadores de suelos", aprobada con Resolución Directoral N° 073-2005-MTC/14.
2008	Se aprueba el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para construcción de Carreteras No Pavimentadas de Bajo-Volumen de Tránsito. Aprobado por la Resolución Ministerial N° 304-2008-MTC/02. Cuyo capítulo 3, en las secciones 306B, 307B, 308B, 309B y 310B contemplan el empleo del suelo estabilizado con: Cemento Portland, Cal, productos químicos-Mutienzimáticos Orgánicos, Sal (Cloruro de sodio) y Grava.
2013	Por Resolución Directoral N°22-2013-MTC/14 aprueban la actualización del Manual de Carreteras - "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción - EG-2013", cuyo capítulo III Afirmados, en las secciones 301, 301A, 301B, 301C, 301D Y 301E contemplan el empleo del suelo estabilizado con: Cemento, Cal, Productos químicos, sales - Cloruro de Sodio - Cloruro de Calcio - Cloruro de Magnesio, y emulsión asfáltica.
2015	Se aprueba mediante Resolución Directoral N° 003-2015-MTC/14 el Documento Técnico: "Soluciones Básicas en Carreteras No Pavimentadas", el cual tiene carácter normativo.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

2.2.8. Criterios para evaluación de subrasante

Tabla 2

Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. MTC-2014.

Tabla 3:

Categorías de Subrasante

Categorías de Sub rasante	CBR
S0: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Insuficiente	De CBR $\geq 3\%$ A CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR $\geq 6\%$ A CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR $\geq 10\%$ A CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR $\geq 20\%$ A CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	CBR $\geq 30\%$

Fuente: Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. MTC-2014.

Tabla 4

Resistencia a la compresión no confinada

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

Fuente: Manual de ensayo de Materiales. MTC-2017



2.2.9. Pruebas de laboratorio

2.2.9.1. Determinación del contenido de Humedad de un Suelo

La determinación de contenido de humedad es un ensayo rutinario de laboratorio para determinar la cantidad de agua presente en una masa de suelo en términos de su peso en seco. En laboratorio se determina el peso del agua secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bowle, 1981).

- Equipos:
 - Recipientes. - De aluminio o acero inoxidable.
 - Horno de secado. - Horno de secado termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Balanzas. - De 0.01g para muestra menor a 200g y 0.1g para muestra mayor de 200g.
 - Muestra representativa. - Seleccionada, preservada y transportada adecuadamente.

El contenido de humedad de la muestra se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

W(%): Contenido de humedad natural del suelo.

Ww: Peso del agua.

Ws: Peso de los sólidos del suelo.

2.2.9.2. Análisis Granulométrico

Permite determinar de forma cuantitativa la distribución por tamaños de las partículas de suelo, para luego plotear la curva granulométrica, de acuerdo a los porcentajes pasantes



a cada malla. La sucesión de tamices que se utilizan se van acomodando de tal manera que las aberturas de los tamices van disminuyendo hasta el número 200, así como se muestra en la tabla 5, para luego colocar la muestra de suelo en la parte superior del juego de tamices, y someterlo a agitación mecánica o manual, y así finalmente poder pesar los retenidos en cada malla y determinar los porcentajes que pasan a cada tamiz (MTC, 2017).

Tabla 5

Tamaño de la serie de tamices.

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.000
2"	50.800
1 1/2"	38.100
1"	25.400
3/4 "	19.000
3/8 "	9.500
N° 4	4.760
N° 10	2.000
N° 20	0.840
N° 40	0.425
N° 60	0.260
N° 140	0.106
N° 200	0.075

Fuente: Manual de ensayo de Materiales. MTC-2017

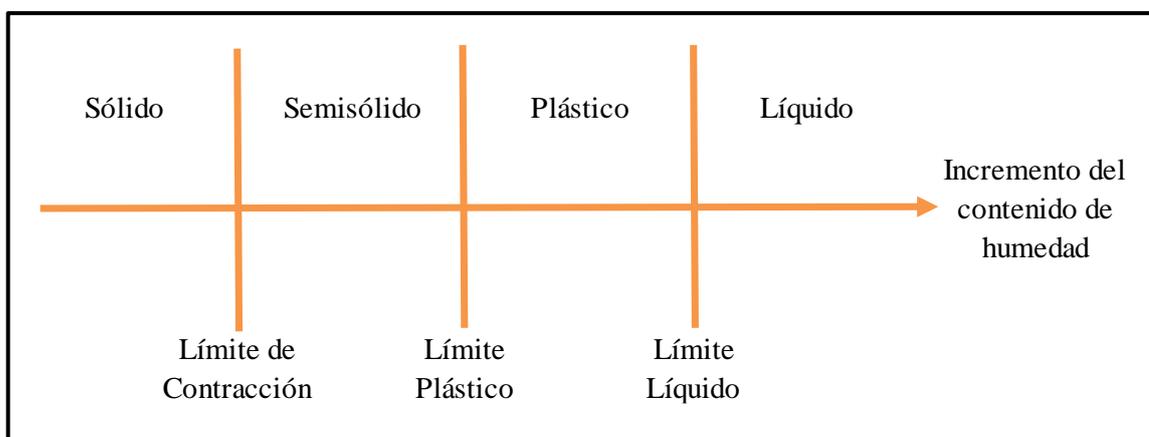
- Equipos:
 - Balanzas.
 - Tamices de malla cuadrada.
 - Horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta de 110 ± 5 °C.
 - Envases, adecuados para el manejo y secado de las muestras.
 - Cepillo y brocha, para limpiar las mallas de los tamices.
 - Tamizador mecánico.

2.2.9.3. Límites de Consistencia

Los límites de consistencia dan información sobre el estado de consistencia de las partículas del suelo. Dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, como se muestra en la figura 2 (Das, 2015).

Figura 2

Límites de Atterberg



Fuente: Manual de Fundamentos de Ingeniería Geotécnica - Braja M., Das.

- **Límite Líquido**

Se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje respecto al peso seco de la muestra, en el que se lleva a cabo la transición del estado plástico al estado líquido. Para determinar el Límite Líquido (LL), se toma material que pasa la malla N° 40, se coloca en una cápsula de porcelana y con una espátula se hace una mezcla homogénea agregando una pequeña cantidad de agua durante el mezclado. En el fondo de la cuchara de Casagrande mecánica se coloca una porción de suelo amasado a una cierta humedad formando un casquete esférico que luego se divide en dos partes iguales con un acanalador normalizado, formando un surco. Luego se agita la cuchara a razón de dos golpes por segundo, hasta que el borde de cada uno de los surcos en el fondo de la



cuchara se una, de ahí se cuentan el número de golpes para diferentes contenidos de humedad. El resultado es el contenido de humedad que corresponda a 25 golpes, ese es el Límite Líquido (Crespo, 2004).

Equipos:

- Recipiente de porcelana.
- Espátula.
- Aparato del límite líquido o de Casagrande.
- Acanalador.
- Calibrador. Ya sea incorporado al ranurador o separado.
- Recipientes. De material resistente a la corrosión.
- Balanza con sensibilidad de 0.01g.
- Tamiz N°40.
- Horno termostáticamente controlado regulable 110 ± 5 °C.
- Agua destilada.
- Muestra secada al aire que pase el tamiz N° 40.

- **Límite Plástico**

El límite plástico (PL) se define como el contenido de humedad, en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada el horno, donde los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. Para determinar el límite plástico, por lo general se usa el material que ha sobrado de la prueba del límite líquido, donde se evapora la humedad por mezclado. En el que el suelo al enrollarse en hilos de 3.2 mm de diámetro se desmorona. La prueba se realiza mediante rodados repetidos por parte de una masa de tierra de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado (Crespo, 2004).

Equipos:



- Espátula.
 - Recipiente de porcelana.
 - Balanza con aproximación a 0.01g.
 - Horno termostáticamente controlado regulable a 110 ± 5 °C.
 - Tamiz N°40.
 - Agua destilada.
 - Recipientes adecuados para determinación de humedades.
 - Superficie de rodadura, vidrio grueso esmerilado.
 - Muestra secada al aire que pase el tamiz N° 40.
- **Índice de Plasticidad**

La diferencia numérica entre los límites líquido y plástico se denomina Índice de Plasticidad o Índice Plástico (IP), indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico. El índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Comparando el índice de plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas se puede decir si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso (Crespo, 2004).

$$\mathbf{IP = LL - LP}$$

Donde:

IP: Índice de Plasticidad.

LL: Límite Líquido.

LP: Límite Plástico.



2.2.9.4. Proctor Modificado

Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza un molde con un volumen de 943.3 cm^3 para el método A y B y 2124 cm^3 para el método C. El suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44.5 N (masa 4.536 kg) y tiene una caída de 457.2 mm . El número de golpes de martillo para cada capa es de 25 para el método A, 25 para el método B, y 56 golpes para el método C. La energía de compactación por unidad de volumen de suelo en la prueba modificada es $2696 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ (Bowle, 1981).

- Equipos:
 - Moldes de compactación 4 pulg. ó 6 pulg.
 - Pisón o martillo manual o mecánico de 44.5 N . de peso.
 - Extractor de muestras.
 - Balanza de sensibilidad 0.1 g . y 0.01 g .
 - Horno de secado a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Regla recta.
 - Mallas: N° 4 (4.75 mm), $3/8''$ (9.5 mm) y $3/4''$ (19.0 mm).
 - Probeta graduada de 1000 ml y 100 ml .

2.2.9.5. Valor Relativo de Soporte (CBR)

El ensayo de CBR, es una prueba que mediante el cual se determina un índice de resistencia de un suelo, el cual se trata del ensayo California Bering Ratio (CBR), que en español podría entenderse como el valor relativo de soporte. La Prueba de CBR, dicho de otra manera, mide la resistencia al cizallamiento de una muestra de suelo, esto en condiciones controladas de humedad óptima y densidad máxima seca. Estos últimos dos datos son obtenidos de la prueba de Proctor modificado. El valor de CBR obtenido, se



usa valorar la capacidad de resistencia de suelos que serán utilizados como: afirmado, base, subbase y subrasante (MTC, 2017).

- Equipos:
 - Prensa hidráulica y marco de carga. La velocidad de desplazamiento entre el cabezal y la base debe ser de 1.27 mm/min. La prensa para este ensayo, debe tener una capacidad de 44.5 kN o más y mínima precisión para la medida debe ser 44 N o menos.
 - El Molde cilíndrico de metal debes ser de 152.4 mm (6”) de diámetro.
 - Disco espaciador.
 - Pisón: martillo de 10 lb, y la altura libre de caída será de 18”.
 - Vástago plato.
 - Extensómetro trípode.
 - Sobrecargas: anulares de 4.54 kg y ranuradas de 2.27 kg.
 - Pistón: cilíndrico, de acero, de 19.35 cm² (3 pulg²) de sección circular.
 - Accesorios diversos: Balanzas, horno, tamices, papel filtro, tanques para inmersión de muestras, cronómetro, extensómetros, probeta graduada, etc.

El número CBR que se obtiene, es la relación de la carga unitaria (MPa) que se necesita para que el pistón de penetración (con una área de 19.4 cm²) logre ingresar a una cierta profundidad en el suelo, que ha sido preparado con datos obtenidos del ensayo de Proctor modificado, todo ello con respecto a la resistencia unitaria patrón, que se requiere penetrar a la misma profundidad en un material de roca triturada (Bowle, 1981).

En forma de ecuación esto es:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100 (\%)$$



De esta ecuación se consigue ver que el número CBR es un relación de la carga unitaria patrón, y corresponde a una relación de cargas (suelo y muestra patron) necesaria para lograr una penetración de 2.54mm (0.1 pulg.) y 5.08mm (0.2 pulg.).

Se registran las lecturas de carga para las penetraciones siguientes:

Tabla 6

Lecturas de Carga

Milímetros	Pulgadas
0.63	0.025
1.27	0.050
1.90	0.075
2.54	0.100
3.17	0.125
3.81	0.150
5.08	0.200
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Fuente: Manual de ensayo de Materiales. MTC-2017

Antes de someter el espécimen a la prensa, se sumerge el espécimen en un tanque con agua durante un periodo de 96 horas (4 días) con una sobrecarga que emula aproximadamente el peso del pavimento que se tendrá en in situ, la sobrecarga en ningún caso será menor de 4.5 Kg. Durante este periodo se debe registrar la expansión, lo cual se debe hacer con el deformímetro, esto se debe hacer para momentos escogidos al azar para así cuantificar la expansión; se anota su lectura, la fecha y la hora. Al finalizar las 96 horas de saturación, se somete la muestra a penetración, para así poder obtener el valor de CBR de la muestra de suelo en situación de saturación completa (Bowler, 1981).



2.2.9.6. *Compresión Simple*

Este ensayo se utiliza, en suelos cohesivos, para determinar la resistencia a la compresión no confinada, para muestras en estado inalteradas o remoldeadas, para lo cual se aplica carga axial. La resistencia a la compresión no confinada, se refiere a la carga por unidad de área a la cual la probeta de suelo, ya sea cilíndrica o prismática, llega a fallar en la prueba de compresión simple (MTC, 2017).

La relación de la longitud y el diámetro del espécimen deberían ser suficientemente grande para evitar interferencias de planos potenciales de falla a 45° y suficientemente corta para no obtener falla de “columna” (Bowle, 1981).

La relación L/d que satisface estos criterios es:

$$2 < L/d < 3$$

- Equipos:
 - Prensa para compresión inconfiada.
 - Dial de carga a 0.0001” y de deformímetro 0.01 mm/división.
 - Balanza.
 - Molde para muestras inalteradas y remoldeadas.
 - Equipamiento para calcular la densidad.
 - Equipamiento para calcular la humedad.

La resistencia a la compresión no confinada se emplea también para calificar la consistencia del suelo como muy blanda, blanda, mediana, firme, muy firme y dura de acuerdo con el valor obtenido en la siguiente forma:



Tabla 7

Consistencia del Suelo

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

Fuente: Manual de ensayo de Materiales. MTC-2017

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos utilizados en esta investigación se presentan a continuación:

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

La muestra del estudio, se obtuvo de una calicata ubicada en el Km 11+400 de un tramo de la carretera Puno – Moquegua. Cuyas coordenadas UTM son:

Este: 390081.74 m E

Norte: 8237800.47 m S

Zona: 19L

Figura 3

Ubicación geográfica del estudio - Google Earth



Fuente: Google Earth-2022

Figura 4

Muestra extraída de una calicata, del Km 11+400 de un tramo de la carretera Puno - Moquegua.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. MATERIALES UTILIZADOS

3.2.1. Suelo de consistencia blanda.

La muestra de consistencia blanda utilizada para esta investigación se obtuvo de una calicata ubicada en el Km 11+400 de la carretera Puno – Moquegua, se tomó a una profundidad de 1.5m por debajo del nivel del suelo. La muestra extraída presenta las siguientes propiedades geotécnicas:

Tabla 8*Propiedades del suelo natural utilizado para la investigación.*

Propiedades	Valores
Contenido de humedad natural (%)	17.1
Límites de consistencia	
Límite líquido, LL (%)	60.1
Límite plástico, LP (%)	36.6
Índice de plasticidad, IP (%)	23.5
Clasificación de suelos	
Clasificación SUCS	MH
Clasificación AASHTO	A-7-5 (27)
Proctor Modificado	
Máxima densidad seca, MDS (g/cc)	1.58
Contenido de humedad óptimo, CHO (%)	21.2
Valor relativo de soporte	
CBR (%)	5.0
Expansión (%)	6.25
Resistencia a la compresión simple, UCS (Kg/cm ²)	0.37

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Aditivo químico Terrasil

Terrasil es un aditivo para suelos basado en nanotecnología, formado al 100 % por organosilanos, soluble al agua y mejora la capacidad portante del suelo. A continuación, se presenta las características del aditivo:

Tabla 9*Características del aditivo nanotecnológico - Terrasil.*

Características	Descripción
Forma	Líquida
Color	Rojizo pálido
Punto de Inflamación	>90°C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Propiedades explosivas	No explosivo
Densidad	1.04 g/ml
Viscosidad (25°C)	100-500 cps

Fuente: Elaboración propia.



3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.

3.3.1. Muestra de suelo.

La muestra del estudio, se obtuvo de una calicata ubicada en el Km 11+400 de un tramo de la carretera Puno – Moquegua.

3.3.2. Aditivo químico Terrasil.

El aditivo químico terrasil utilizado en esta investigación fue proporcionado por la empresa BREM ENVIRONMENTAL SOLUTIONS S.A.C. distribuidor del producto en el Perú. La empresa se encuentra ubicada en la ciudad de Lima, Av. Parque de las leyendas N° 210 Oficina 802 Urb. Pando-San Miguel.

3.4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS PARA USO VIAL DEL SUELO

NATURAL

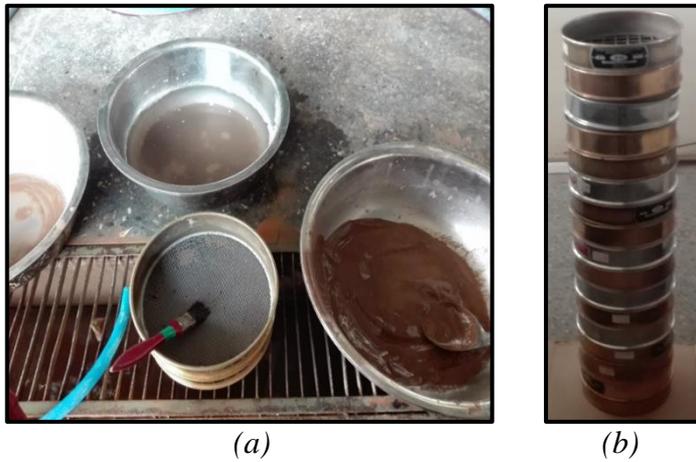
Para determinar las propiedades geotécnicas del suelo en estudio se hicieron los siguientes ensayos:

3.4.1. Análisis Granulométrico

La muestra a usarse se seca, y para tener una muestra representativa del material de la calicata se cuartea y se registra su peso, luego la muestra se coloca en un recipiente con agua y se deja en remojo hasta ablandar todos los terrones. A continuación, se lava la muestra sobre el tamiz N° 200 como se puede observar en la figura 5 (a). La muestra retenida se coloca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ durante 24 horas, una vez retirado del horno se pesa la muestra seca. Posterior a ello se realiza el tamizado como se puede observar en la figura 5 (b). Con los datos obtenidos graficamos la curva granulométrica como se observa en la figura 6.

Figura 5

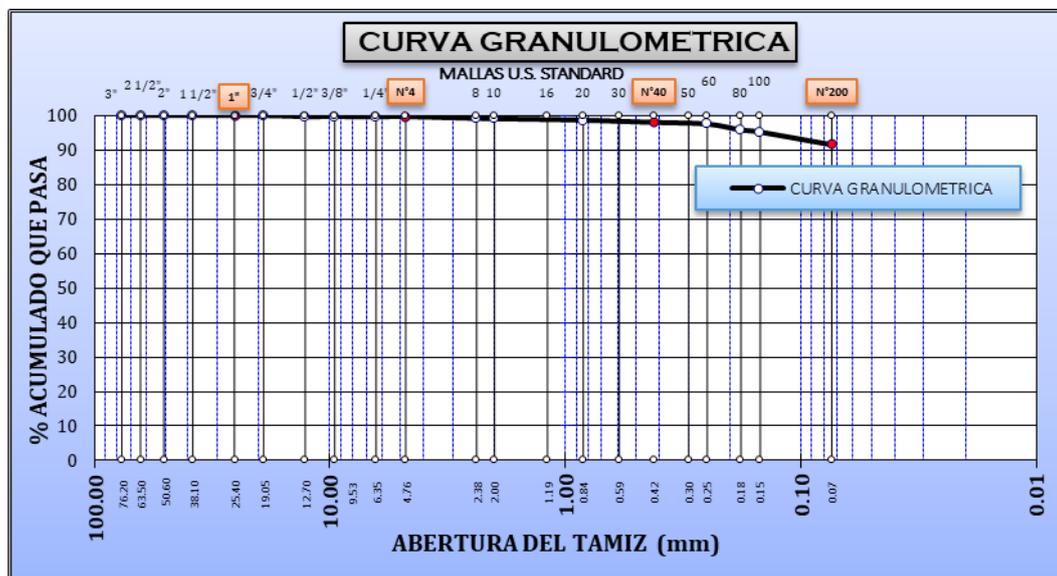
Ensayo Análisis Granulométrico. (a) Lavado de muestra. (b) Tamizado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6

Curva granulométrica del suelo natural



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Humedad Natural

El objetivo es determinar el contenido de agua que hay en una muestra de suelo, expresada en porcentaje. Para ello tomamos 3 porciones del suelo natural y registramos sus respectivos pesos, luego se coloca en el horno a temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por un



periodo de 12 a 16 horas, luego se retira las muestras del horno y se deja enfriar, posterior a ello se registran los pesos de las muestras secas. Con los datos obtenidos realizamos los cálculos correspondientes y obtenemos los respectivos contenidos de humedad, y finalmente se calcula el promedio.

Contenido de Humedad Natural: 17.1%

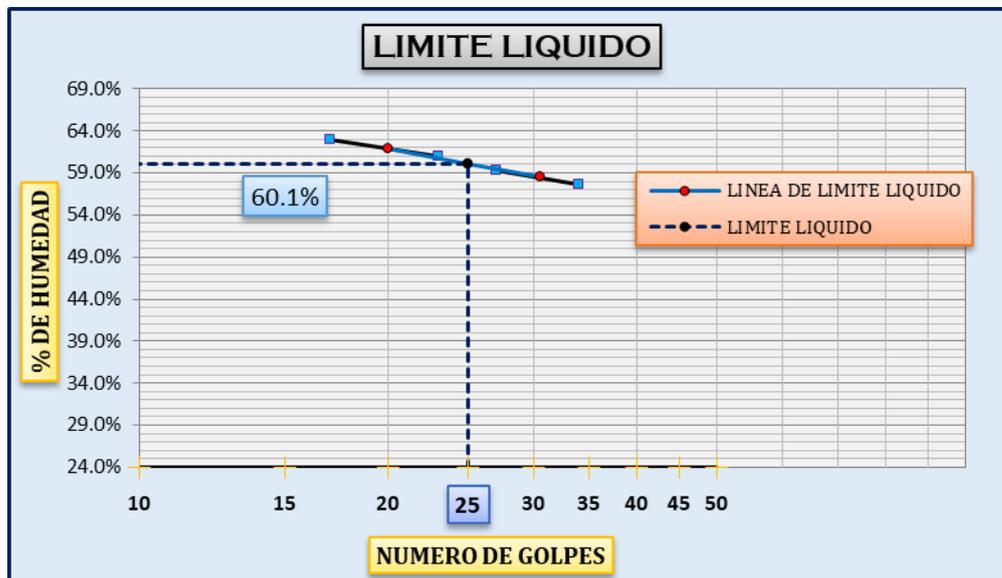
3.4.3. Limite Líquido

Se tamizó una porción de muestra seca por la malla No 40, hasta conseguir aproximadamente 300 gr. y se descarta el parte del suelo retenido en el tamiz. Luego, en un envase de porcelana, se mezcla el material con agua hasta que tenga la consistencia de una pasta suave y espesa, y dejó que se uniformice la humedad por un periodo de 24 horas, para ello se colocó dentro de la caja de tecnopor. Posterior a ese tiempo, se trasladará el material del recipiente a la Cuchara Casagrande, llenando aproximadamente la tercera parte del total. Extender y esparcir el material uniformemente con la espátula, formando una pasta circular de 1 cm. de profundidad. Se realiza una ranura firme con el acanalador por la línea central de la muestra de suelo que se encuentra en la cuchara. La manivela se gira a una velocidad de dos vueltas por segundo para determinar el número de golpes necesarios para que las paredes de la ranura se unan en la base y obtener la humedad de la muestra.

De acuerdo a la figura 7, el Límite Líquido es 60.1%.

Figura 7

Límite Líquido



Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Límite Plástico

Se usó el mismo material que se utilizó para el ensayo de límite líquido, la muestra con una consistencia que se podía hacer rollos entre el vidrio esmerilado y la palma de la mano. Seguidamente, se tomó unos gramos de material para formar un baston circular que se logra sobre el vidrio esmerilado y la palma de la mano, para así ir eliminando la humedad paulatinamente. Luego, se pasa a hacer el rolado a una velocidad aproximadamente de 80 a 90 periodos por minuto. Finalmente, el límite líquido es la humedad que se tiene al formar bastones de 3.2 mm de diámetro en el momento que se forman fisuras superficiales. El límite líquido del suelo en estudio es de 36.6%.

3.4.5. Índice de plasticidad IP

Este parámetro, se usa para catalogar un suelo. Un suelo con IP elevado correspondería a un suelo de alta plasticidad. Y por el contrario un suelo con IP bajo, correspondería a un suelo con baja o nula plasticidad.



El Índice de Plasticidad del suelo natural para este estudio es:

$$IP = LL - LP$$

- Límite Líquido: 60.1%
- Límite Plástico: 36.6%
- Índice de Plasticidad: 23.5%

3.4.6. Clasificación de Suelos

La muestra utilizada para el presente estudio, se clasificó por los dos sistemas más conocidos, los cuales se muestran a continuación.

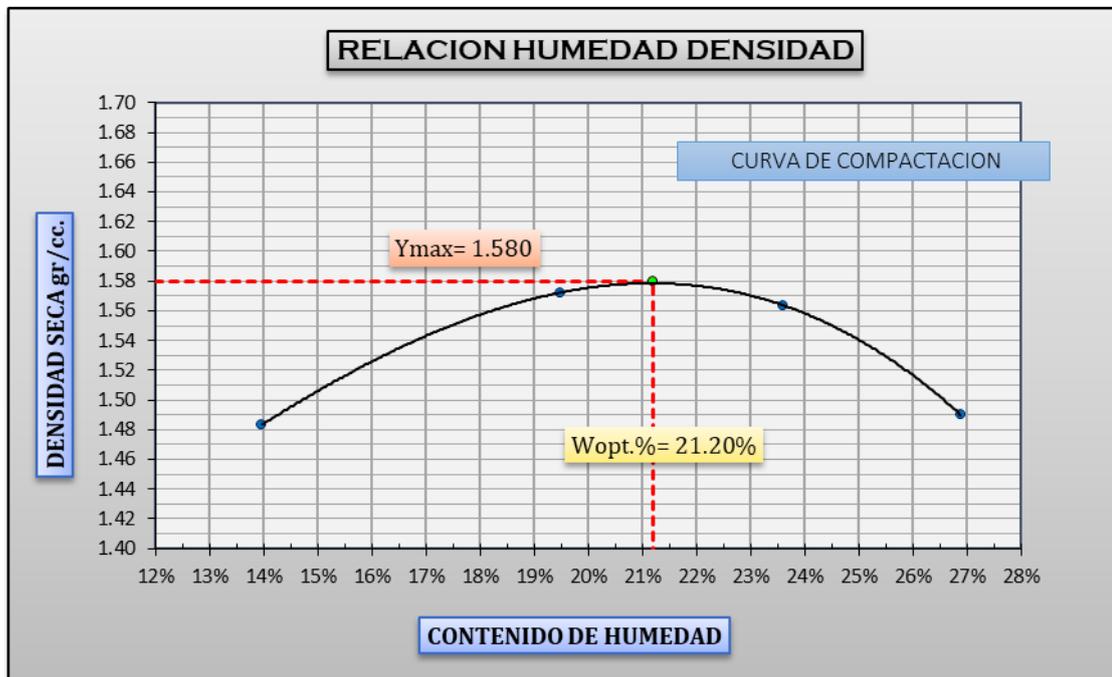
- Sistema de Clasificación AASHTO:
A-7-5 (27)
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos:
MH: Limo inorgánico de alta plasticidad

3.4.7. Proctor Modificado

Se realizó el ensayo para la muestra natural del suelo, esto para poder ver el Contenido de Humedad Óptimo y de la Máxima Densidad Seca. Para eso se aplicó el método A del Proctor Modificado, realizado en 5 capas y 25 golpes por capa.

Figura 8

Relación Humedad-Densidad del suelo natural



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 8 se tiene que Máxima Densidad Seca es 1.58 gr/cc y la Humedad Óptima es 21.2%.

3.4.8. Valor Relativo De Soporte (CBR)

El ensayo se comenzó con el óptimo Contenido de Humedad, obtenido del ensayo Proctor Modificado. A continuación, se prepararon muestras de 6Kg aproximadamente, así también moldes de CBR con sus anillos de extensión (collarín) respectivos. En una probeta, preparamos la cantidad necesaria de agua (faltante para la humedad óptima). La muestra se mezcló, hasta homogenizar en su totalidad, en una bandeja con agua (humedad óptima). Para luego dividir en cinco partes iguales. Después de eso, se colocó el disco espaciador dentro del molde y un papel de filtro encima para agregar la muestra y compactarla con 56 golpes de pistón. Se retiró la extensión del molde



y se procede a enrasar la muestra con la regla metálica, y extrajo una porción de muestra en taras para determinar el contenido de humedad.

Se volteo el molde, junto con la muestra compactada, insertando primero un papel de filtro y retirando el disco espaciador luego se registró el peso de la muestra. Se colocó el vástago graduable y las placas de metal de 10 lb en el molde y colocar dicho molde en un tanque con agua, en posición horizontal y nivelada para hacer la lectura con el extensómetro y registrar la lectura inicial. Cada 24 horas se registró la lectura de la expansión y después de 96 horas, se registró la lectura final, ello para calcular la expansión de la muestra. El hinchamiento total registrado se expresa como porcentaje de la altura inicial de la muestra. Después de cuatro días, se retira el molde sumergido y se deja drenar el agua durante 15 minutos, teniendo cuidado de no alterar el espécimen antes de proceder a la prueba de penetración. Se asentó el pistón sobre la muestra, verificando que el extensómetro este en cero antes de medir la penetración para la aplicación de la carga. El molde se somete a la prensa a una velocidad constante de 1,27 mm/min y se anotan las lecturas del dial para penetración de 0,025, 0,05, 0,075, 0,10, 0,15, 0,20, 0,30, 0,40 y 0,50 pulgadas.

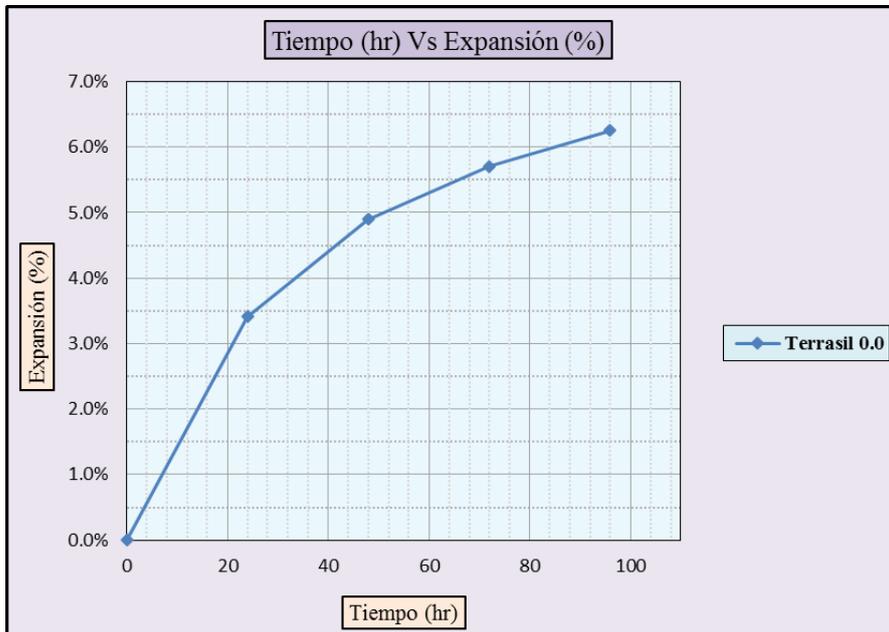
Valor Relativo de Soporte (CBR) del suelo natural en estudio es: 5.0%

3.4.9. Expansión

La expansión total que se registró se expresa en porcentaje lo cual está en referencia a la altura inicial de la muestra, siendo de 6.25% como se observa en la figura 9, corresponde a 7.27 mm de expansión.

Figura 9

Tiempo (hr) Vs Expansión (%)



Fuente: Elaboración propia.

3.4.10. Compresión Simple

Este ensayo se realizó en muestras remoldeadas, los cuales se realizaron con el contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima de la prueba de proctor modificado.

Para determinar la resistencia a la compresión simple del suelo natural se realizó 3 especímenes, para luego calcular el promedio y determinar el UCS.

Tabla 10

Compresión Simple del suelo natural.

Espécimen N°	Cohesión "C" (kg/cm ²)	Promedio "C" (kg/cm ²)	UCS "qu" (Kg/cm ²)	Promedio "qu" (Kg/cm ²)
1	0.19		0.38	
2	0.19	0.19	0.37	0.37
3	0.18		0.37	

Fuente: Elaboración propia.



3.5. ENSAYOS CON EL AGENTE ESTABILIZADOR - TERRASIL

Para la obtención de la dosificación óptima que debe aplicarse se optó por analizar el suelo con 4 dosificaciones diferentes de terrasil siendo de 0.2 lt/m^3 , 0.8 lt/m^3 , 1.4 lt/m^3 y 2.0 lt/m^3 . Y se realizó pruebas en el laboratorio como son: Límites de consistencia, valor relativo de soporte (CBR) y resistencia a la compresión Simple (UCS).

Los parámetros de dichos ensayos de las muestras tratadas, se obtuvo después de un periodo de curado de siete (07) días. Ya que en este tiempo de curado el suelo tratado completa su reacción química de tal forma que alcanza una mejora en las propiedades del suelo.

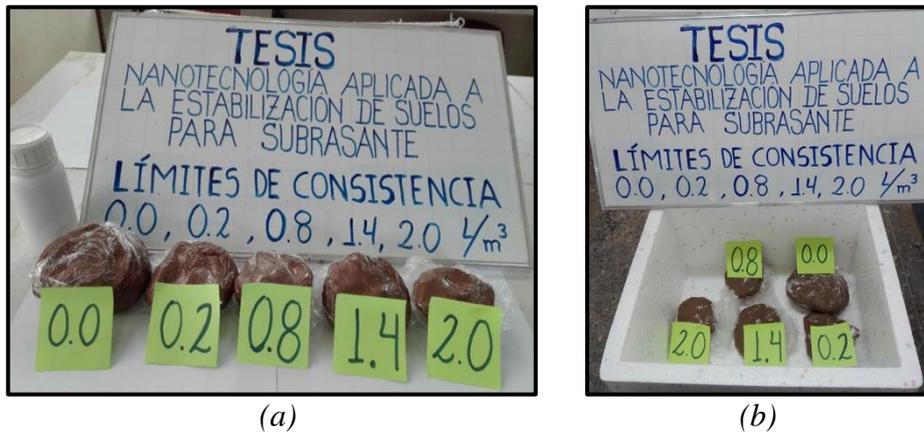
Para la ejecución del ensayo de CBR en el laboratorio, se sumergió en el agua durante 96 horas (04 días) las muestras del suelo tratado, inmediatamente después de cumplir su periodo de curado de siete (07) días.

3.5.1. LIMITES DE CONSISTENCIA

Se tamizó la muestra seca a mediante el tamiz N° 40 hasta conseguir aproximadamente 300 gr. Para cada dosificación y se colocó en envases de porcelana. Luego se mezcló el agua con el terrasil en una probeta, esto para todas las dosificaciones. Seguidamente se vertió el contenido de la probeta agua-terrasil en el envase de porcelana que contiene los 300g de muestra de suelo, para cada dosificación; se mezcló hasta obtener una consistencia espesa y suave; posteriormente se dejó curar la muestra mezclada por un periodo de siete (7) días dentro de una caja de tecnopor, como se puede observar en la figura N°10.

Figura 10

Límites de Consistencia. (a) Dosificación de las muestras. (b) curado de las muestras dentro de una caja de tecnopor.



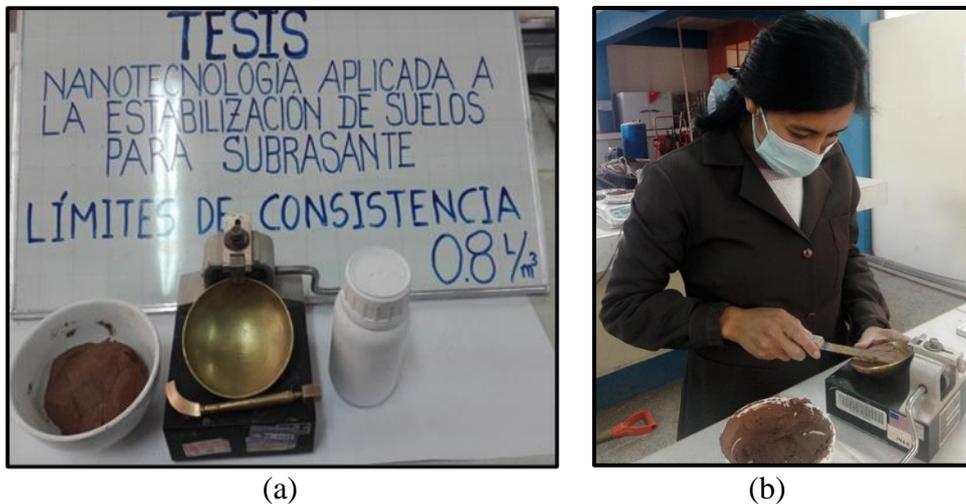
Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.1. Limite Líquido

Curada la muestra por un periodo de siete días, se colocó el suelo a la Cuchara de de Casagrande, dispuesto en aproximadamente la tercera parte del total. Extender y esparcir el material uniformemente con la espátula, formando una pasta circular de 1 cm. de espesor. Se realizó la ranura con el acanalador siguiendo la línea central de la mezcla contenida en la copa de la cuchara. La manivela se giró a una velocidad de dos vueltas en un segundo para tener el número de golpes necesarios para la cual se unan las paredes de la ranura en la base y de la muestra de dicha unión poder obtener la humedad.

Figura 11

Ensayo Límite Líquido. (a) Muestra de suelo mezclado con dosis de terrasil. (b) Ensayo de Límite Líquido en la cuchara Casagrande.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.2. Límite Plástico

Se usó el mismo material que se utilizó para el ensayo de límite líquido, con la diferencia que la muestra se curó por 7 días. La muestra con consistencia que se podía hacer rollos entre el vidrio esmerilado y la palma de la mano. Seguidamente, se tomó unos gramos de material para formar un baston circular que se logra sobre el vidrio esmerilado y la palma de la mano, para así ir eliminando la humedad paulatinamente. Luego, se pasa a hacer el rolado a una velocidad aproximadamente de 80 a 90 periodos por minuto. Finalmente, el límite líquido es la humedad que se tiene al formar bastones de 3.2 mm de diámetro en el momento que se forman fisuras superficiales.

Figura 12

Ensayo límite plástico. (a) Rolado sobre el vidrio esmerilado. (b) Bastones de 3.2 mm.



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Valor Relativo De Soporte (CBR)

El ensayo se comenzó con el óptimo Contenido de Humedad, obtenido del ensayo Proctor Modificado. A continuación, se prepararon muestras de 6Kg aproximadamente, así también moldes de CBR con sus anillos de extensión (collarín) respectivos. En una probeta, preparamos la cantidad necesaria de agua (faltante para la humedad óptima) a la cual se le añade la dosis correspondiente de terrasil. La muestra se mezcló, hasta homogenizar en su totalidad, en una bandeja con agua (humedad óptima).

Figura 13

Preparación de la muestra con Terrasil para realizar CBR. (a) Terrasil agregado al CHO. (b) Mezcla de CHO – Terrasil, suelo y agua.



Fuente: Elaboración propia.

Para luego dividir en cinco partes iguales. Después de eso, se colocó el disco espaciador dentro del molde y un papel de filtro encima para agregar la muestra y compactarla con 56 golpes de pistón. Se retiró la extensión del molde y se procede a enrasar la muestra con la regla metálica, y extrajo una porción de muestra en taras para determinar el contenido de humedad. Se volteo el molde, junto con la muestra compactada, insertando primero un papel de filtro y retirando el disco espaciador luego se registró el peso de la muestra.

Figura 14

Ensayo CBR. (a) Compactado de la muestra. (b) Enrasado de la muestra con la regla metálica.



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

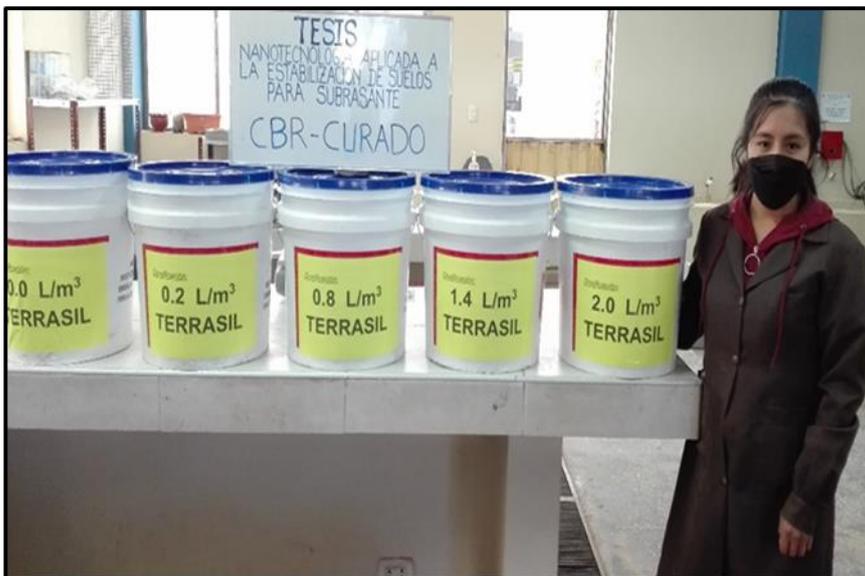
Seguidamente se colocó los moldes en baldes cerrados herméticamente, para mantener la humedad constante, ello para el respectivo curado por un periodo de 7 días.

Figura 15

Curado de las muestras. (a) Colocado de muestras en baldes con sus respectivas dosificaciones. (b) Muestras en baldes cerrados herméticamente por 7 días.



(a)



(b)

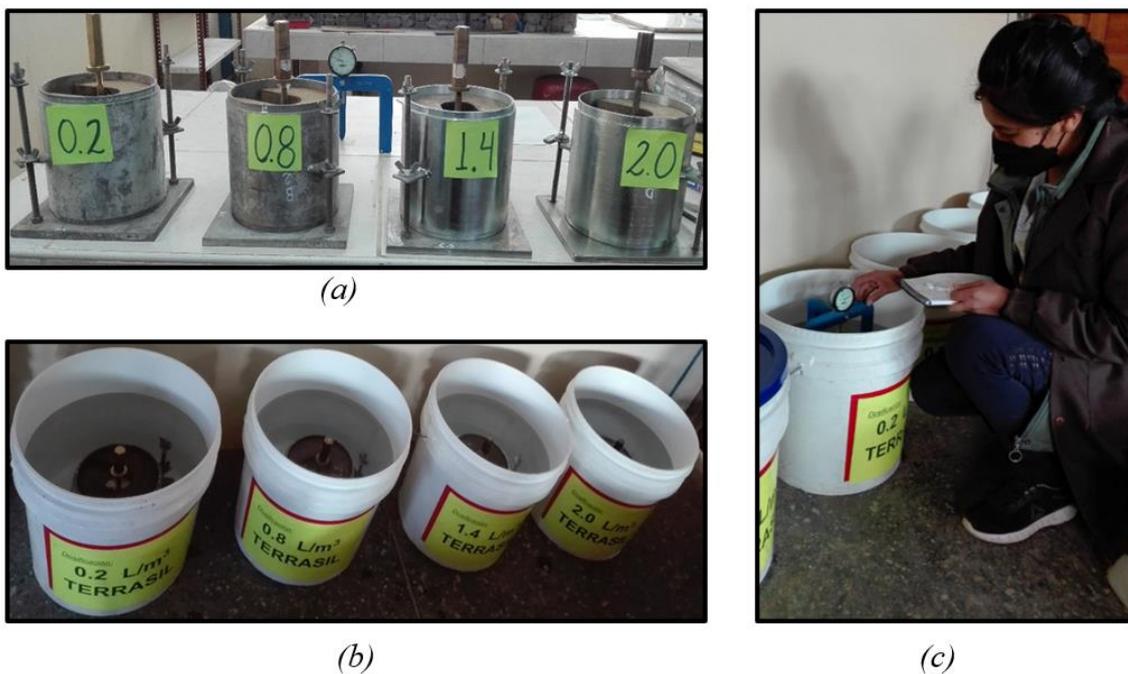
Fuente: Elaboración propia.

Posterior a ello se colocó el vástago graduable y las placas de metal de 10 lb en el molde y colocar dicho molde en un tanque con agua, en posición horizontal y nivelada para hacer la lectura con el extensómetro y registrar la lectura inicial. Cada 24 horas se

registró la lectura de la expansión y después de 96 horas, se registró la lectura final, ello para calcular la expansión de la muestra. El hinchamiento total registrado se expresa como porcentaje de la altura inicial de la muestra.

Figura 16

Ensayo CBR. (a) Colocado del vástago graduable y placas metálicas. (b) Moldes sumergidos en agua por 96 horas. (c) lectura del deformímetro para medir hinchamiento.

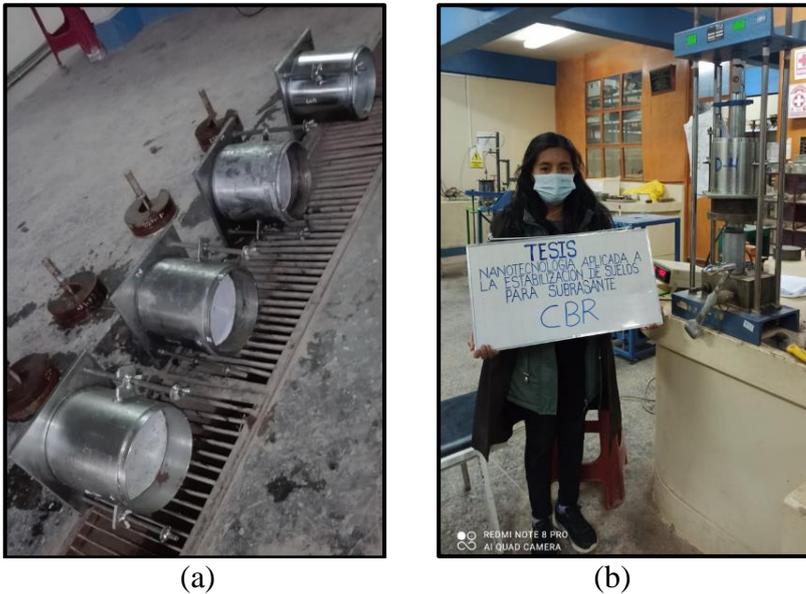


Fuente: Elaboración propia.

Después de cuatro días, se retira el molde sumergido y se deja drenar el agua durante 15 minutos, teniendo cuidado de no alterar el espécimen antes de proceder a la prueba de penetración. Se asentó el pistón sobre la muestra, verificando que el extensómetro este en cero antes de medir la penetración para la aplicación de la carga. El molde se somete a la prensa a una velocidad constante de 1,27 mm/min y se anotan las lecturas del dial para penetración de 0,025, 0,05, 0,075, 0,10, 0,15, 0,20, 0,30, 0,40 y 0,50 pulgadas.

Figura 17

Ensayo CBR. (a) Vertido del agua retenida en la parte superior del molde durante 15 minutos. (b) Muestra sometida a la prensa CBR.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Resistencia a la Compresión Simple (UCS)

Este ensayo se realizó en muestras remoldeadas, los cuales se realizaron con el contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima de la prueba de proctor modificado. Dichas muestras se pusieron en bolsas herméticas para luego disponerlos en una caja de Tecnopor, durante 7 días para el curado correspondiente.

Para determinar la resistencia a la compresión simple de los suelos se realizaron 3 especímenes por cada dosificación, para luego calcular el promedio y determinar el UCS. Las dosificaciones que se trabajaron en esta investigación fueron las siguientes: 0.2 lt/m^3 , 0.8 lt/m^3 , 1.4 lt/m^3 y 2.0 lt/m^3 .

Figura 18

Ensayo de Compresión Simple. (a) Curado de probetas remoldeadas en caja de tecnopor por un periodo de 7 días. (b) Probetas sometidas a la máquina de compresión inconfiada.



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA

4.1.1. Resultados del Límite Líquido

En la tabla 11 se puede apreciar que el Límite Líquido (LL) del suelo tratado exhibe una reducción en comparación con el suelo no tratado. Ya que el Límite Líquido del suelo sin tratar es de 60.1 % como se puede observar en la fig. 19, con 0.2 L/m³ de terrasil se obtiene un LL de 59.5 % como se observa en la fig. 20, con 0.8 L/m³ de terrasil se obtiene un LL de 58.3 % como se observa en la fig. 21, con 1.4 L/m³ de terrasil se obtiene un LL de 56.4 % como se observa en la fig. 22, con 2.0 L/m³ de terrasil se obtiene 55.3 % como se puede observar en la fig. 23.

Tabla 11

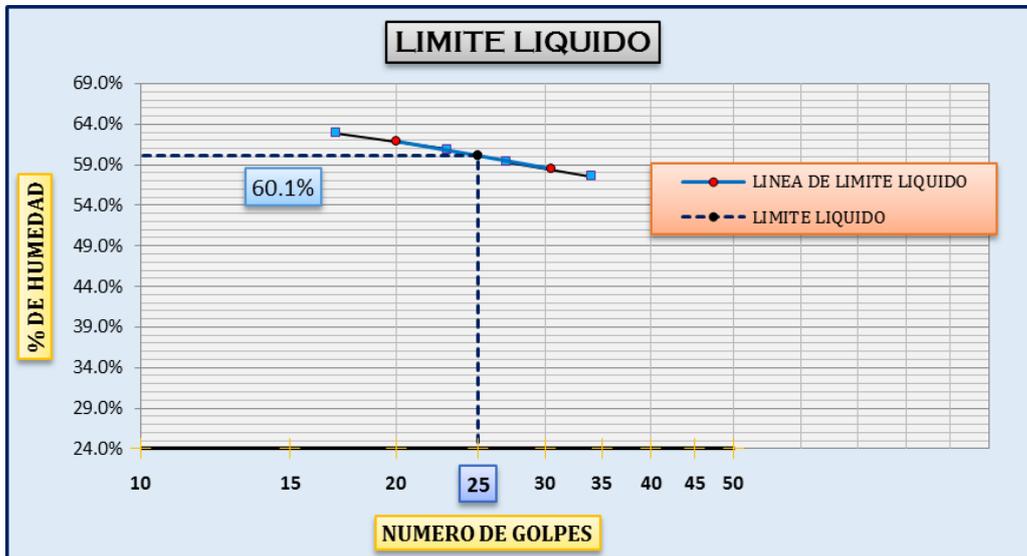
Resultados de Límite Líquido

DOSIS DE TERRASIL (L/m ³)	LL
0.0	60.1
0.2	59.5
0.8	58.3
1.4	56.4
2.0	55.3

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

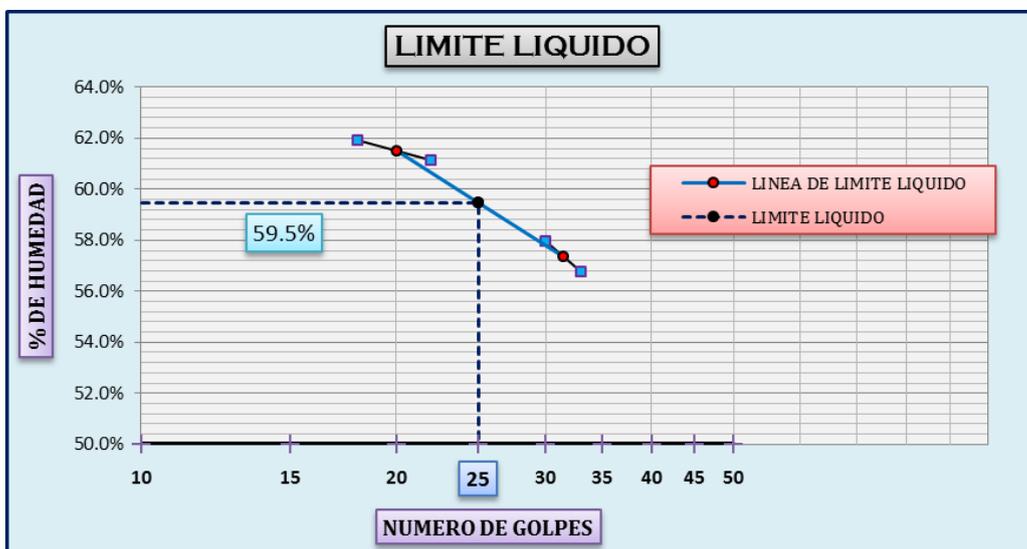
Límite Líquido para dosificación de 0.0 L/m³ (suelo natural).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20

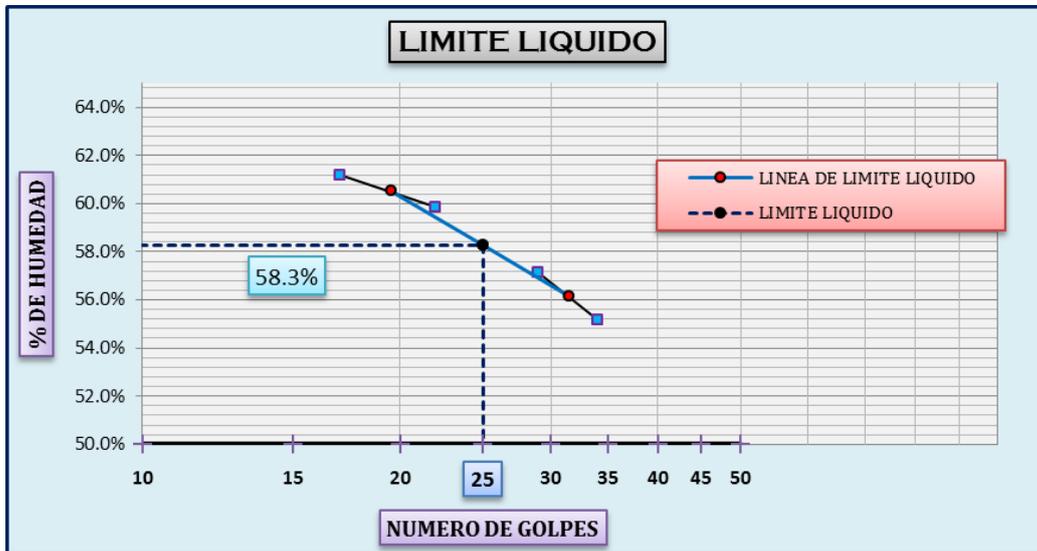
Límite Líquido para dosificación de 0.2 L/m³.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21

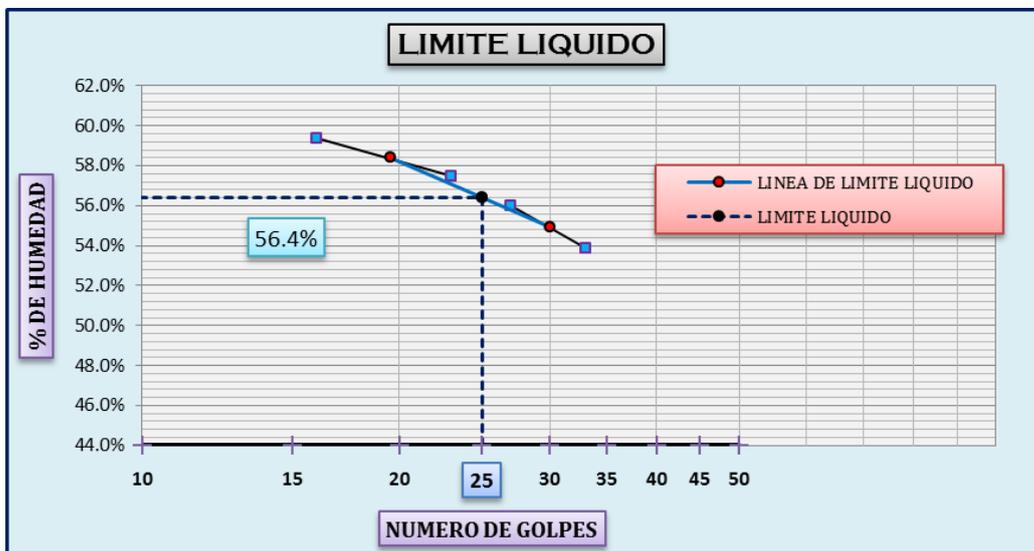
Límite Líquido para dosificación de 0.8 L/m³.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22

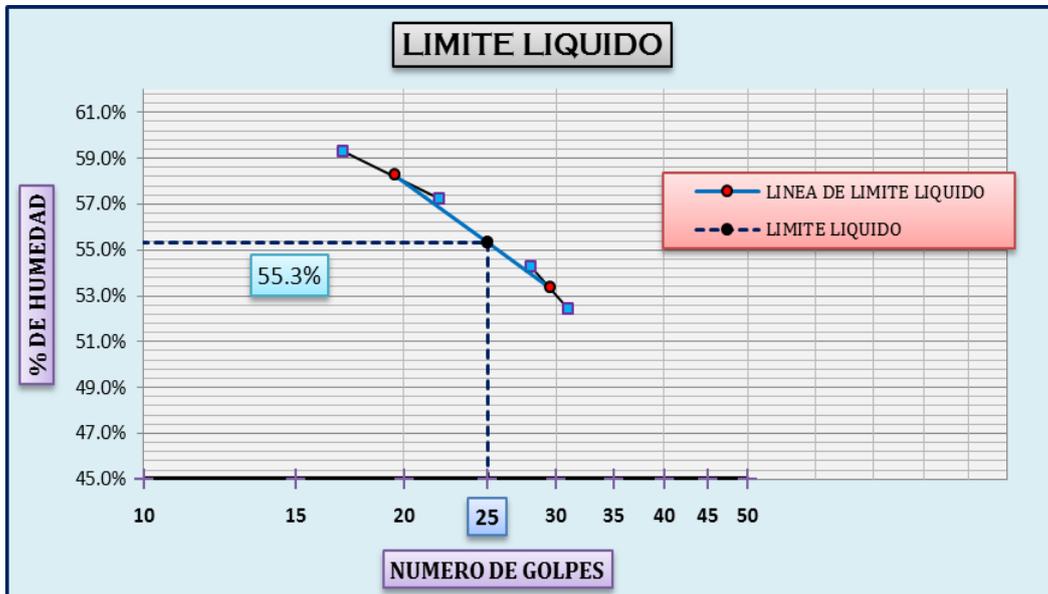
Límite Líquido para dosificación de 1.4 L/m³.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23

Límite Líquido para dosificación de 2.0 L/m³.

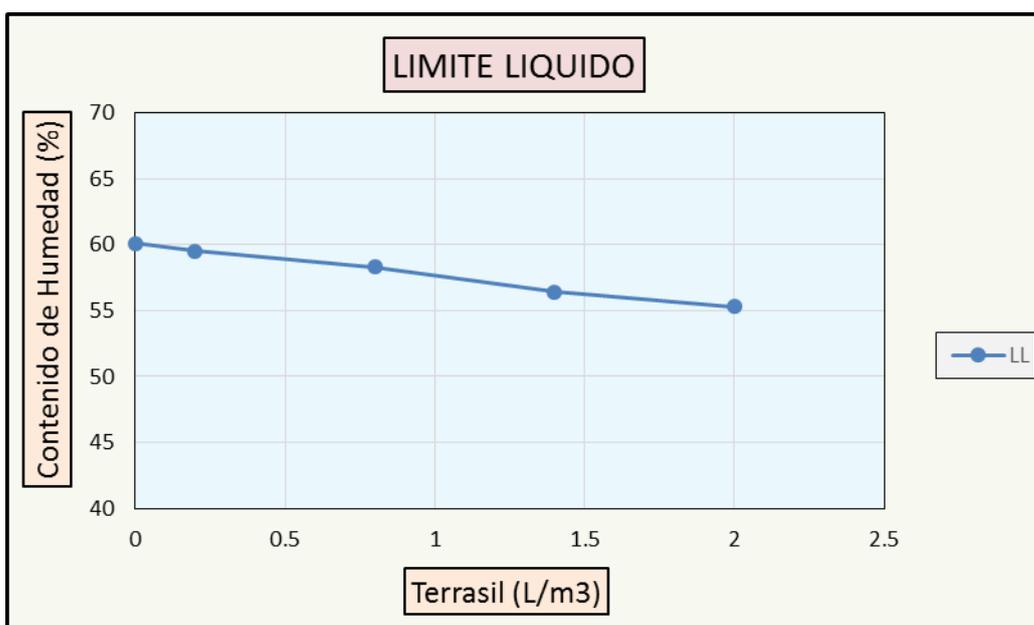


Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, en la figura 24, se observa que cuando se aumenta la dosis de Terrasil se tiene una disminución del Límite Líquido.

Figura 24

Reducción del Límite Líquido.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Resultados de Límite Plástico

En la tabla 12 se observa que el Límite Plástico (LP) del suelo tratado exhibe un aumento en comparación del suelo sin tratar. Ya que el Límite Plástico del suelo no tratado es de 36.6 %, con 0.2 L/m³ de terrasil se obtiene un LP de 36.8, con 0.8 L/m³ de terrasil se obtiene un LP de 37.5 %, con 1.4 L/m³ de terrasil se obtiene un LP de 38.6 %, con 2.0 L/m³ de terrasil se obtiene un LP de 40.1 %.

Tabla 12

Resultados de Límite Plástico.

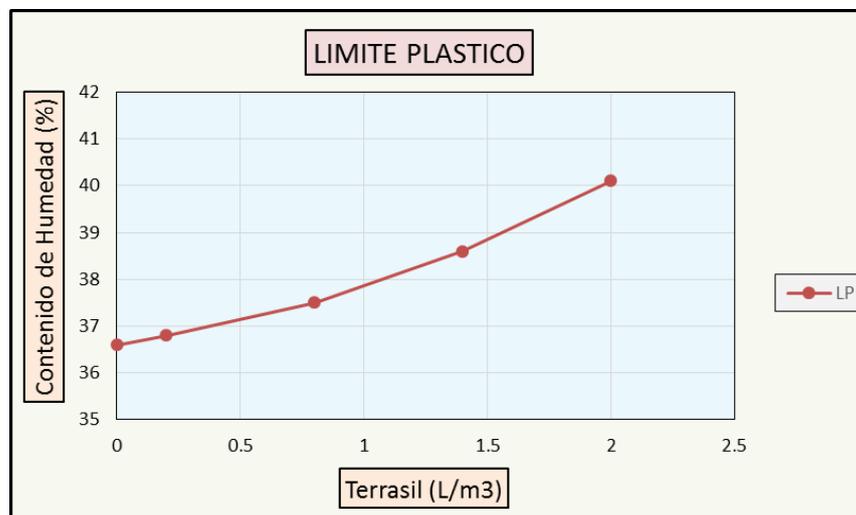
DOSIS DE TERRASIL (L/m ³)	LP
0.0	36.6
0.2	36.8
0.8	37.5
1.4	38.6
2.0	40.1

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se muestra en la Fig. 25 el aumento del Límite Plástico, al aumentar la dosis de terrasil.

Figura 25

Aumento del Límite Plástico.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Resultados del Índice de Plasticidad.

En la tabla 13, se observa que el Índice de Plasticidad (IP) del suelo tratado exhibe una reducción en comparación con el suelo no tratado. Ya que el suelo sin tratar tiene un Índice de Plasticidad de 23.5%; con 0.2 L/m³ de terrasil se tiene un IP de 22.7 %, con 0.8 L/m³ de terrasil se tiene un IP de 20.8 %, con 1.4 L/m³ de terrasil se tiene un IP de 17.8 %, con 2.0 L/m³ de terrasil se tiene un IP de 15.2 %.

Tabla 13

Resultados del Índice de Plasticidad

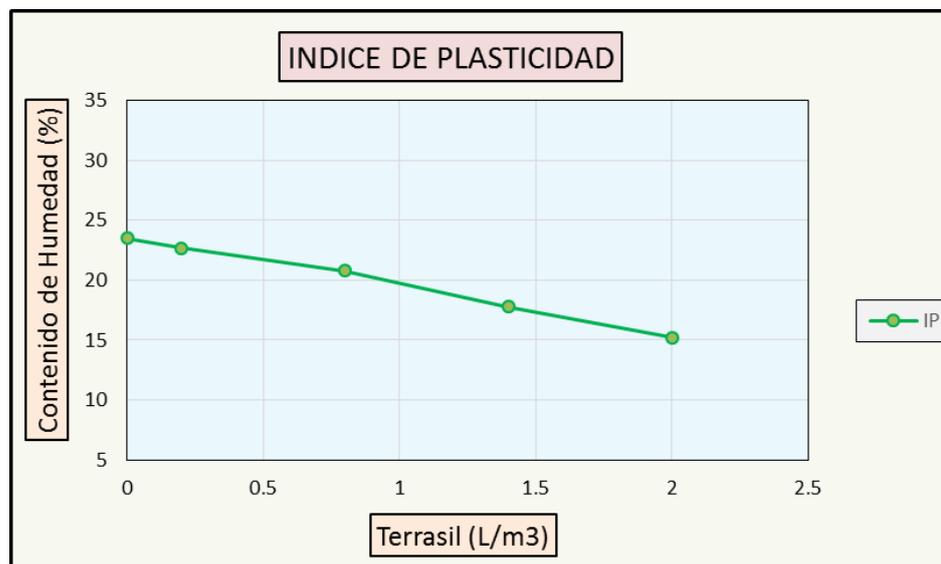
DOSIS DE TERRASIL (L/m ³)	IP
0.0	23.5
0.2	22.7
0.8	20.8
1.4	17.8
2.0	15.2

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se muestra en la Fig. 26 que el Índice de Plasticidad presenta una reducción según se aumenta la dosis de Terrasil.

Figura 26

Reducción del Índice de Plasticidad.



Fuente: Elaboración propia.

4.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

En la tabla 14 y la fig. 27, se observa que al aumentar la dosis de Terrasil se tiene una reducción en el Límite Líquido y se tiene un aumento en el Límite Plástico, por lo que se presenta una reducción en el Índice de Plasticidad.

Tabla 14

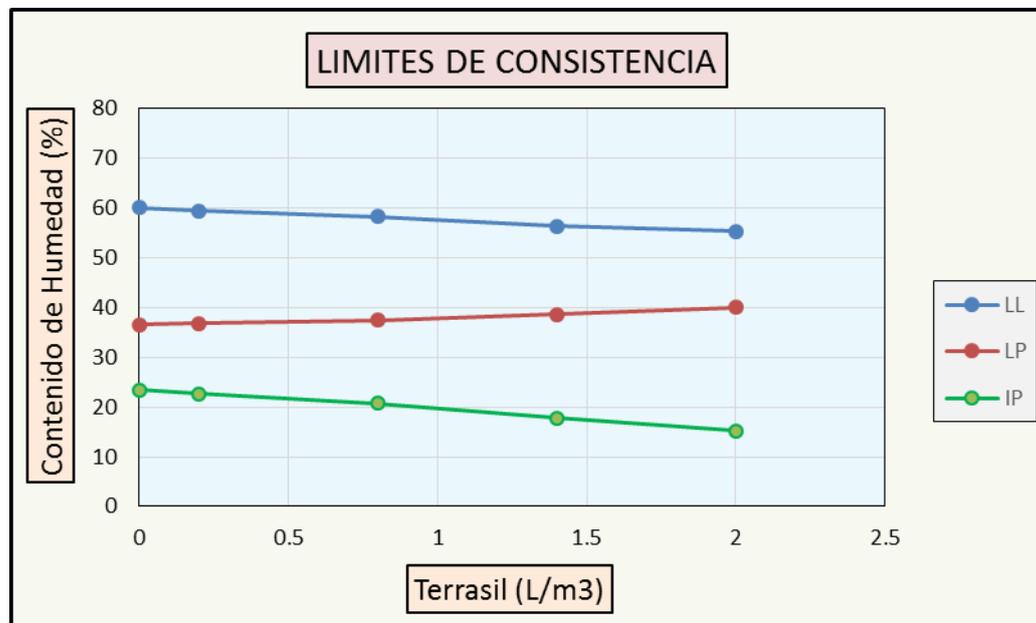
Límites de consistencia.

TERRASIL (L/m ³)	LL	LP	IP
0.0	60.1	36.6	23.5
0.2	59.5	36.8	22.7
0.8	58.3	37.5	20.8
1.4	56.4	38.6	17.8
2.0	55.3	40.1	15.2

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27:

Límites de consistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Índice de Plasticidad – Características.

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. MTC-2014.

En la tabla 14, se observa que el índice de plasticidad del suelo natural o sin tratar es de 23.5%, por lo que se trata de un suelo de alta plasticidad como se identifica en la tabla 15 del MTC-2014, al aumentar una dosis de terrasil de 0.2 lt/m³ se tiene una reducción de 22.7 %, con 0.8 lt/m³ reduce a 20.8%, con 1.4 lt/m³ reduce a 17.8 %, y con una dosis de 2.0 lt/m³ reduce a 15.2 %. Por lo que se puede notar una mejoría con respecto a la plasticidad del suelo.

La dosis óptima de terrasil es de 1.4 L/m³, ya que con esta dosificación mejora la característica del suelo, pasando de un suelo de plasticidad alta a un suelo de plasticidad media.

4.3. RESULTADOS DEL CBR

En la tabla 16 se observa los resultados del CBR:

Tabla 16

Dosificación de Terrasil Vs CBR.

TERRASIL (L/m3)	CBR
0.0	5.0%
0.2	6.6%
0.8	9.2%
1.4	14.1%
2.0	16.4%

Fuente: Elaboración propia.

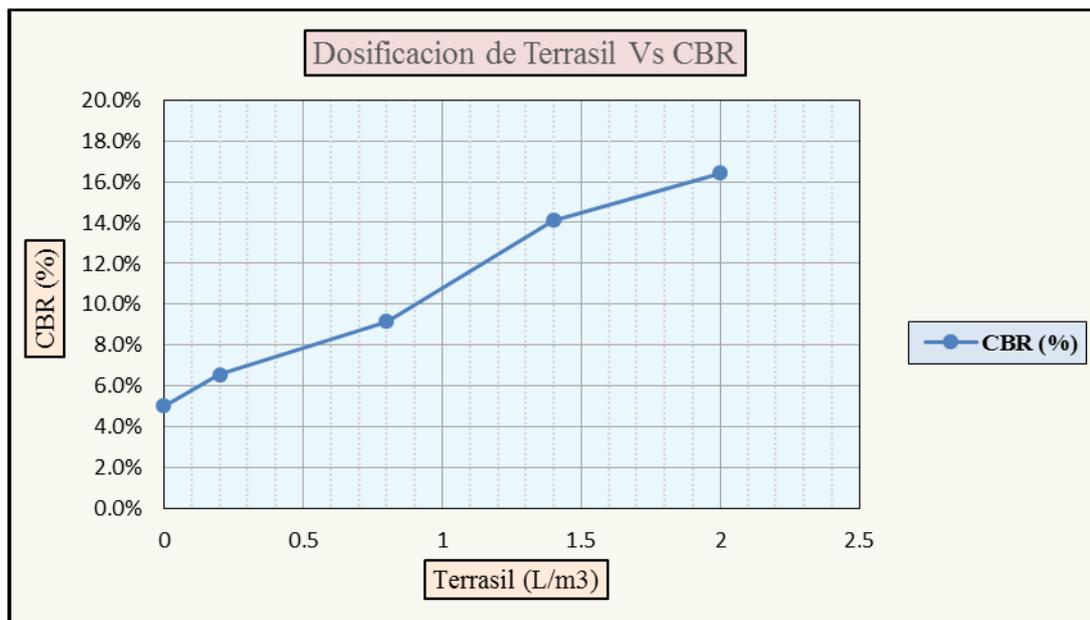
4.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR

Como se puede observar en la tabla 16 y figura 28, el CBR del suelo no tratado es de 5.0 %, este resultado evaluamos en la tabla N° 17, lo cual se trata de una subrasante insuficiente. Agregando una dosificación de 0.2 lt/m³ se obtiene un CBR de 6.6%, observando la tabla 17 se trata de una subrasante regular. Incorporando 0.8lt/m³ de terrasil se obtiene un CBR de 9.2%, y observando la tabla 17 se categoriza como subrasante regular. Con 1.4lt/m³ de terrasil se obtiene un CBR de 14.1%, observando la tabla 17 se categoriza como una subrasante buena. Con 2.0lt/m³ se obtiene un CBR de 16.4%, y observando la tabla 17 Se categoriza como una subrasante buena. Por lo que se puede ver una mejora al aumentar la dosis de Terrasil.

La dosis óptima de terrasil es de 1.4 L/m³, ya que con esta dosificación mejora el CBR a 14.1%, este resultado se categoriza como una subrasante buena.

Figura 28

Dosificación de Terrasil Vs CBR.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se tiene la siguiente tabla del MTC, correspondiente a las categorías de la subrasante:

Tabla 17

Categorías de Subrasante.

Categorías de Sub rasante	CBR
S0: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Insuficiente	De CBR \geq 3% A CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR \geq 6% A CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR \geq 10% A CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR \geq 20% A CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	CBR \geq 30%

Fuente: Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014).

4.5. RESULTADOS DE EXPANSIÓN

Se presenta los siguientes resultados de expansión:

Tabla 18

Tiempo (hr) Vs Expansión (%).

Tiempo (hrs.)	Expansión (%)				
	Terrasil 0.0 L/m ³	Terrasil 0.2 L/m ³	Terrasil 0.8 L/m ³	Terrasil 1.4 L/m ³	Terrasil 2.0 L/m ³
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
24	3.41%	2.45%	0.79%	0.19%	0.15%
48	4.90%	3.83%	2.05%	0.49%	0.42%
72	5.71%	4.74%	3.05%	2.05%	1.84%
96	6.25%	5.53%	3.77%	2.89%	2.68%

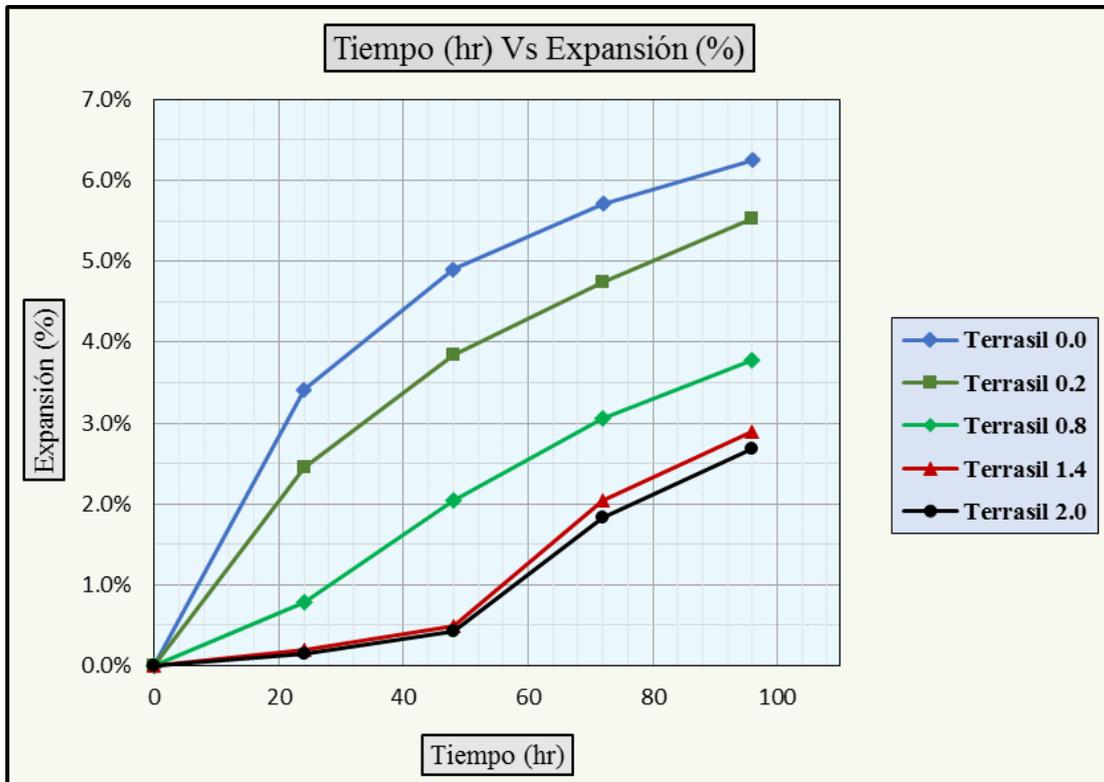
Fuente: Elaboración propia.

4.6. DISCUSIÓN DE LO RESULTADOS DE LA EXPANSIÓN

En la Fig. 29 se observa que al paso de las 96 horas se tiene mayor expansión con el suelo no tratado que con los suelos tratados.

Figura 29

Tiempo (hr) Vs Expansión (%)

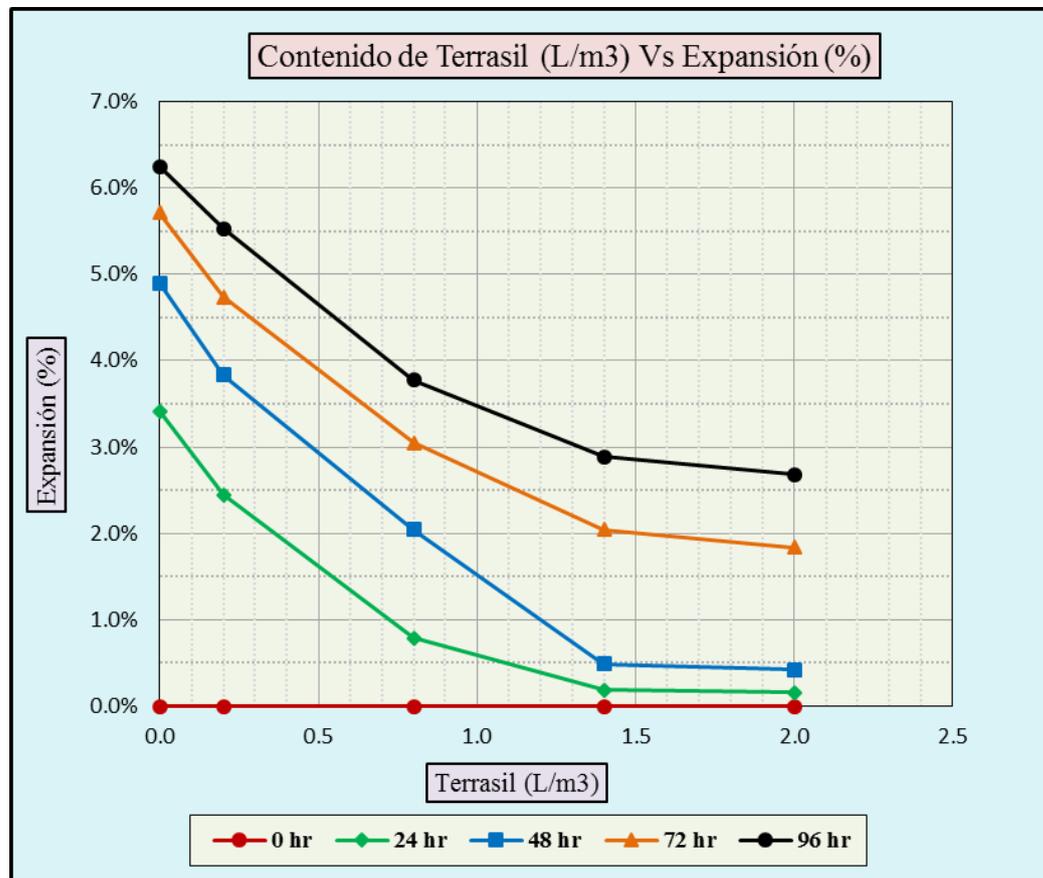


Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 30 se observa que se tiene mayor expansión con el suelo no tratado que con los suelos tratados; por lo que la expansión disminuye al aumentar la dosificación del terrasil.

Figura 30

Contenido de Terrasil (Lt/m³) Vs Expansión (%)



Fuente: Elaboración propia.

4.7. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA (UCS)

Se realizó 3 probetas por cada dosificación. Se presenta un resumen en la tabla 19, en donde se presenta la cohesión y la resistencia ultima. Y el promedio por cada dosificación utilizada.

Tabla 19*Resultados de compresión simple.*

Dosis	Espécimen N°	Cohesión "C" (kg/cm ²)	Promedio "C" (kg/cm ²)	UCS "qu" (Kg/cm ²)	Promedio "qu" (Kg/cm ²)
Terrasil 0.0 L/m ³	1	0.19	0.19	0.38	0.37
	2	0.19			
	3	0.18			
Terrasil 0.2 L/m ³	4	0.22	0.22	0.44	0.44
	5	0.22			
	6	0.23			
Terrasil 0.8 L/m ³	7	0.27	0.27	0.53	0.53
	8	0.27			
	9	0.26			
Terrasil 1.4 L/m ³	10	0.31	0.30	0.61	0.59
	11	0.29			
	12	0.29			
Terrasil 2.0 L/m ³	13	0.30	0.31	0.59	0.61
	14	0.32			
	15	0.31			

Fuente: Elaboración propia.

4.8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA UCS

Se realizaron en total 15 probetas, 3 probetas para la muestra natural y 3 probetas para cada dosificación, y se determinó el promedio para cada dosificación como se muestra en la tabla 20, con su respectivo gráfico que se presenta en la figura 31.

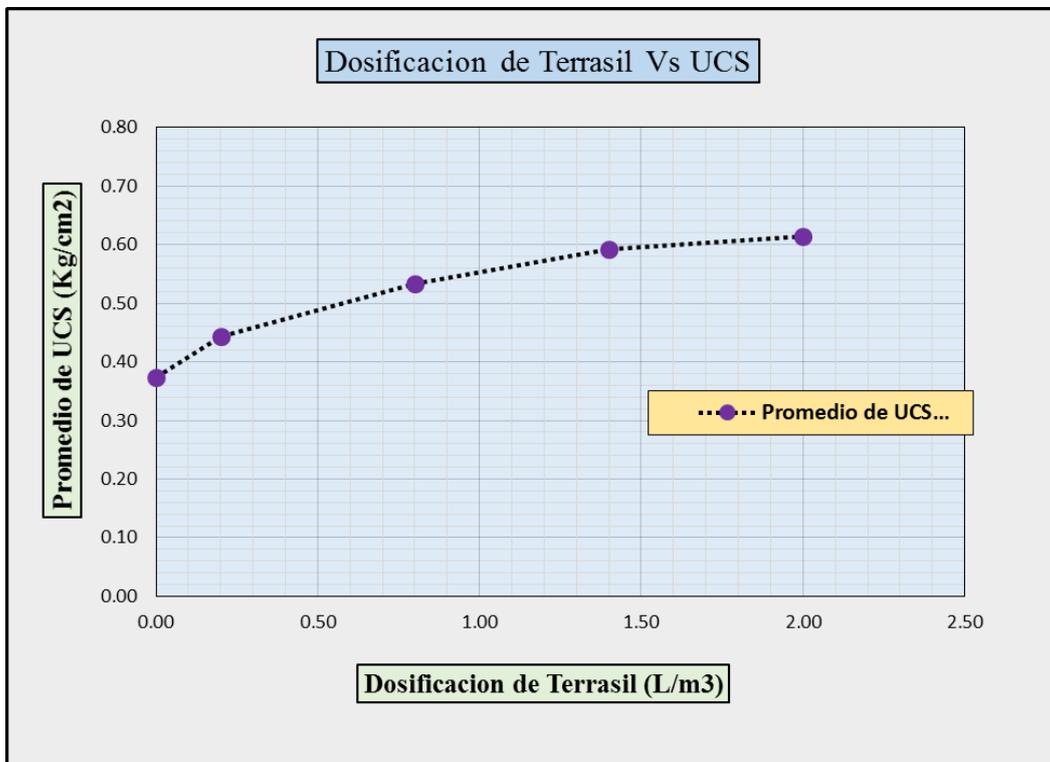
Tabla 20*Dosificación de Terrasil Vs UCS.*

Dosificación de Terrasil (L/m ³)	Promedio de UCS (Kg/cm ²)
0.0	0.37
0.2	0.44
0.8	0.53
1.4	0.59
2.0	0.61

Fuente: Elaboración propia.

Figura 31

Dosificación de Terrasil Vs UCS



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se tiene la siguiente tabla del MTC, correspondiente a la consistencia del suelo y la resistencia a la compresión no confinada:

Tabla 21

Consistencia del suelo.

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

Fuente: Manual de ensayo de Materiales MTC-2017.

Del suelo estudiado se presenta los resultados en la tabla 22 obtenido del promedio

de UCS:

Tabla 22

Promedio de UCS.

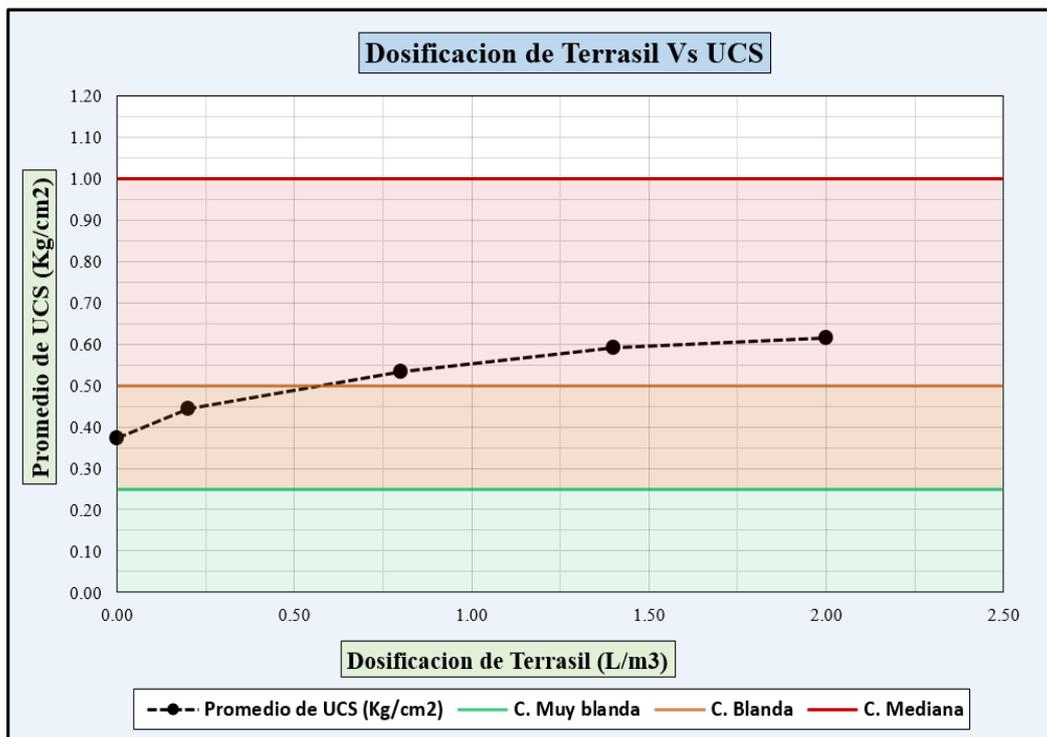
Dosificación de Terrasil (L/m ³)	Promedio de UCS (Kg/cm ²)
0.0	0.37
0.2	0.44
0.8	0.53
1.4	0.59
2.0	0.61

Fuente: Elaboración propia.

Dichos resultados se presentan en la siguiente figura, considerando las consistencias del suelo según el Manual de ensayo de Materiales MTC-2017.

Figura 32

Dosificación de Terrasil Vs UCS.



Fuente: Elaboración propia.



Como se observa el suelo no tratado tiene una resistencia a la compresión no confinada (UCS) de 0.37 kg/cm^2 por lo que se trata de un suelo consistencia blanda, y agregando una dosificación de 0.2 lt/m^3 de terrasil se obtuvo un UCS de 0.44 kg/cm^2 siendo la consistencia blanda; con 0.8 lt/m^3 se obtuvo un UCS de 0.53 kg/cm^2 siendo la consistencia mediana; con 1.4 lt/m^3 se obtuvo un UCS de 0.59 kg/cm^2 siendo la consistencia mediana; y con 2.0 lt/m^3 de terrasil se obtuvo un UCS de 0.61 kg/cm^2 , correspondiéndole una consistencia mediana. Por lo que se puede observar en la Fig. 32, la Curva de Dosificación Vs UCS, se desarrolla desde una consistencia blanda a una consistencia mediana.

La dosis óptima de terrasil es 1.4 L/m^3 , ya que con esta dosificación mejora la resistencia a la compresión no confinada y la consistencia del suelo pasando de blanda a mediana.

4.9. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Se realizó el análisis de precio unitario considerando el mejoramiento de la subrasante con material de cantera y con el aditivo terrasil, ambos para 1 m^3 .

- **Mejoramiento de la subrasante con material de cantera.**

Rendimiento para esta partida se está considerando $500 \text{ m}^3/\text{día}$. Para lo cual se tiene los siguientes recursos, con sus respectivos precios, de acuerdo a su unidad de medida.

Tabla 23*Recurso mano de obra - Cantera.*

Mano de Obra	Precio S/.
CAPATAZ	25.22
OPERARIO	24.22
PEON	19.20

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 24***Recurso materiales - Cantera.*

Materiales	Precio S/.
AGUA PUESTA EN OBRA	8.02
MATERIAL DE CANTERA	131.5

Fuente: Elaboración propia.

El costo de material de cantera, en la selva, es elevado con respecto al costo de material de cantera en zona de sierra por ejemplo, ya que no se cuenta con este recurso en zonas aledañas. Y como en esta partida se no se considera la estabilización con terrasil, sino, el mejoramiento con material de cantera, lo cual es escaso en la selva, es por esto que se considera 131.5 soles de m³ de este recurso.

Tabla 25*Recurso equipos - Cantera.*

Equipos	Precio S/.
HERRAMIENTAS MANUALES	1.46
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP	156.84
MOTONIVELADORA 130-135 HP	205.77
CAMION CISTERNA (2,500 GLNS)	128.96

Fuente: Elaboración propia.



Con una cuadrilla, en mano de obra de: 0.1 capataz, 0.5 operario, y 4 peones, y cuadrilla de Equipos de: 1 rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135 HP, 1 motoniveladora 130-135 HP, y 1 camión cisterna (2,500 GLNS).

Se realizó el análisis de precio unitario, el cual se encuentra en anexos, se obtuvo que 1m³ de mejoramiento de la sub rasante con material de cantera será de 141.39 soles.

- **Mejoramiento de la subrasante con 1.4L/m³ de aditivo terrasil.**

Rendimiento para esta partida se está considerando 500 m³/día. Para lo cual se tiene los siguientes recursos, con sus respectivos precios, de acuerdo a su unidad de medida. Se considera el mismo rendimiento puesto que el aditivo se disuelve en el agua antes de ser aplicado en la capa se suelo que se mejorará.

Tabla 26

Recurso mano de obra - Terrasil.

Mano de Obra	Precio S/.
CAPATAZ	25.22
OPERARIO	24.22
PEON	19.20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27

Recurso materiales - Terrasil.

Materiales	Precio S/.
AGUA PUESTA EN OBRA	8.02
ADITIVO ESTABILIZADOR TERRASIL	65.7

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 28

Recurso equipo - Terrasil.

Equipos	Precio S/.
HERRAMIENTAS MANUALES	1.16
RODILLO LISO VIBRATORIO	156.84
MOTONIVELADORA 130-135 HP	205.77
CAMION CISTERNA (2,500 GLNS)	128.96

Fuente: Elaboración propia.

Con la misma cuadrilla, en mano de obra de: 0.1 capataz, 0.5 operario, y 4 peones, y también con la misma cuadrilla de Equipos de: 1 rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135 HP, 1 motoniveladora 130-135 HP, y 1 camión cisterna (2,500 GLNS).

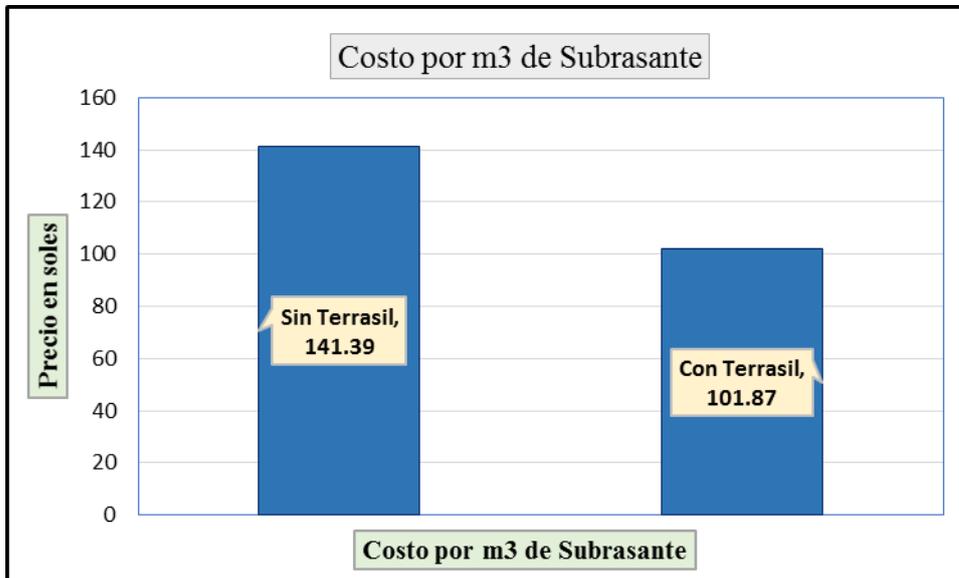
Se realizó el análisis de precio unitario, el cual se encuentra en anexos, se obtuvo que 1m³ de mejoramiento de la sub rasante con material de cantera será de 101.87 soles.

Finalmente se realiza la comparación del análisis de precios unitarios tanto del mejoramiento de la subrasante con material de cantera y adicionando terrasil.

A continuación, se presenta el costo por m³ de sub rasante, tanto usando material de cantera y aplicando terrasil.

Figura 33

Costo por m³ de subrasante.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura precedente, se puede evidenciar que la diferencia entre los montos es de 39.52 soles, lo que significa que la estabilización con la adición de terrasil es 28%, más económico con respecto al uso de material de préstamo.



V. CONCLUSIONES

Para realizar los ensayos se optó usar dosis del agente estabilizador terrasil de: 0.2 L/m³, 0.8 L/m³, 1.4 L/m³, 2.0 L/m³. De donde se obtuvo que la dosificación óptima es de 1.4 L/m³, ya que con esta dosificación se tiene una mejoría óptima en cuanto al valor relativo de soporte (CBR), expansión, resistencia a la compresión simple (UCS) e índice de plasticidad (IP).

Con respecto al comportamiento del CBR, del suelo blando tratado con terrasil, se evidencia la evolución de la siguiente forma: 5.0, 6.6, 9.2, 14.1 y 16.4 %, estos para dosificaciones de terrasil de: 0.0, 0.2, 0.8, 1.4, y 2.0 (L/m³) respectivamente. Pasando así, de una subrasante insuficiente a una subrasante buena.

Referente al comportamiento de la expansión, del suelo blando tratado con terrasil, se evidencia la disminución de la siguiente forma: 6.25, 5.53, 3.77, 2.89 y 2.68 %, estos para dosificaciones de terrasil de: 0.0, 0.2, 0.8, 1.4, y 2.0 (L/m³) respectivamente. Por lo que se tiene menor expansión en los suelos tratados.

En cuanto al comportamiento de UCS, del suelo blando tratado con terrasil, se evidencia la mejora en la resistencia de la siguiente forma: 0.37, 0.44, 0.53, 0.59 y 0.61 (Kg/cm²), estos para dosificaciones de terrasil de: 0.0, 0.2, 0.8, 1.4, y 2.0 (L/m³) respectivamente. Mejorando así la consistencia del suelo de blanda a mediana.

Finalmente, el índice de plasticidad (IP), del suelo blando tratado con terrasil, presenta una reducción de la siguiente forma: 23.5, 22.7, 20.8, 17.8 y 15.2 %, estos para dosificaciones de terrasil de: 0.0, 0.2, 0.8, 1.4, y 2.0 (L/m³) respectivamente. Mejorando así la plasticidad de alta a media.



VI. RECOMENDACIONES

Cuando en una sub rasante, se tenga un suelo insuficiente, se recomienda el uso del estabilizador terrasil para poderlo estabilizar, ya que mejora las propiedades geotécnicas del suelo para uso vial.

Para conocer mejor la variable, tiempo de curado, se recomienda evaluar el suelo tratado con terrasil para mayores periodos de curado.

Para ampliar y conocer más las propiedades de este producto, se recomienda realizar estudios sobre el uso del terrasil en otros tipos de suelos que requieran estabilización.

Para poder ampliar las alternativas de solución básica en el mejoramiento de suelos, se recomienda investigar otros estabilizadores químicos a base de nanotecnología para así en un futuro próximo este producto podría ser parte de la normativa.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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



- Majeed, zaid hameed, & Taha, mohd raihan. (2012). Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil. *Journal of Asian Scientific Research*, 2(11), 587–592.
https://www.academia.edu/download/49597387/211_20587-592.pdf
- Meeravali, K., Ruben, N., & Rangaswamy, K. (2020). Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1030–1037.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.384>
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (2nd ed.). Universidad Católica de Colombia.
- MTC. (2017). *Manual de Ensayo de Materiales* (1st ed.). Servicios Gráficos Squadrito EIRL.
- Taha, M. R., Jawad, I. T., & Majeed, Z. H. (2015). Treatment of Soft Soil with Nano-Magnesium Oxide. *Nanotechnology in Construction*, 1(1), 1–9.
- Vivar, G. (1995). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIEMENTOS* (2nd ed.). CIP - Capitulo de Ingenieria Civil.



ANEXOS

ANEXO 1: ENSAYOS AL SUELO NO TRATADO - DOSIFICACIÓN 0.0 Lt/m³

ANEXO 2: ENSAYOS AL SUELO TRATADO - DOSIFICACIÓN DE 0.2 Lt/m³

ANEXO 3: ENSAYOS AL SUELO TRATADO - DOSIFICACIÓN DE 0.8 Lt/m³

ANEXO 4: ENSAYOS AL SUELO TRATADO - DOSIFICACIÓN DE 1.4 Lt/m³

ANEXO 5: ENSAYOS AL SUELO TRATADO - DOSIFICACIÓN DE 2.0 Lt/m³

ANEXO 6: FICHA TÉCNICA DEL AGENTE ESTABILIZADOR QUÍMICO
TERRASIL

ANEXO 07: ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO



ANEXO 01

ENSAYOS AL SUELO NO TRATADO

DOSIFICACIÓN 0.0 Lt/m³



CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.			
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".			
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400			
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400	MUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD: 1.5 m
FECHA :	20 de Mayo.			

HUMEDAD NATURAL

DESCRIPCION	UND	1	2	3
CAPSULA	No	T-01	T-05	T-14
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	81.76	88.67	85.54
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	73.26	79.88	75.5
AGUA	gr.	8.5	8.79	10.04
PESO DE LA CAPSULA	gr.	22.4	24.66	21.49
PESO DEL SUELO SECO	gr.	50.86	55.22	54.01
LIMITE PLASTICO	%	16.71%	15.92%	18.59%

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL 17.1%



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y MATERIALES



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO (ASTM D422)
ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACION (D2216 - D854 - D4318 - D427 - D2487)

REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe					
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE"					
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400					
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400	MUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD:	1.50 m.	
FECHA:	20 de Mayo del 2022					

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PESO RET. CORREGIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.600	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.050	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	3.73	3.73	0.29	0.29	99.71
3/8"	9.525	0.00	0.00	0.00	0.29	99.71
1/4"	6.350	0.38	0.38	0.03	0.32	99.68
No4	4.760	0.11	0.11	0.01	0.33	99.67
No8	2.380	6.22	6.22	0.49	0.82	99.18
No10	2.000	1.23	1.23	0.10	0.92	99.08
No16	1.190	2.99	2.99	0.24	1.15	98.85
No20	0.840	2.44	2.44	0.19	1.35	98.65
No30	0.590	3.35	3.35	0.26	1.61	98.39
No40	0.420	4.84	4.84	0.38	1.99	98.01
No 50	0.300	5.66	5.66	0.45	2.43	97.57
No60	0.250	0.00	0.00	0.00	2.43	97.57
No80	0.180	21.16	21.16	1.66	4.10	95.90
No100	0.149	7.90	7.90	0.62	4.72	95.28
No200	0.074	45.84	45.84	3.61	8.33	91.67
BASE		3.32	1165.21	91.67	100.00	0.00
TOTAL		109.17	1271.06	100.00		
% PERDIDA		0%	0%			

DESCRIPCION DE LA MUESTRA

P. I. = 1271.00
P. L. = 109.11
P. P. = 1161.89

LIMITES DE CONSISTENCIA:

L. L. = 60.1%
L. P. = 36.6%
I. P. = 23.5%

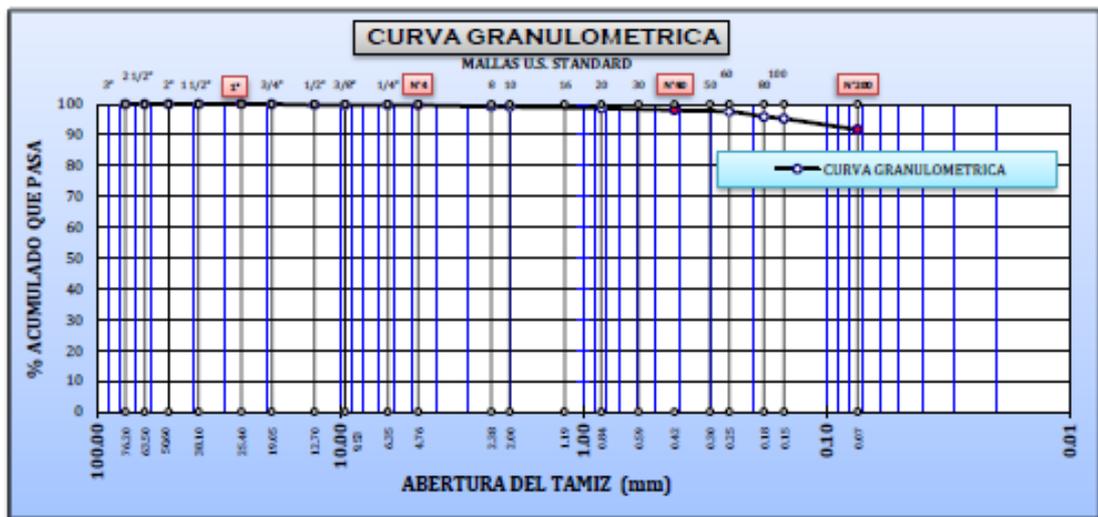
CARACT. GRANULOMETRICAS:

D10= ---- Cu= ----
D30= ---- Cc= ----
D60= ----

CLASIFICACION:

S.U.C.S. : MH
LIMO DE ALTA PLASTICIDAD

OBS.: SUELO FINO





LIMITES DE CONSISTENCIA

REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.			
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".			
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400			
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400	MUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD: 1.5 m
FECHA:	23 de Mayo del 2022			

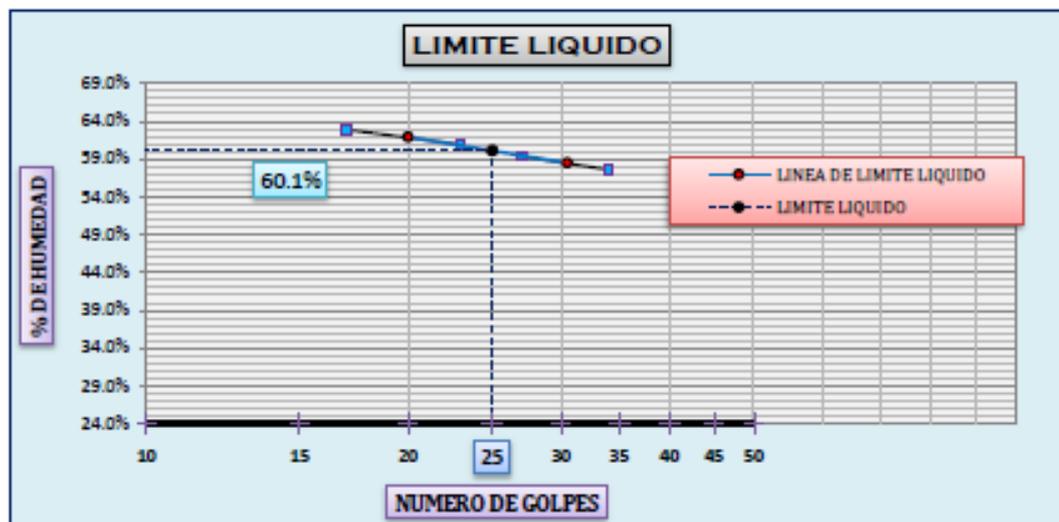
LIMITE LIQUIDO

DESCRIPCION	UND	1	2	3	4
CAPSULA	N°	B-3	P-2	T-W	P-4
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	60.31	63.6	62.72	55.51
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	50.7	53.35	53.21	47.71
AGUA	gr.	9.61	10.25	9.51	7.8
PESO DE LA CAPSULA	gr.	35.42	36.53	37.19	34.17
PESO DEL SUELO SECO	gr.	15.28	16.82	16.02	13.54
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	62.89%	60.94%	59.36%	57.61%
NUMERO DE GOLPES	N°	17	23	27	34

LIMITE PLASTICO

DESCRIPCION	UND	1	2	3
CAPSULA	No	T-2	S-1	A-6
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	28.09	31.73	26.79
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	26.27	29.84	24.85
AGUA	gr.	1.82	1.89	1.94
PESO DE LA CAPSULA	gr.	21.48	24.47	19.54
PESO DEL SUELO SECO	gr.	4.79	5.37	5.31
LIMITE PLASTICO	%	38.00%	35.20%	36.53%

LIMITE LIQUIDO	60.1%
LIMITE PLASTICO	36.6%
INDICE DE PLASTICIDAD	23.5%



**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD PROCTOR
(ASTM D 698)**

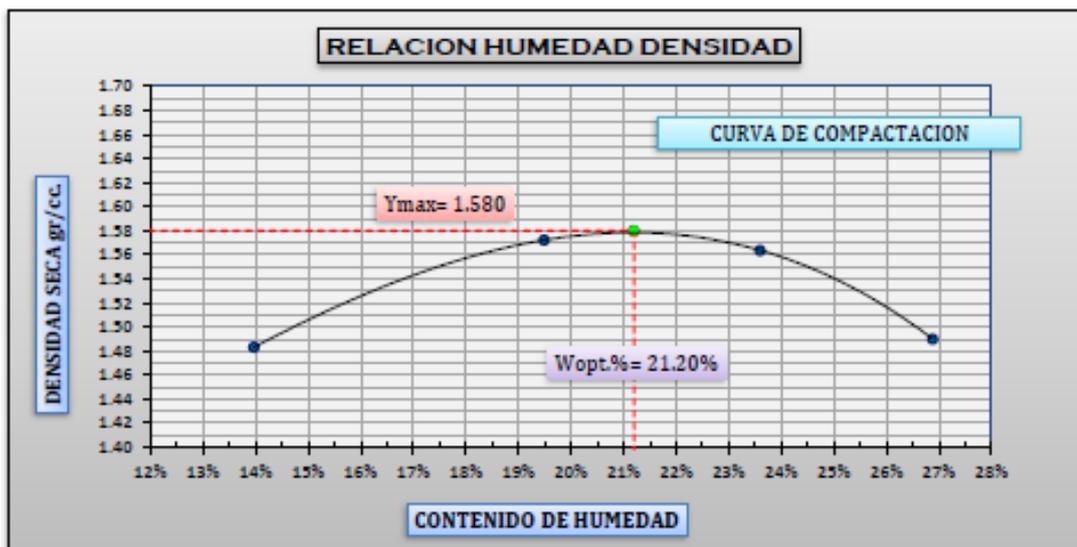
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia RAMOS QUISPE			
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A ESTABILIZACION DE SUELOS PARA SUBRASANTE"			
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400			
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400	MUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD: 1.5 m
FECHA:	24 de Mayo del 2022			

MOLDE N°	01	VOLUMEN DEL MOLDE	944.74	CC
N° DE CAPAS	05	GOLPES POR CAPA	25	

Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	5770	5948	5999	5959
Peso del Molde	gr.	4173	4173	4173	4173
Peso del Suelo Humedo	gr/cc.	1597	1775	1826	1786
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	1.69	1.88	1.93	1.89

Capsula	N°	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Suelo Humedo + Capsula	gr.	159.64	177.61	192.11	206.88	187.04	223.40	187.08	191.13
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	141.36	158.87	165.70	178.76	159.13	187.75	154.48	157.13
Peso del Agua	gr.	18.28	18.74	26.41	28.12	27.91	35.65	32.60	34.00
Peso de la Capsula	gr.	17.08	17.17	29.36	35.42	40.12	37.62	33.03	30.88
Peso del Suelo Seco	gr.	124.28	141.70	136.34	143.34	119.01	150.13	121.45	126.25
% de Humedad	%	14.71%	13.23%	19.37%	19.62%	23.45%	23.75%	26.84%	26.93%
Promedio de Humedad	%	13.97%		19.49%		23.60%		26.89%	
Densidad del Suelo Seco	%	1.483		1.572		1.564		1.490	

METODO: MODIFICADO "A"	MAXIMA DENSIDAD SECA: 1.58 gr/cc
	HUMEDAD OPTIMA: 21.2%





ENSAYO DE CBR (VALOR RELATIVO DE SOPORTE)

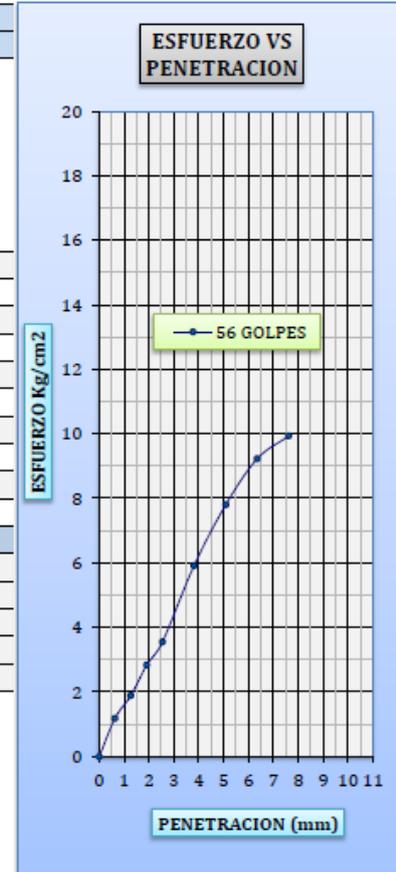
MOLDE No	H-11	N° DE GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5	COND. DE LA MUESTRA	SATURADO

Peso del Suelo Humedo + Molde	gr.	12582
Peso del Molde	gr.	8406
Peso del Suelo Humedo	gr.	4176
Volumen del Suelo	cc.	2122.44
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	1.968

Capsula N°	No	L-5	L-6
Suelo Humedo + Capsula	gr.	176.47	180.15
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	149.01	152.52
Peso del Agua	gr.	27.46	27.63
Peso de la Capsula	gr.	34.17	35.38
Peso del Suelo Seco	gr.	114.84	117.14
% de Humedad	%	23.91%	23.59%
Promedio de Humedad	%	23.75%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.590	

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion (mm)	Expansion (%)
30/05/2022	04:30 p.m.	0 hrs	0.20	0	0.00
31/05/2022	04:30 p.m.	24 hrs	4.17	3.97	3.41%
01/06/2022	04:30 p.m.	48 hrs	5.90	5.70	4.90%
02/06/2022	04:30 p.m.	72 hrs	6.84	6.64	5.71%
03/06/2022	04:30 p.m.	96 hrs	7.47	7.27	6.25%

Penetracion (mm)	MOLDE No H-11			Carga Est.
	Dial	Kg	Kg/cm2	
0.00	0.09	0.00	0.00	
0.63	0.23	23.4	1.2	
1.27	0.37	37.5	1.9	
1.91	0.55	56.3	2.8	
2.54	0.69	70.3	3.5	70.41
3.81	1.15	117.2	5.9	
5.09	1.52	154.7	7.8	105.10
6.35	1.79	182.9	9.2	
7.62	1.93	196.9	9.9	



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR) 5.0%



ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

REALIZADO POR: BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.

PROYECTO DE TESIS : "NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACION DE SUELOS PARA SUBRASANTE".

LUGAR : TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400

CALICATA O CANTERA : KM: 11+400

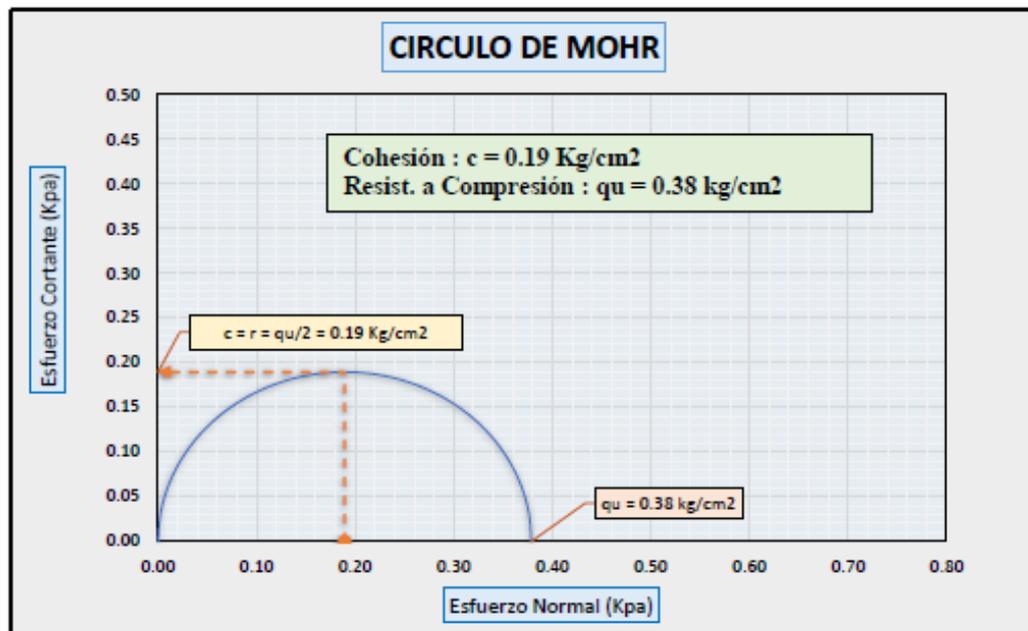
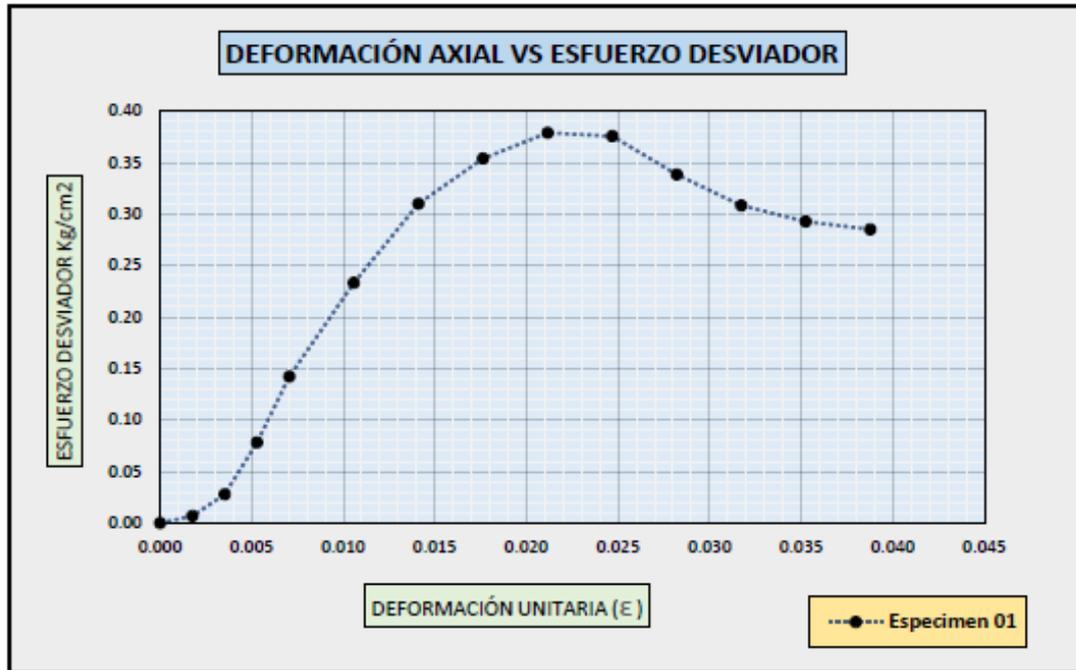
FECHA : 26 de Mayo del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.0 Lt/m³

Descripción	Especimen 01
Peso (g)	1053.46
Diámetro (cm)	7.22
Area Ao (Cm ²)	40.98
Altura Lo (cm)	14.18
Densidad (g/cm ³)	1.81
Humedad W (%)	20.0%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.979	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	41.052	0.00	0.285	0.68	0.007
0.50	0.004	41.124	0.01	1.142	2.72	0.028
0.75	0.005	41.197	0.03	3.221	7.67	0.078
1.00	0.007	41.270	0.06	5.872	13.96	0.142
1.50	0.011	41.417	0.09	9.664	22.89	0.233
2.00	0.014	41.565	0.13	12.885	30.41	0.310
2.50	0.018	41.715	0.14	14.760	34.71	0.354
3.00	0.021	41.865	0.16	15.861	37.17	0.379
3.50	0.025	42.016	0.15	15.780	36.84	0.376
4.00	0.028	42.169	0.14	14.271	33.20	0.338
4.50	0.032	42.322	0.13	13.048	30.24	0.308
5.00	0.035	42.477	0.12	12.436	28.72	0.293
5.50	0.039	42.633	0.12	12.151	27.96	0.285

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

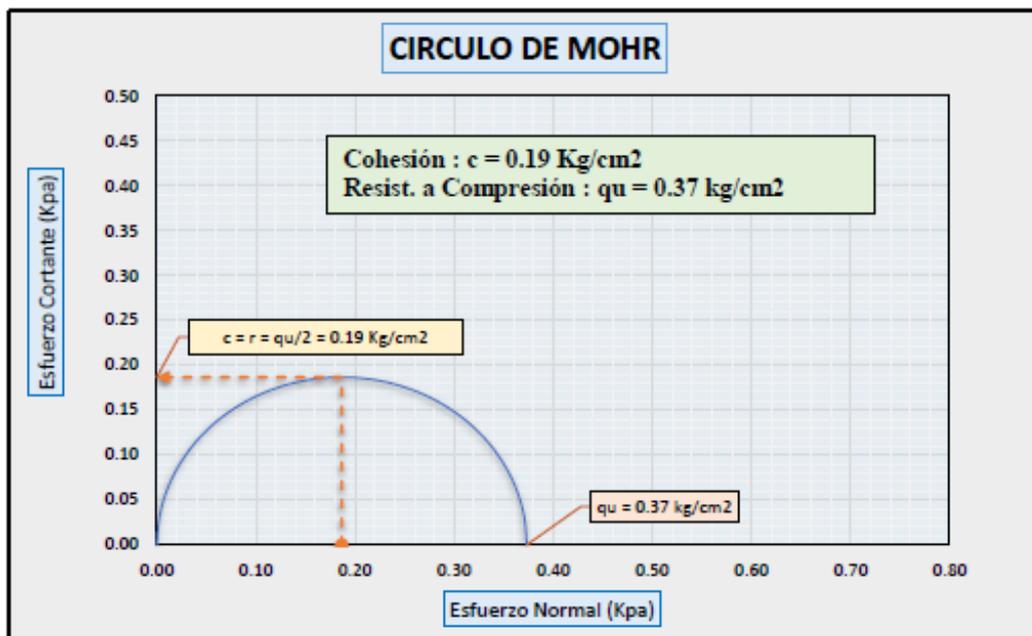
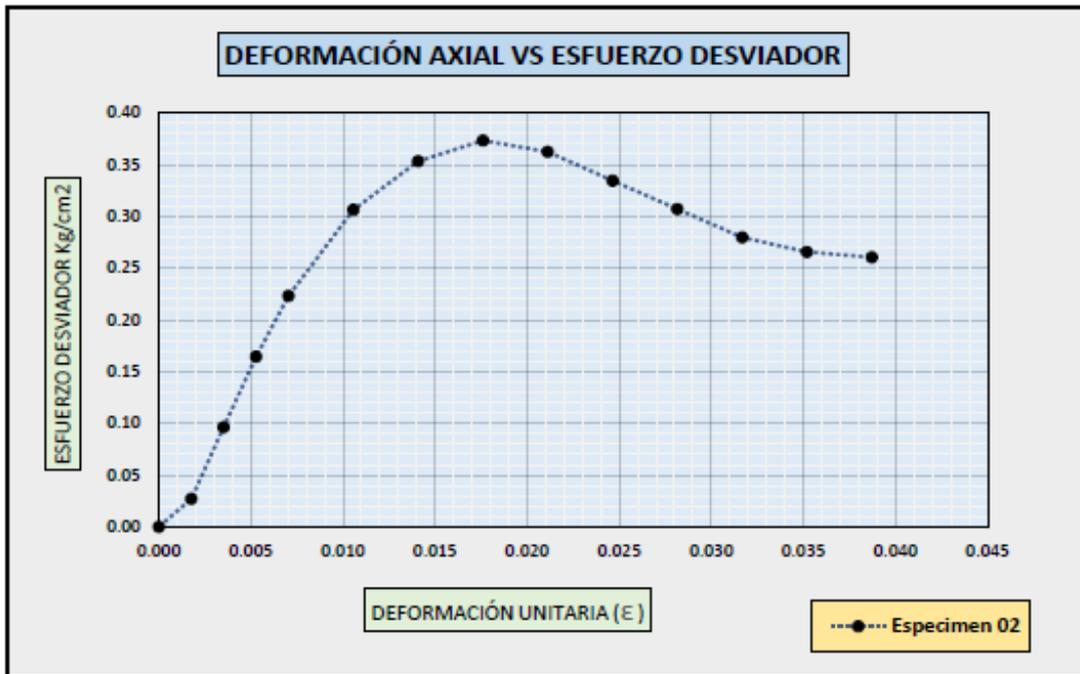
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACION DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400
FECHA:	26 de Mayo del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.0 Lt/m³

Descripción	Especimen 02
Peso (g)	1057.4
Diámetro (cm)	7.17
Área Ao (Cm ²)	40.34
Altura Lo (cm)	14.21
Densidad (g/cm ³)	1.85
Humedad W (%)	20.3%

Deformacion ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0 / (1 - \varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.339	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.410	0.01	1.092	2.65	0.027
0.50	0.004	40.481	0.04	3.895	9.44	0.096
0.75	0.005	40.553	0.07	6.662	16.12	0.164
1.00	0.007	40.625	0.09	9.065	21.89	0.223
1.50	0.011	40.769	0.12	12.487	30.05	0.306
2.00	0.014	40.915	0.14	14.453	34.65	0.353
2.50	0.018	41.061	0.15	15.327	36.62	0.373
3.00	0.021	41.209	0.15	14.926	35.53	0.362
3.50	0.025	41.358	0.14	13.834	32.81	0.335
4.00	0.028	41.508	0.13	12.742	30.11	0.307
4.50	0.032	41.658	0.11	11.650	27.43	0.280
5.00	0.035	41.810	0.11	11.104	26.05	0.266
5.50	0.039	41.964	0.11	10.922	25.53	0.260

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

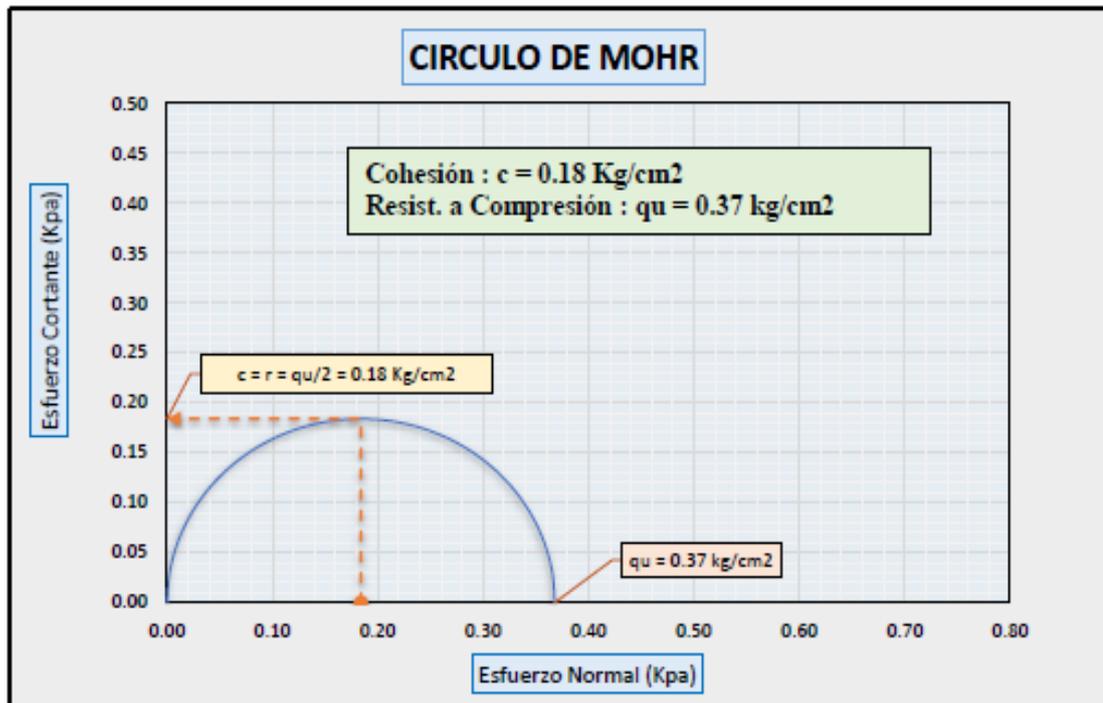
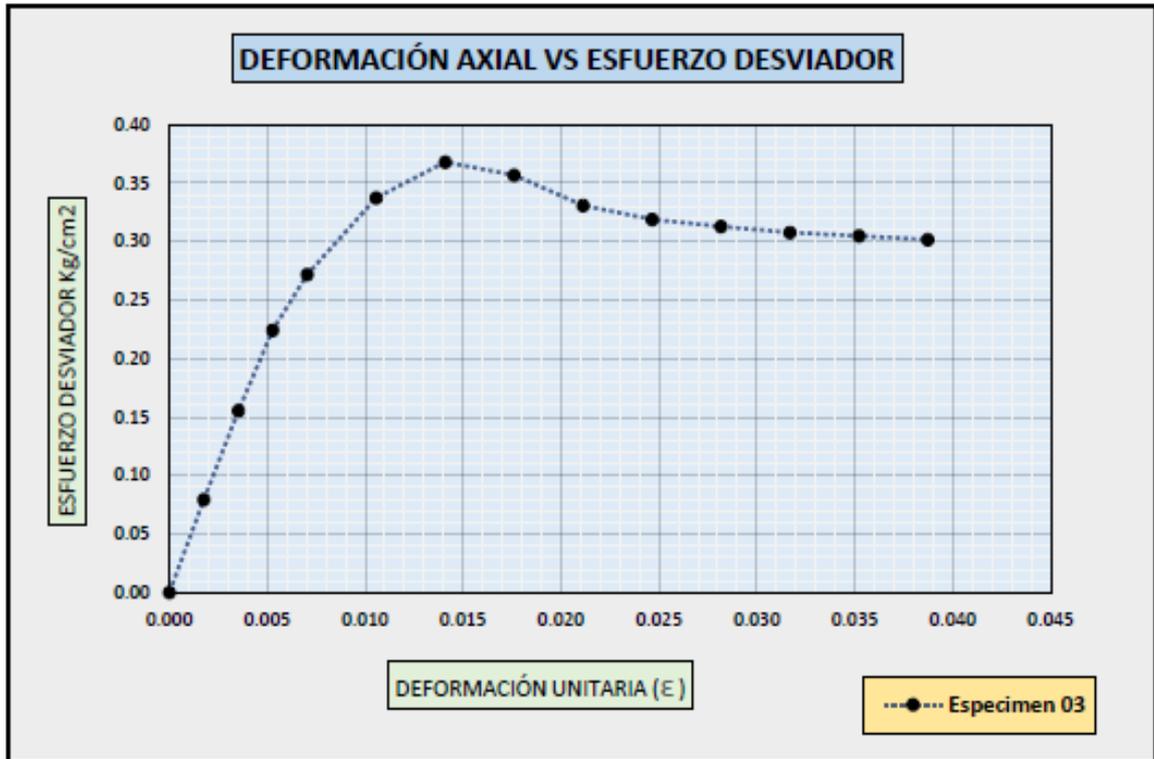
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACION DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400.
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400
FECHA:	26 de Mayo del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.0 Lt/m³

Descripción	Especimen 03
Peso (g)	1042.25
Diámetro (cm)	7.18
Área A _o (Cm ²)	40.53
Altura L _o (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.81
Humedad W (%)	20.1%

Deformacion ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_o$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_o/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.03	3.221	7.78	0.079
0.50	0.004	40.670	0.06	6.320	15.24	0.155
0.75	0.005	40.742	0.09	9.134	21.99	0.224
1.00	0.007	40.814	0.11	11.091	26.66	0.272
1.50	0.011	40.959	0.14	13.823	33.11	0.337
2.00	0.014	41.106	0.15	15.127	36.10	0.368
2.50	0.018	41.253	0.14	14.720	35.00	0.357
3.00	0.021	41.401	0.13	13.700	32.46	0.331
3.50	0.025	41.551	0.13	13.252	31.29	0.319
4.00	0.028	41.701	0.13	13.048	30.69	0.313
4.50	0.032	41.853	0.13	12.885	30.20	0.308
5.00	0.035	42.006	0.13	12.803	29.90	0.305
5.50	0.039	42.160	0.12	12.722	29.60	0.302

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ANEXO 02

ENSAYOS AL SUELO TRATADO CON UNA

DOSIFICACIÓN DE 0.2 Lt/m³

LIMITES DE CONSISTENCIA

REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.				
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".				
LUGAR:	TRAMO PUNO - AREQUIPA KM 11+400				
CALCATA O CANTERA:	KM: 11+400	MUESTRA:	0.2 Lt/m ³	PROFUNDIDAD:	1.5 m
FECHA:	27 de Mayo del 2022				

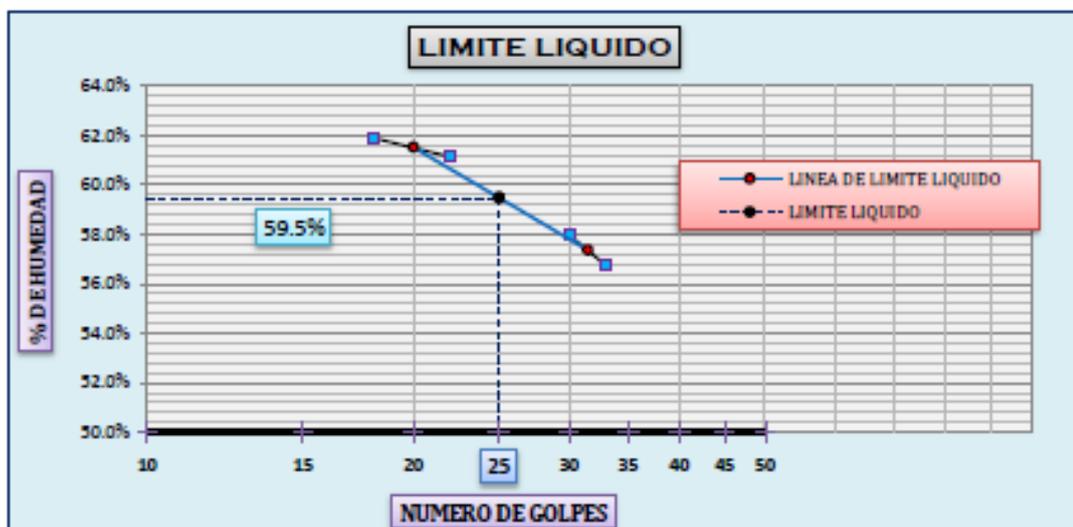
LIMITE LIQUIDO

DESCRIPCION	UND	1	2	3	4
CAPSULA	N°	B-3	P-2	T-W	P-4
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	46.99	45.67	46.54	47.86
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	38.62	37.6	38.51	39.5
AGUA	gr.	8.37	8.07	8.03	8.36
PESO DE LA CAPSULA	gr.	25.1	24.4	24.66	24.77
PESO DEL SUELO SECO	gr.	13.52	13.2	13.85	14.73
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	61.91%	61.14%	57.98%	56.75%
NUMERO DE GOLPES	N°	18	22	30	33

LIMITE PLASTICO

DESCRIPCION	UND	1	2	3
CAPSULA	No	T-2	S-1	A-6
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	28.41	28.82	29.44
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	26.8	27.23	27.61
AGUA	gr.	1.61	1.59	1.83
PESO DE LA CAPSULA	gr.	22.4	22.9	22.68
PESO DEL SUELO SECO	gr.	4.4	4.33	4.93
LIMITE PLASTICO	%	36.59%	36.72%	37.12%

LIMITE LIQUIDO	59.5%
LIMITE PLASTICO	36.8%
INDICE DE PLASTICIDAD	22.7%





ENSAYO DE CBR (VALOR RELATIVO DE SOPORTE)

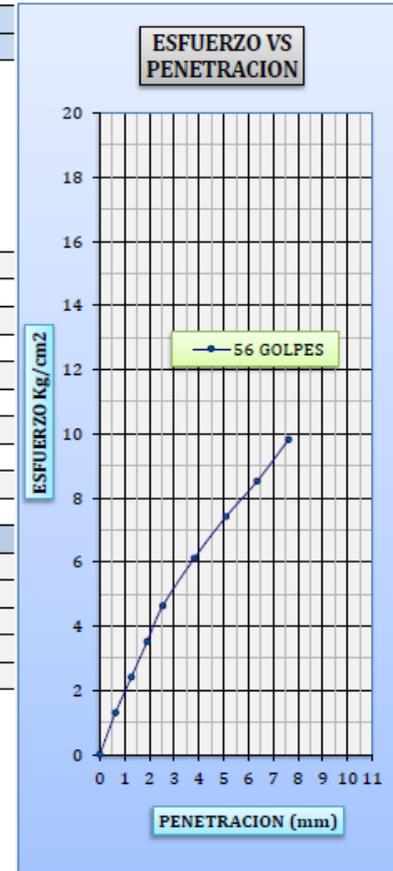
MOLDE No	H-11	N° DE GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5	COND. DE LA MUESTRA	SATURADO

Peso del Suelo Humedo + Molde	gr.	12409
Peso del Molde	gr.	8392
Peso del Suelo Humedo	gr.	4017
Volumen del Suelo	cc.	2113.99
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	1.900

Capsula N°	No	M-09	M-12
Suelo Humedo + Capsula	gr.	167.86	133.55
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	144.86	115.97
Peso del Agua	gr.	23.00	17.58
Peso de la Capsula	gr.	35.43	33.03
Peso del Suelo Seco	gr.	109.43	82.94
% de Humedad	%	21.02%	21.20%
Promedio de Humedad	%	21.11%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.569	

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion (mm)	Expansion (%)
30/05/2022	04:45 p.m.	0 hrs	0.20	0	0.00%
31/05/2022	04:45 p.m.	24 hrs	3.05	2.85	2.45%
01/06/2022	04:45 p.m.	48 hrs	4.66	4.46	3.83%
02/06/2022	04:45 p.m.	72 hrs	5.71	5.51	4.74%
03/06/2022	04:45 p.m.	96 hrs	6.63	6.43	5.53%

Penetracion (mm)	MOLDE No H-11			Carga Est.
	Dial	Kg	Kg/cm2	
0.00	0.00	0.00	0.00	
0.63	0.25	25.7	1.3	
1.27	0.47	47.7	2.4	
1.91	0.68	69.7	3.5	
2.54	0.90	91.7	4.6	70.41
3.81	1.19	121.1	6.1	
5.09	1.44	146.8	7.4	105.10
6.35	1.66	168.8	8.5	
7.62	1.91	194.5	9.8	



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR) 6.6%



ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

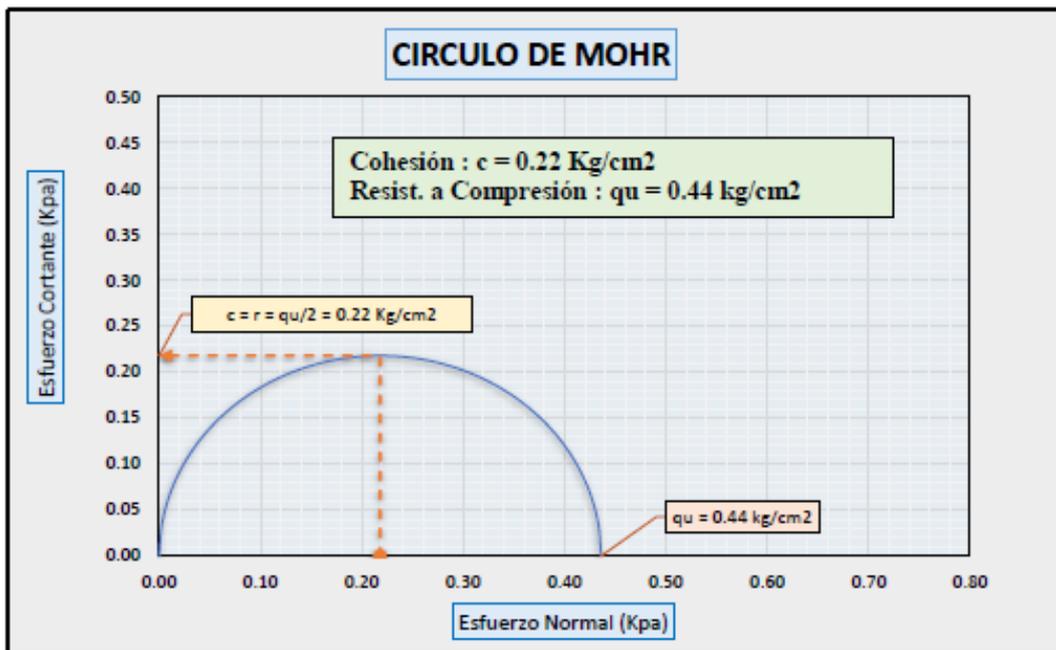
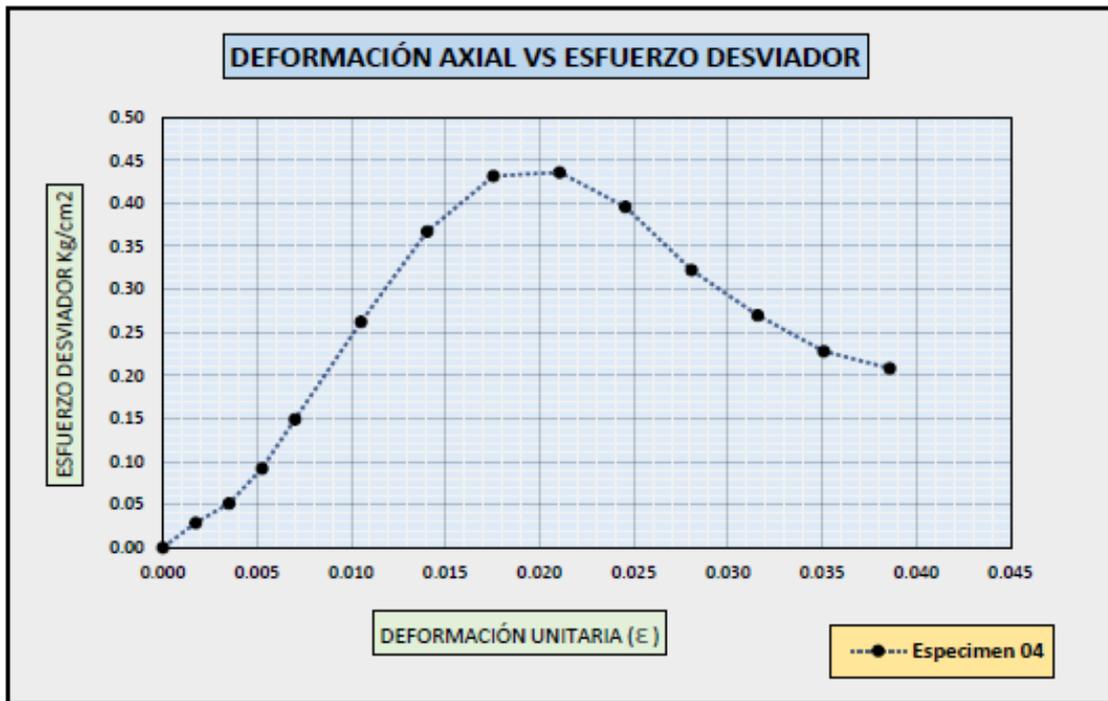
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	31 de Mayo del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.2 Lt/m³

Descripción	Especimen 04
Peso (g)	1043.08
Diámetro (cm)	7.18
Área Ao (Cm ²)	40.53
Altura Lo (cm)	14.25
Densidad (g/cm ³)	1.81
Humedad W (%)	20.5%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (kN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.01	1.167	2.82	0.029
0.50	0.004	40.669	0.02	2.088	5.04	0.051
0.75	0.005	40.741	0.04	3.746	9.02	0.092
1.00	0.007	40.813	0.06	6.079	14.61	0.149
1.50	0.011	40.958	0.11	10.746	25.74	0.262
2.00	0.014	41.104	0.15	15.106	36.05	0.368
2.50	0.018	41.250	0.17	17.808	42.35	0.432
3.00	0.021	41.398	0.18	18.054	42.78	0.436
3.50	0.025	41.547	0.16	16.457	38.86	0.396
4.00	0.028	41.697	0.13	13.448	31.64	0.323
4.50	0.032	41.848	0.11	11.299	26.49	0.270
5.00	0.035	42.000	0.09	9.580	22.37	0.228
5.50	0.039	42.154	0.09	8.781	20.44	0.208

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

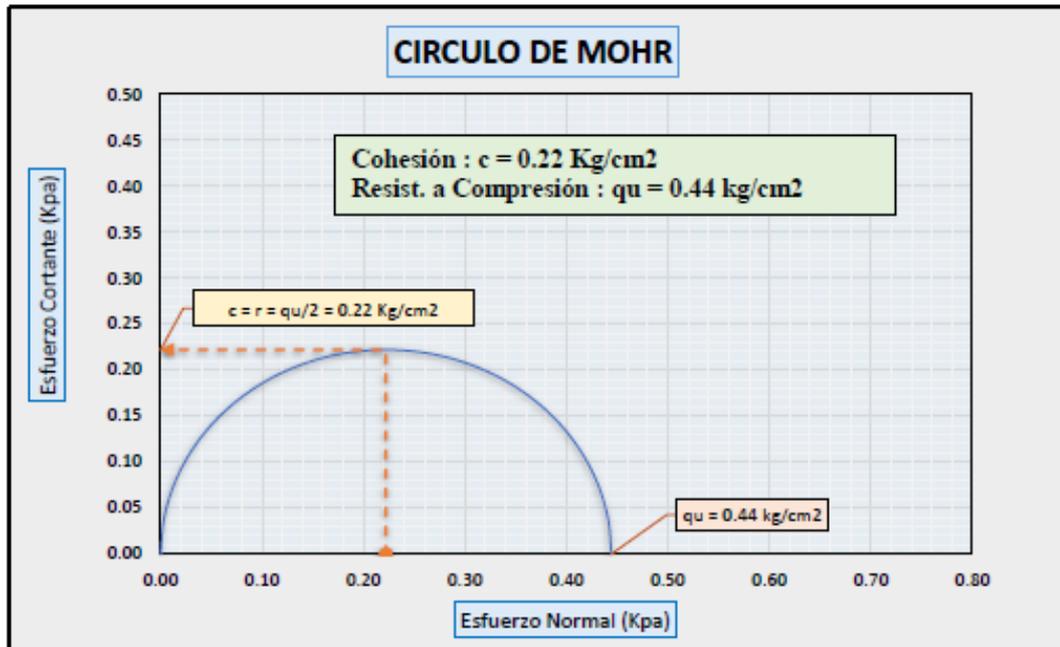
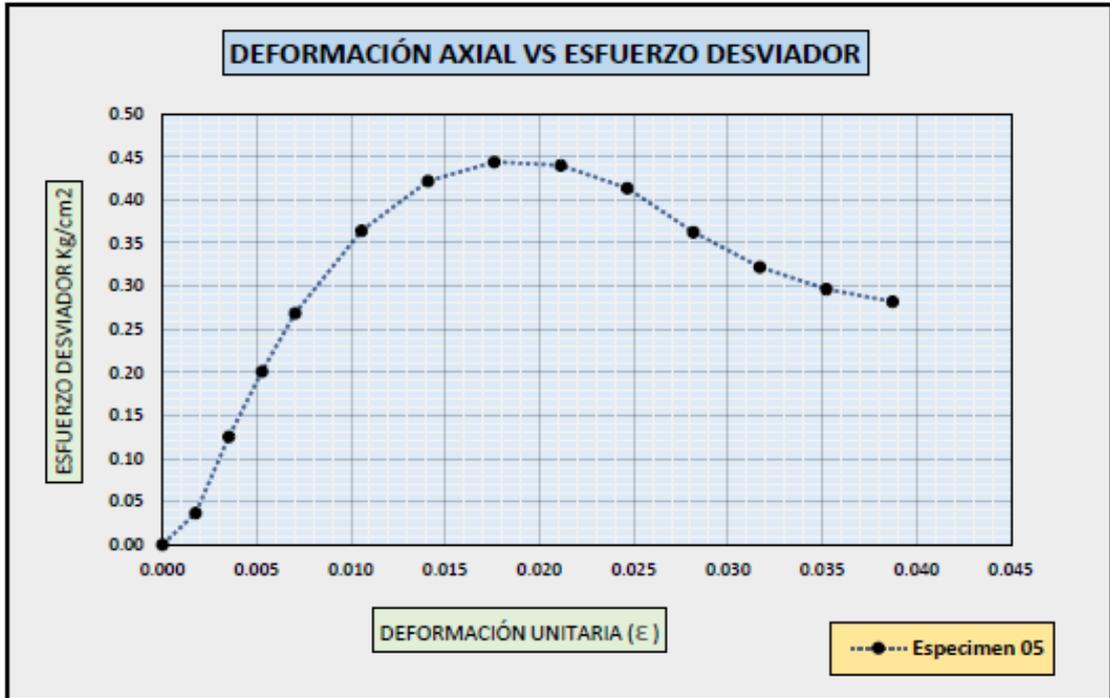
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	31 de Mayo del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.2 Lt/m³

Descripción	Especimen 05
Peso (g)	1043.39
Diámetro (cm)	7.18
Area Ao (Cm ²)	40.53
Altura Lo (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.81
Humeada W (%)	20.9%

Deformacion ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.01	1.493	3.61	0.037
0.50	0.004	40.670	0.05	5.097	12.29	0.125
0.75	0.005	40.742	0.08	8.186	19.71	0.201
1.00	0.007	40.814	0.11	10.966	26.36	0.269
1.50	0.011	40.959	0.15	14.930	35.76	0.365
2.00	0.014	41.106	0.17	17.350	41.41	0.422
2.50	0.018	41.253	0.18	18.328	43.58	0.444
3.00	0.021	41.401	0.18	18.225	43.18	0.440
3.50	0.025	41.551	0.17	17.195	40.60	0.414
4.00	0.028	41.701	0.15	15.136	35.61	0.363
4.50	0.032	41.853	0.13	13.489	31.62	0.322
5.00	0.035	42.006	0.12	12.459	29.10	0.297
5.50	0.039	42.160	0.12	11.893	27.67	0.282

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

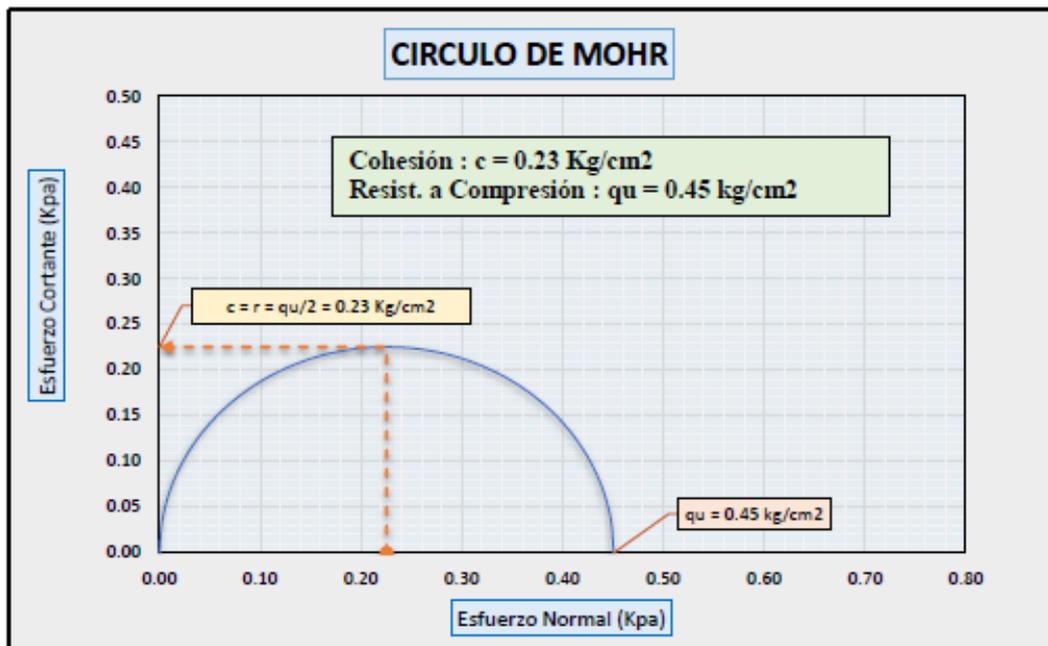
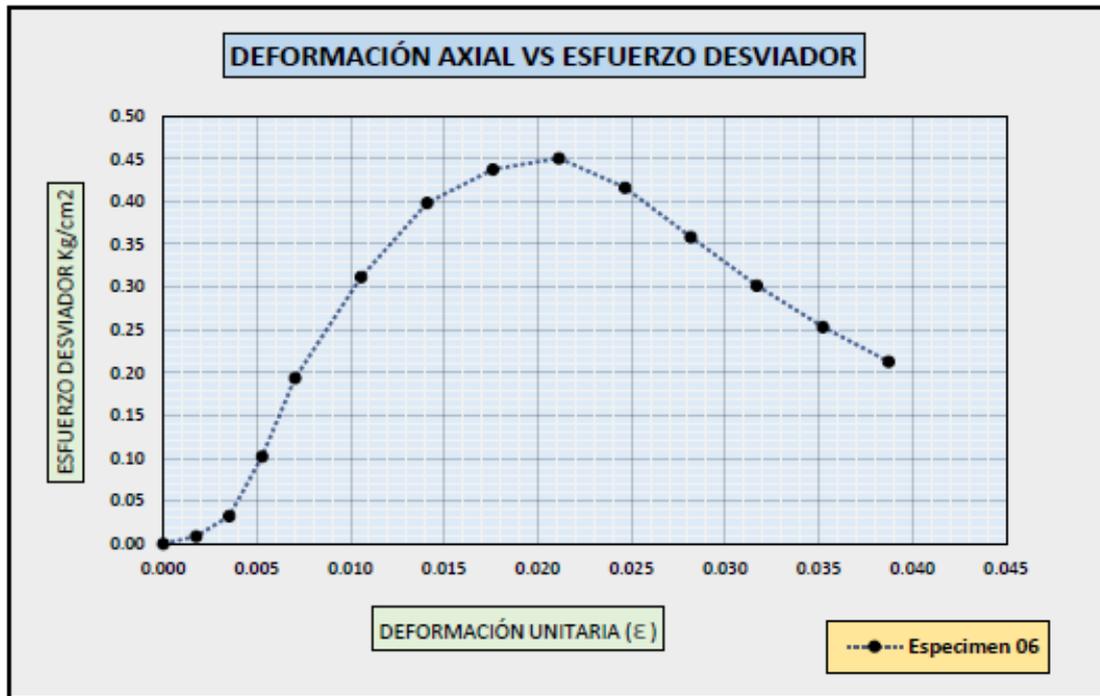
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALCATA O CANTERA:	KM: 11+400
FECHA:	31 de Mayo del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.2 Lt/m³

Descripción	Especimen 06
Peso (g)	1041.59
Diámetro (cm)	7.18
Área A _o (Cm ²)	40.53
Altura L _o (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.81
Humedad W (%)	20.7%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_o$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_o/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.00	0.355	0.86	0.009
0.50	0.004	40.670	0.01	1.319	3.18	0.032
0.75	0.005	40.742	0.04	4.159	10.01	0.102
1.00	0.007	40.814	0.08	7.912	19.02	0.194
1.50	0.011	40.959	0.13	12.780	30.61	0.312
2.00	0.014	41.106	0.16	16.381	39.09	0.399
2.50	0.018	41.253	0.18	18.054	42.93	0.438
3.00	0.021	41.401	0.18	18.663	44.22	0.451
3.50	0.025	41.551	0.17	17.294	40.83	0.416
4.00	0.028	41.701	0.15	14.961	35.19	0.359
4.50	0.032	41.853	0.12	12.628	29.60	0.302
5.00	0.035	42.006	0.10	10.650	24.87	0.254
5.50	0.039	42.160	0.09	8.977	20.89	0.213

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ANEXO 03

ENSAYOS AL SUELO TRATADO CON UNA

DOSIFICACIÓN DE 0.8 Lt/m³



LIMITES DE CONSISTENCIA

REALIZADO POR:	BACH: Fabiola Nadia Ramos Quispe.				
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".				
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400				
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400	NUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD:	1.5 m
FECHA:	20 de Mayo.				

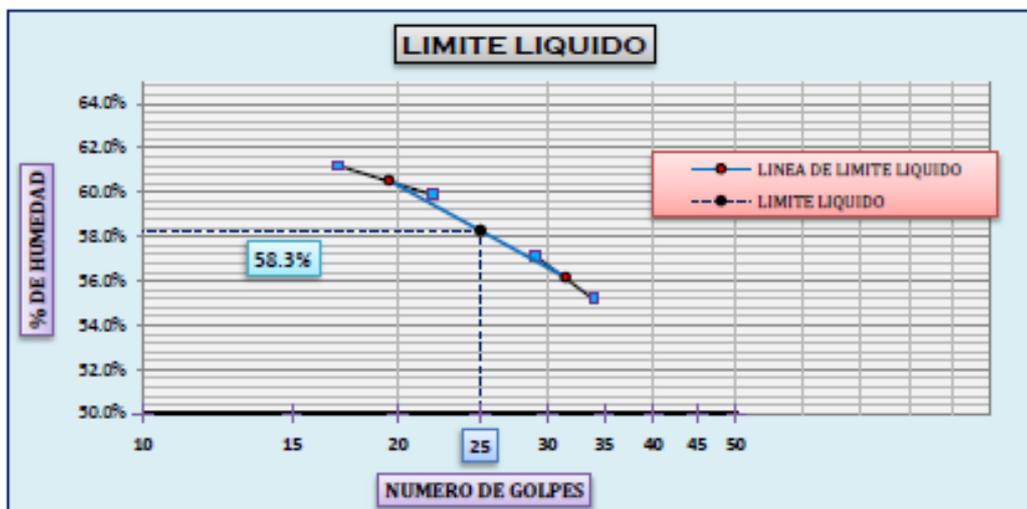
LIMITE LIQUIDO

DESCRIPCION	UND	1	2	3	4
CAPSULA	N°	B-3	P-2	T-W	P-4
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	57.67	58.23	60.18	56.64
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	49.23	50.11	51.82	48.65
AGUA	gr.	8.44	8.12	8.36	7.99
PESO DE LA CAPSULA	gr.	35.44	36.55	37.19	34.17
PESO DEL SUELO SECO	gr.	13.79	13.56	14.63	14.48
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	61.20%	59.88%	57.14%	55.18%
NUMERO DE GOLPES	N°	17	22	29	34

LIMITE PLASTICO

DESCRIPCION	UND	1	2	3
CAPSULA	No	T-2	S-1	A-6
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	28.45	31.11	26.74
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	26.55	29.29	24.79
AGUA	gr.	1.9	1.82	1.95
PESO DE LA CAPSULA	gr.	21.48	24.47	19.54
PESO DEL SUELO SECO	gr.	5.07	4.82	5.25
LIMITE PLASTICO	%	37.48%	37.76%	37.14%

LIMITE LIQUIDO	58.3%
LIMITE PLASTICO	37.5%
INDICE DE PLASTICIDAD	20.8%



ENSAYO DE CBR (VALOR RELATIVO DE SOPORTE)

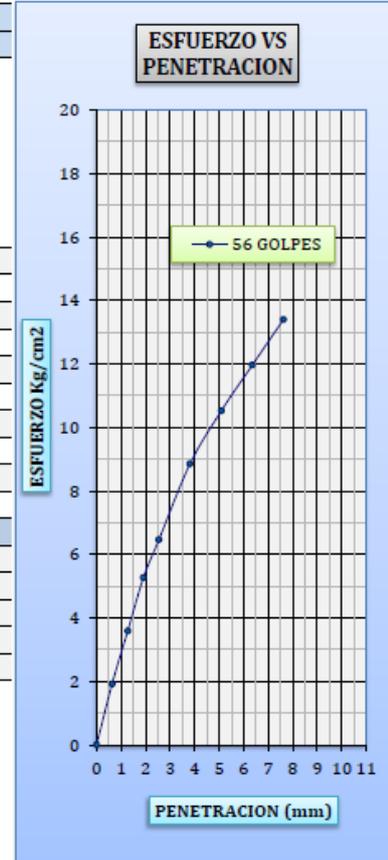
MOLDE No	H-11	Nº DE GOLPES POR CAPA	56
Nº DE CAPAS	5	COND. DE LA MUESTRA	SATURADO

Peso del Suelo Humedo + Molde	gr.	12200
Peso del Molde	gr.	8162
Peso del Suelo Humedo	gr.	4038
Volumen del Suelo	cc.	2126.09
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	1.899

Capsula N°	No	M-2	T-32
Suelo Humedo + Capsula	gr.	159.42	156.42
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	138.04	135.78
Peso del Agua	gr.	21.38	20.64
Peso de la Capsula	gr.	34.17	35.39
Peso del Suelo Seco	gr.	103.87	100.39
% de Humedad	%	20.58%	20.56%
Promedio de Humedad	%	20.57%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.575	

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion (mm)	Expansion (%)
30/05/2022	05:10 p.m.	0 hrs	0.20	0	0.00%
31/05/2022	05:10 p.m.	24 hrs	1.12	0.92	0.79%
01/06/2022	05:10 p.m.	48 hrs	2.58	2.38	2.05%
02/06/2022	05:10 p.m.	72 hrs	3.75	3.55	3.05%
03/06/2022	05:10 p.m.	96 hrs	4.59	4.39	3.77%

Penetracion (mm)	MOLDE No H-11			Carga Est.
	Dial	Kg	Kg/cm2	
0.00	0.00	0.00	0.00	
0.63	0.37	37.9	1.9	
1.27	0.70	71.1	3.6	
1.91	1.02	104.3	5.3	
2.54	1.26	128.0	6.5	70.41
3.81	1.72	175.4	8.8	
5.09	2.05	208.6	10.5	105.10
6.35	2.33	237.0	12.0	
7.62	2.60	265.4	13.4	



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR) 9.2%



ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

REALIZADO POR: BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.

PROYECTO DE TESIS: "NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".

LUGAR: TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400

CALICATA O CANTERA: KM: 11+400

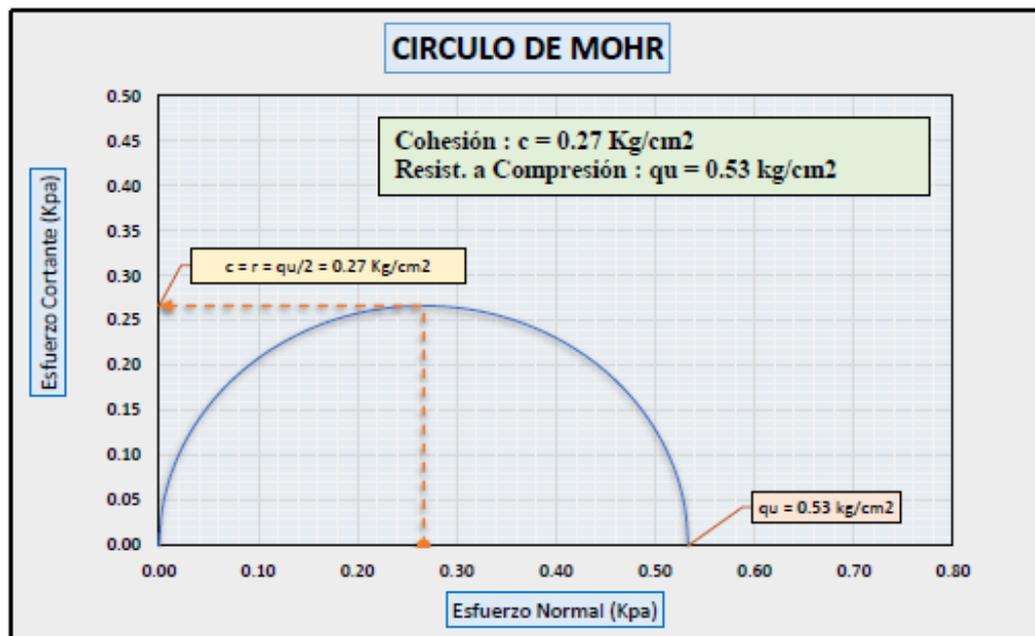
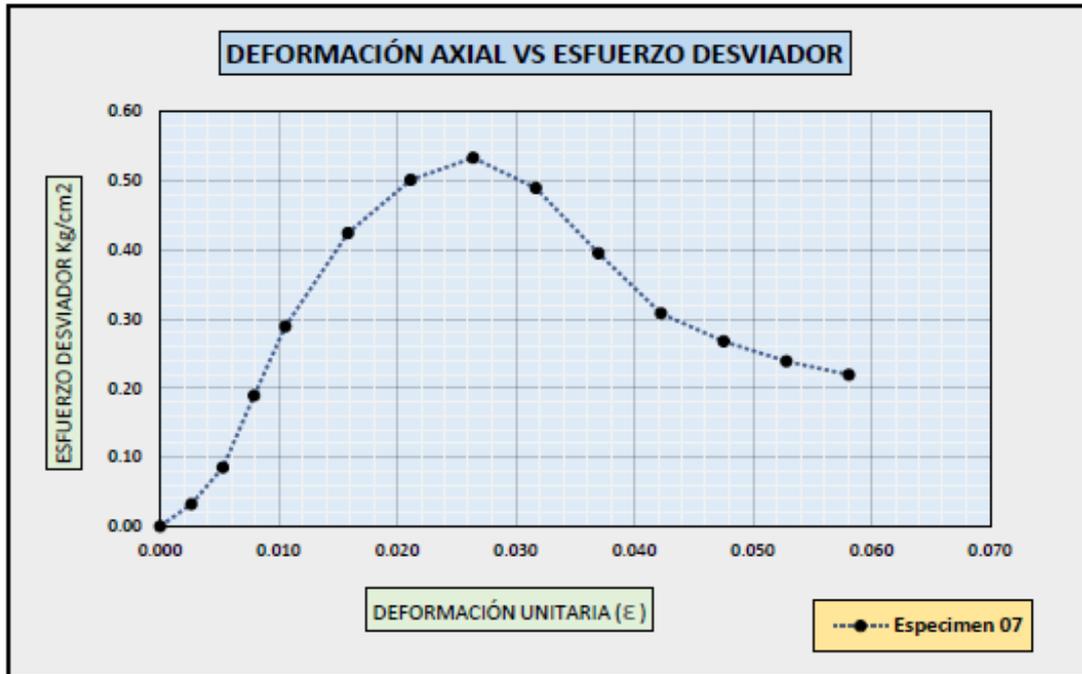
FECHA: 3 de Junio del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.8 Lt/m³

Descripción	Especimen 07
Peso (g)	1036.11
Diámetro (cm)	7.20
Area Ao (Cm ²)	40.72
Altura Lo (cm)	9.47
Densidad (g/cm ³)	2.69
Humeda W (%)	21.4%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.715	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.003	40.823	0.01	1.315	3.16	0.032
0.50	0.005	40.931	0.03	3.486	8.35	0.085
0.75	0.008	41.040	0.08	7.760	18.55	0.189
1.00	0.011	41.150	0.12	11.904	28.38	0.289
1.50	0.016	41.371	0.17	17.559	41.64	0.424
2.00	0.021	41.594	0.20	20.848	49.17	0.501
2.50	0.026	41.819	0.22	22.295	52.30	0.533
3.00	0.032	42.048	0.20	20.585	48.03	0.490
3.50	0.037	42.278	0.16	16.704	38.76	0.395
4.00	0.042	42.511	0.13	13.087	30.20	0.308
4.50	0.048	42.747	0.11	11.443	26.26	0.268
5.00	0.053	42.985	0.10	10.259	23.41	0.239
5.50	0.058	43.226	0.09	9.470	21.49	0.219

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

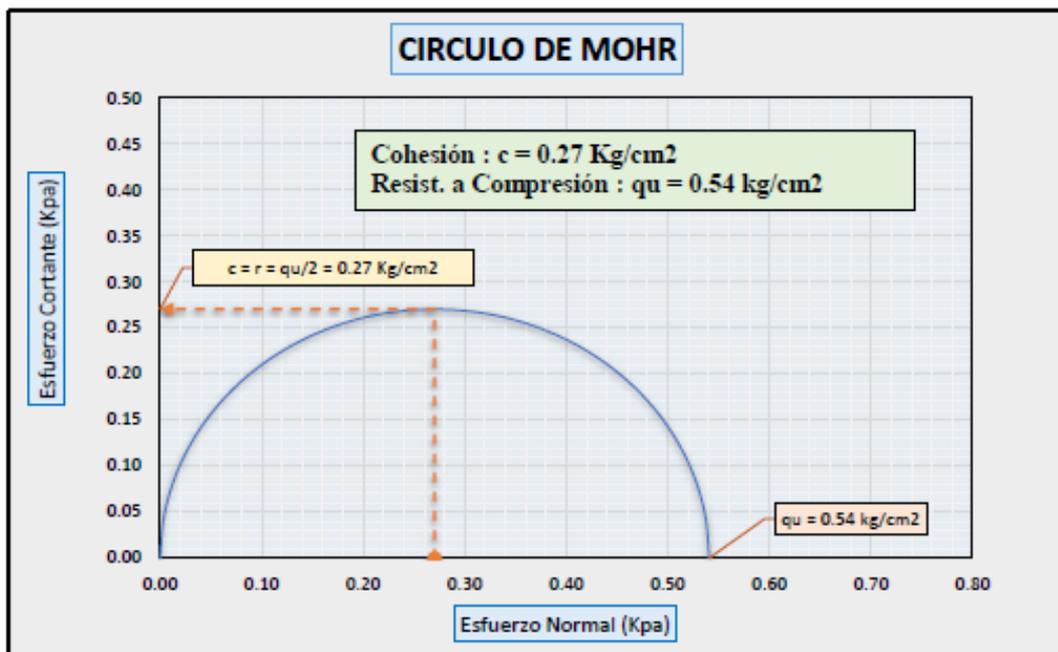
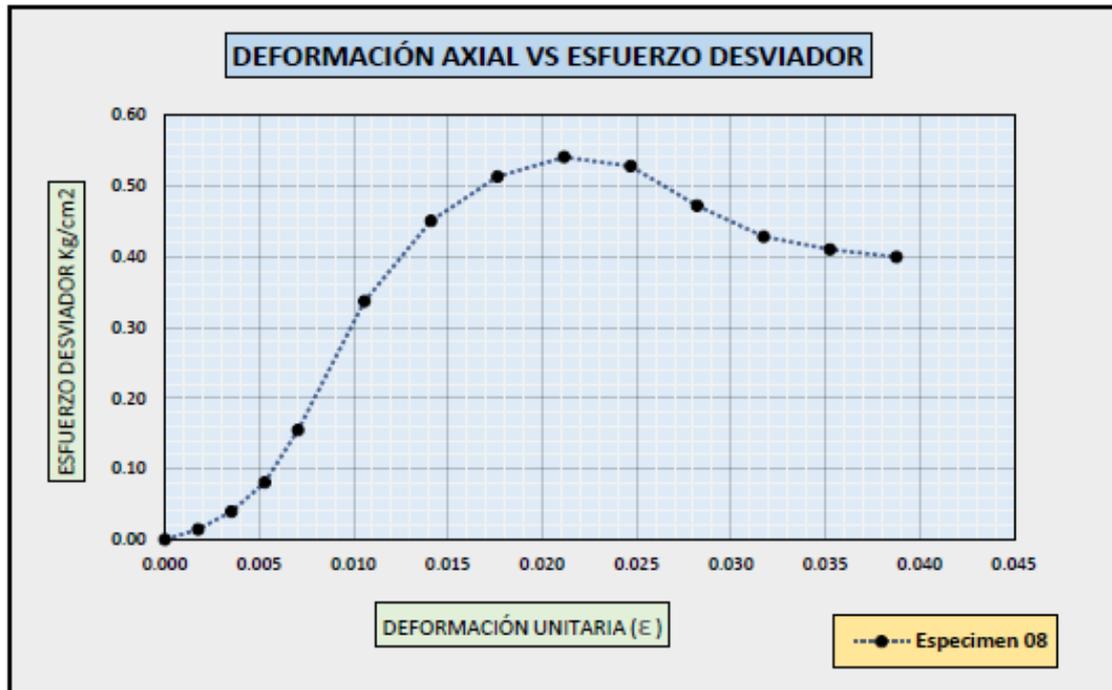
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400.
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	3 de Junio del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.8 Lt/m³

Descripción	Especimen 08
Peso (g)	1036.07
Diámetro (cm)	7.18
Área Ao (Cm ²)	40.53
Altura Lo (cm)	14.18
Densidad (g/cm ³)	1.80
Humedad W (%)	21.6%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\epsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.01	0.581	1.40	0.014
0.50	0.004	40.670	0.02	1.613	3.89	0.040
0.75	0.005	40.742	0.03	3.290	7.92	0.081
1.00	0.007	40.815	0.06	6.323	15.20	0.155
1.50	0.011	40.960	0.14	13.807	33.07	0.337
2.00	0.014	41.106	0.18	18.516	44.19	0.450
2.50	0.018	41.254	0.21	21.162	50.32	0.513
3.00	0.021	41.402	0.22	22.387	53.05	0.541
3.50	0.025	41.552	0.22	21.936	51.79	0.528
4.00	0.028	41.703	0.19	19.678	46.29	0.472
4.50	0.032	41.855	0.18	17.936	42.04	0.429
5.00	0.035	42.008	0.17	17.226	40.23	0.410
5.50	0.039	42.162	0.17	16.839	39.18	0.399

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

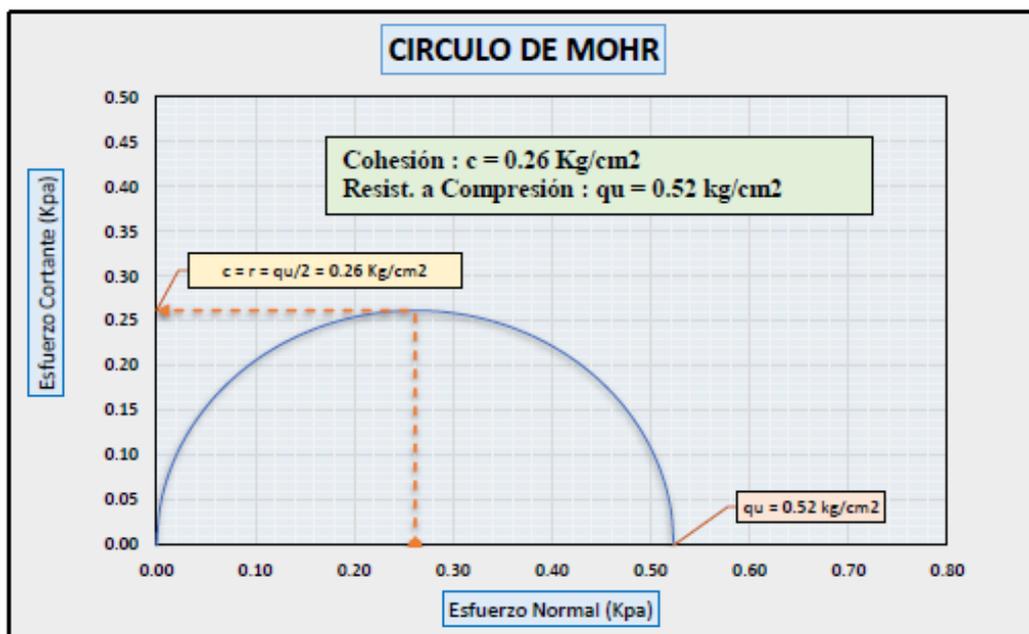
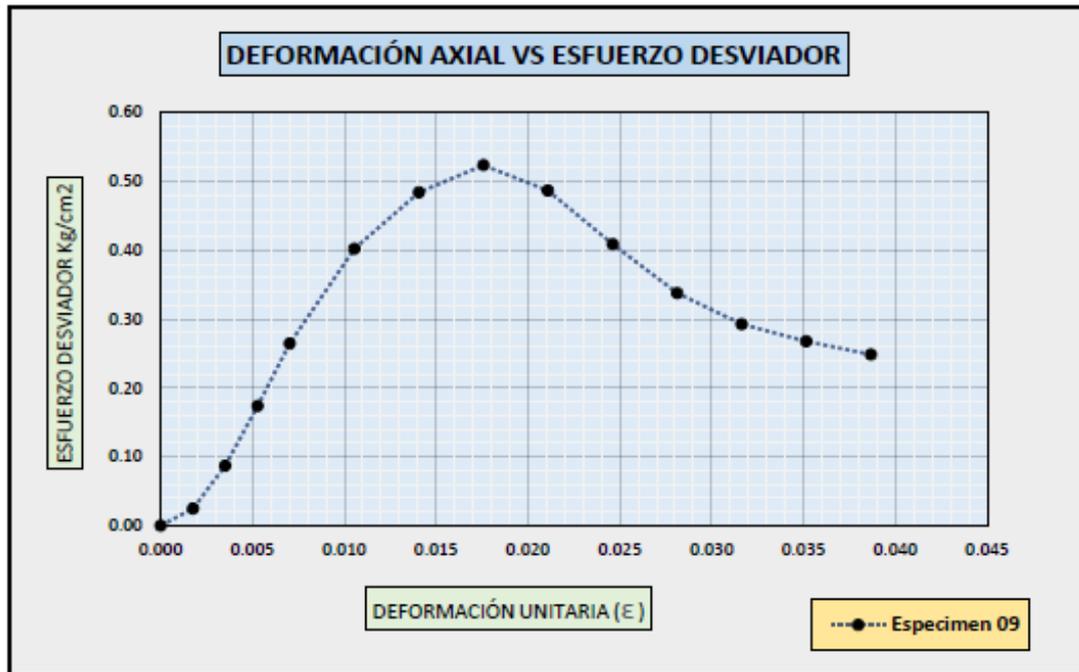
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	3 de Junio del 2022

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 0.8 Lt/m³

Descripción	Especimen 09
Peso (g)	1040.96
Diámetro (cm)	7.22
Área Ao (Cm ²)	40.90
Altura Lo (cm)	14.22
Densidad (g/cm ³)	1.79
Humedad W (%)	21.5%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.904	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.976	0.01	1.019	2.44	0.025
0.50	0.004	41.048	0.04	3.568	8.53	0.087
0.75	0.005	41.121	0.07	7.136	17.02	0.174
1.00	0.007	41.193	0.11	10.894	25.94	0.264
1.50	0.011	41.340	0.16	16.628	39.46	0.402
2.00	0.014	41.487	0.20	20.069	47.45	0.484
2.50	0.018	41.636	0.21	21.789	51.34	0.523
3.00	0.021	41.785	0.20	20.324	47.71	0.486
3.50	0.025	41.936	0.17	17.138	40.09	0.409
4.00	0.028	42.087	0.14	14.207	33.12	0.338
4.50	0.032	42.240	0.12	12.360	28.70	0.293
5.00	0.035	42.394	0.11	11.340	26.24	0.268
5.50	0.039	42.549	0.10	10.576	24.38	0.249

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ANEXO 04

ENSAYOS AL SUELO TRATADO CON UNA

DOSIFICACIÓN DE 1.4 Lt/m³



LIMITES DE CONSISTENCIA

REALIZADO POR:	BACH: Fabiola Nadia Ramos Quispe.				
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".				
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400				
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400	MUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD:	1.5 m
FECHA:	06 de Junio del 2022				

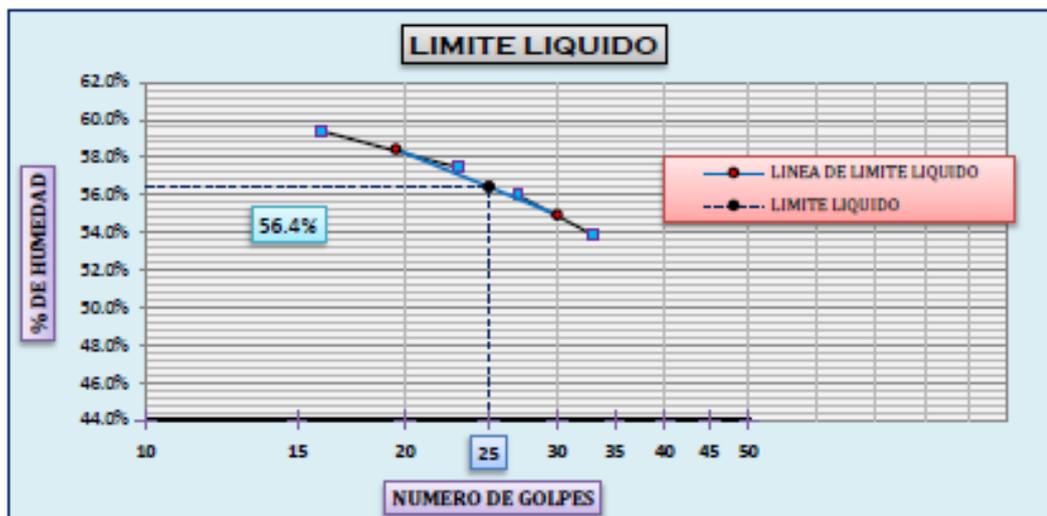
LIMITE LIQUIDO

DESCRIPCION	UND	1	2	3	4
CAPSULA	N°	B-3	P-2	T-W	P-4
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	51.02	48.29	49.09	46.33
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	41.36	39.57	40.32	38.78
AGUA	gr.	9.66	8.72	8.77	7.55
PESO DE LA CAPSULA	gr.	25.1	24.4	24.66	24.77
PESO DEL SUELO SECO	gr.	16.26	15.17	15.66	14.01
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	59.41%	57.48%	56.00%	53.89%
NUMERO DE GOLPES	N°	16	23	27	33

LIMITE PLASTICO

DESCRIPCION	UND	1	2	3
CAPSULA	No	T-2	S-1	A-6
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	30.84	30.15	28.91
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	28.36	28.12	27.18
AGUA	gr.	2.48	2.03	1.73
PESO DE LA CAPSULA	gr.	21.92	22.9	22.68
PESO DEL SUELO SECO	gr.	6.44	5.22	4.5
LIMITE PLASTICO	%	38.51%	38.89%	38.44%

LIMITE LIQUIDO	56.4%
LIMITE PLASTICO	38.6%
INDICE DE PLASTICIDAD	17.8%



ENSAYO DE CBR (VALOR RELATIVO DE SOPORTE)

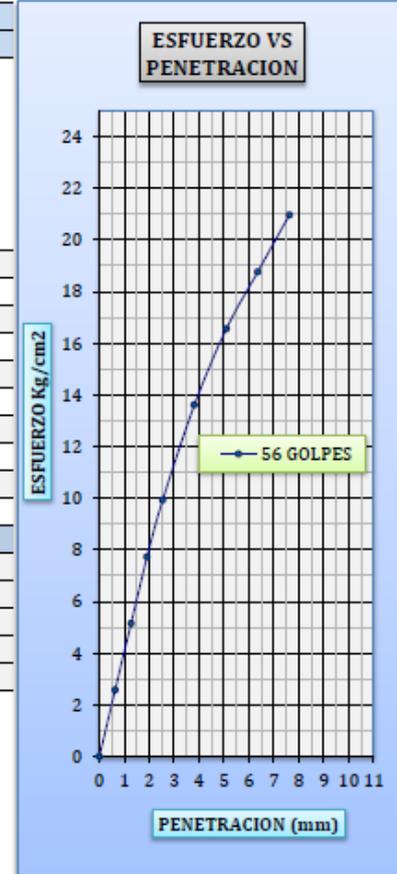
MOLDE No	H-11	Nº DE GOLPES POR CAPA	56
Nº DE CAPAS	5	COND. DE LA MUESTRA	SATURADO

Peso del Suelo Humedo + Molde	gr.	12190
Peso del Molde	gr.	8180
Peso del Suelo Humedo	gr.	4010
Volumen del Suelo	cc.	2106.73
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	1.903

Capsula Nº	No	M-04	M-3
Suelo Humedo + Capsula	gr.	165.46	137.61
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	144.09	120.98
Peso del Agua	gr.	21.37	16.63
Peso de la Capsula	gr.	37.19	40.13
Peso del Suelo Seco	gr.	106.90	80.85
% de Humedad	%	19.99%	20.57%
Promedio de Humedad	%	20.28%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.582	

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion (mm)	Expansion (%)
03/05/2022	05:20 p.m.	0 hrs	0.20	0	0.00%
04/05/2022	05:20 p.m.	24 hrs	0.42	0.22	0.19%
05/05/2022	05:20 p.m.	48 hrs	0.77	0.57	0.49%
06/05/2022	05:20 p.m.	72 hrs	2.58	2.38	2.05%
07/05/2022	05:20 p.m.	96 hrs	3.56	3.36	2.89%

Penetracion (mm)	MOLDE No H-11			Carga Est.
	Dial	Kg	Kg/cm2	
0.00	0.00	0.00	0.00	
0.63	0.50	51.0	2.6	
1.27	1.00	102.0	5.1	
1.91	1.50	153.1	7.7	
2.54	1.93	196.8	9.9	70.41
3.81	2.65	269.7	13.6	
5.09	3.22	328.0	16.5	105.10
6.35	3.65	371.7	18.8	
7.62	4.08	415.4	21.0	



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR) 14.1%



ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

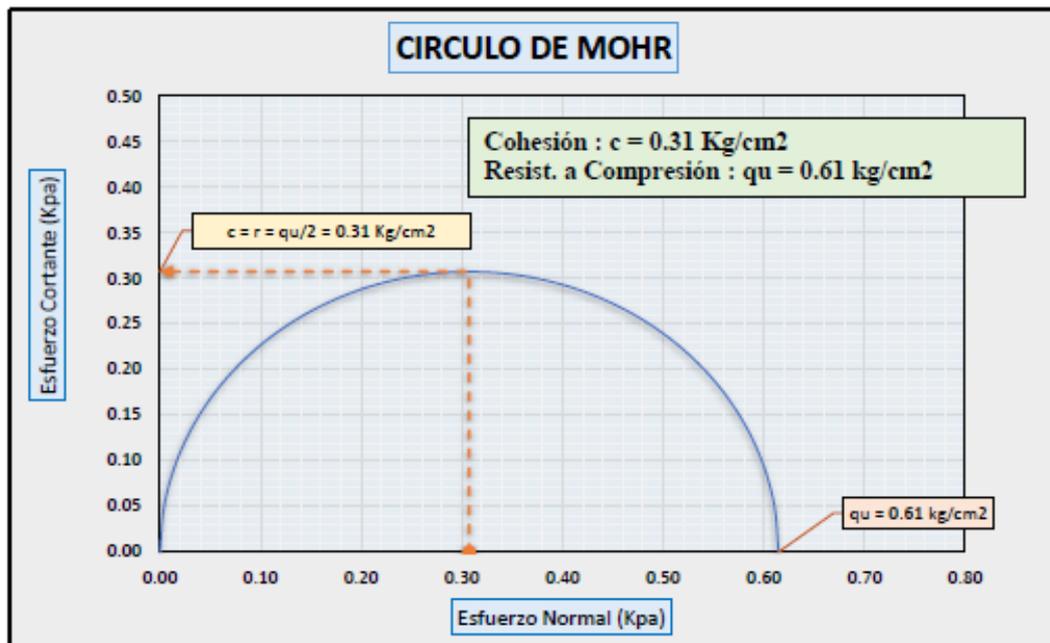
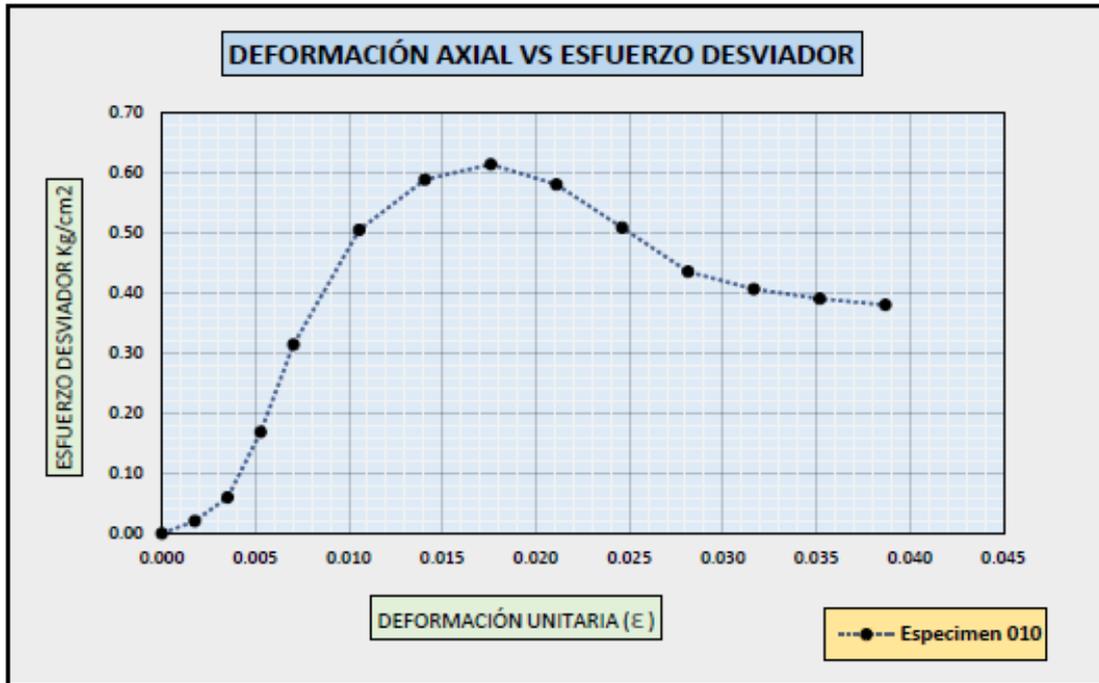
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALCATA O CANTERA:	KM: 11+400
FECHA:	08 de Junio del 2022.

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 1.4 Lt/m³

Descripción	Especimen 010
Peso (g)	1049.82
Diámetro (cm)	7.22
Área Ao (Cm ²)	40.98
Altura Lo (cm)	14.22
Densidad (g/cm ³)	1.80
Humedad W (%)	21.4%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.979	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	41.052	0.01	0.849	2.03	0.021
0.50	0.004	41.124	0.02	2.471	5.89	0.060
0.75	0.005	41.197	0.07	6.950	16.55	0.169
1.00	0.007	41.270	0.13	12.974	30.84	0.314
1.50	0.011	41.416	0.21	20.928	49.57	0.505
2.00	0.014	41.564	0.24	24.480	57.78	0.589
2.50	0.018	41.713	0.25	25.639	60.30	0.615
3.00	0.021	41.863	0.24	24.326	57.00	0.581
3.50	0.025	42.014	0.21	21.391	49.95	0.509
4.00	0.028	42.166	0.18	18.380	42.76	0.436
4.50	0.032	42.319	0.17	17.221	39.92	0.407
5.00	0.035	42.473	0.16	16.603	38.35	0.391
5.50	0.039	42.629	0.16	16.217	37.32	0.380

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

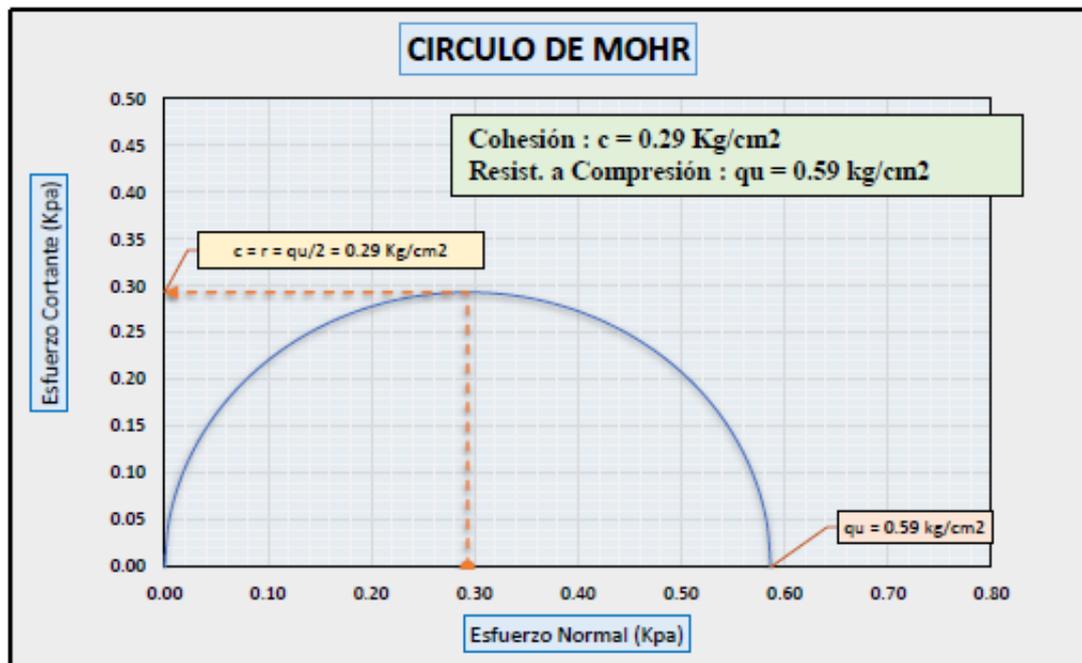
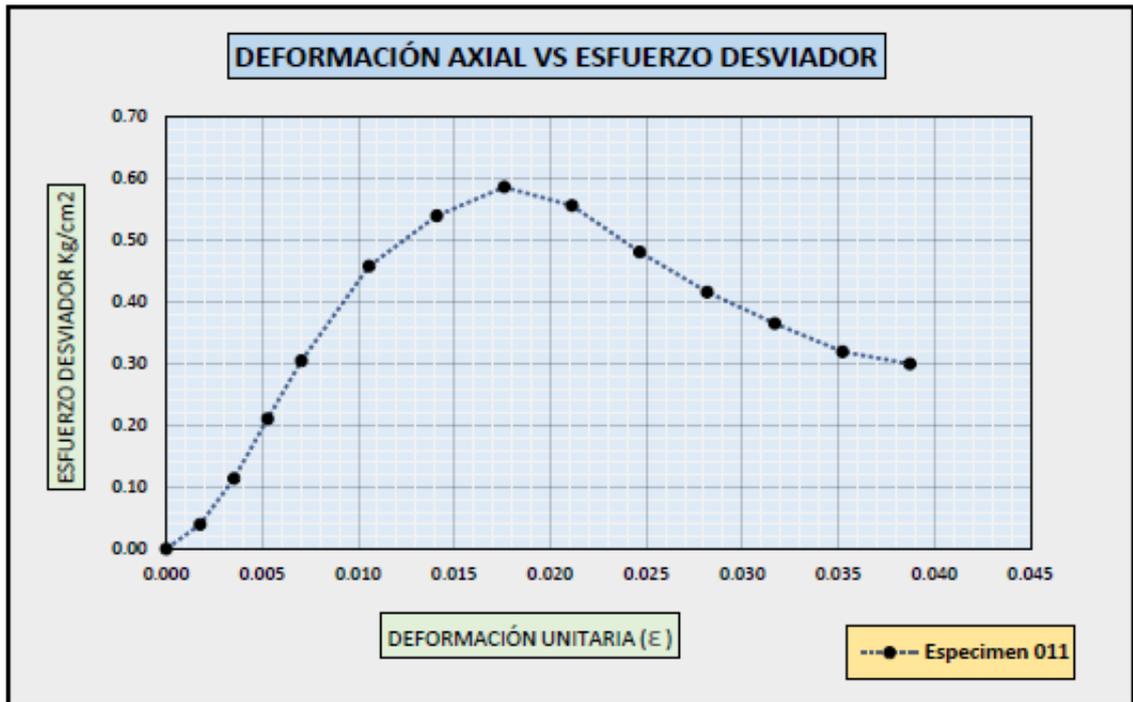
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400
FECHA:	08 de Junio del 2022.

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 1.4 Lt/m³

Descripción	Especimen 011
Peso (g)	1052.92
Diámetro (cm)	7.18
Área A _o (Cm ²)	40.53
Altura L _o (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.83
Humedad W (%)	21.2%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_o$	Área Corr. (cm ²) $A' = A_o/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (kN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.02	1.613	3.90	0.040
0.50	0.004	40.670	0.05	4.645	11.20	0.114
0.75	0.005	40.742	0.08	8.581	20.66	0.211
1.00	0.007	40.814	0.12	12.452	29.93	0.305
1.50	0.011	40.959	0.18	18.774	44.97	0.458
2.00	0.014	41.106	0.22	22.194	52.97	0.540
2.50	0.018	41.253	0.24	24.194	57.53	0.586
3.00	0.021	41.401	0.23	23.033	54.58	0.556
3.50	0.025	41.551	0.20	20.000	47.22	0.481
4.00	0.028	41.701	0.17	17.355	40.83	0.416
4.50	0.032	41.853	0.15	15.291	35.84	0.365
5.00	0.035	42.006	0.13	13.420	31.34	0.319
5.50	0.039	42.160	0.12	12.645	29.42	0.300

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

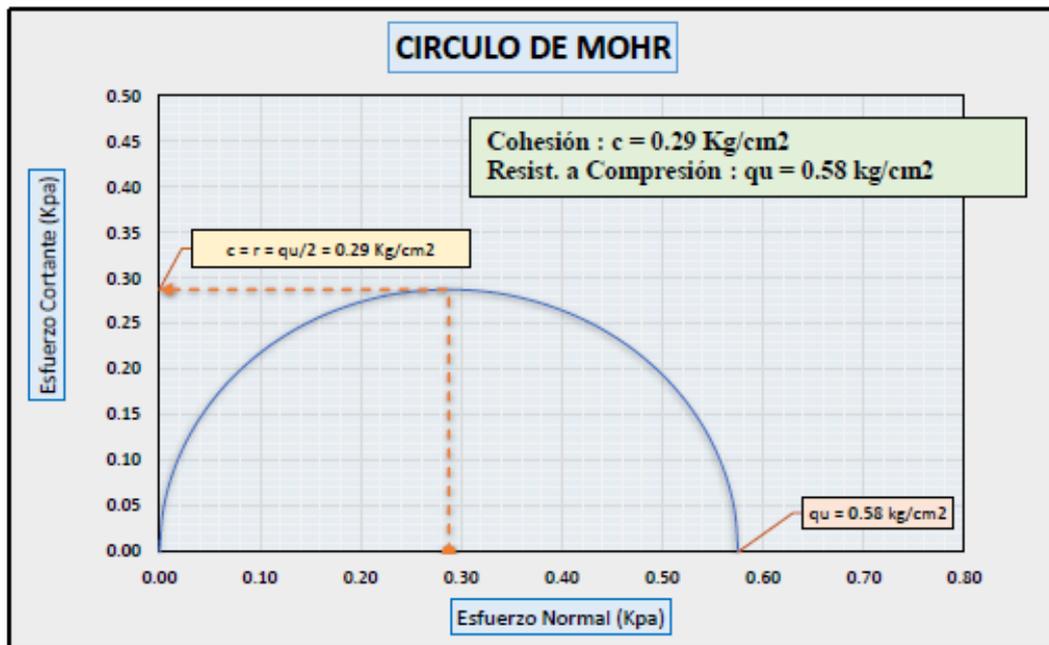
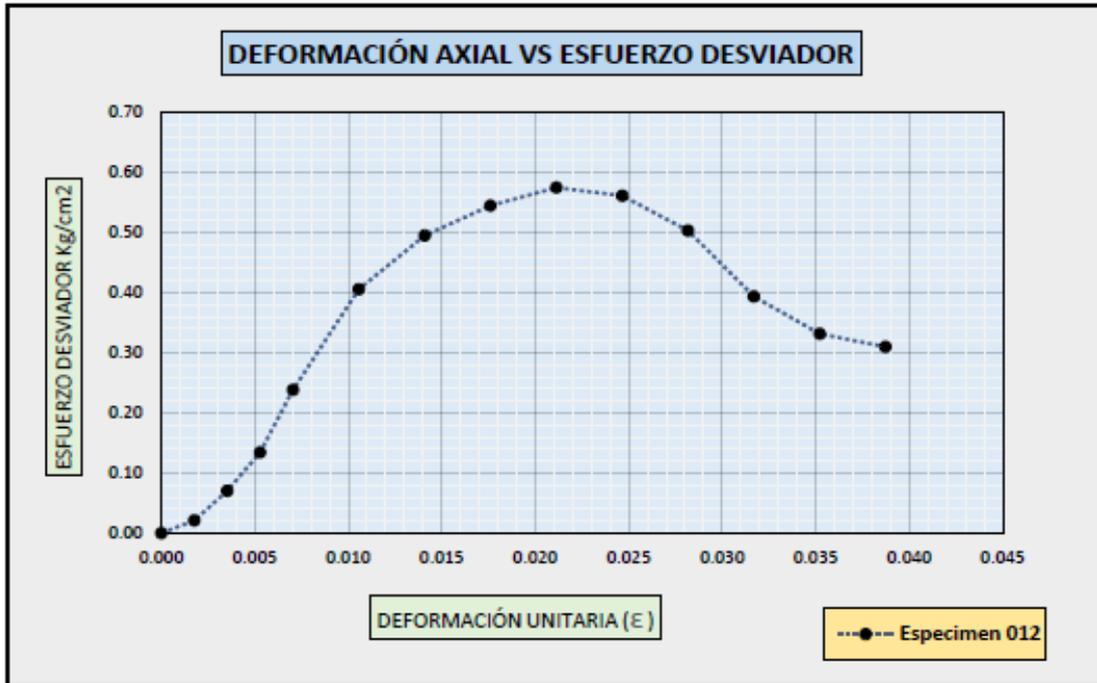
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	08 de Junio del 2022.

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 1.4 Lt/m³

Descripción	Especimen 012
Peso (g)	1042.49
Diámetro (cm)	7.22
Área Ao (Cm ²)	40.90
Altura Lo (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.79
Humedad W (%)	20.9%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.904	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.976	0.01	0.858	2.06	0.021
0.50	0.004	41.048	0.03	2.897	6.92	0.071
0.75	0.005	41.121	0.05	5.526	13.18	0.134
1.00	0.007	41.194	0.10	9.818	23.38	0.238
1.50	0.011	41.340	0.16	16.793	39.85	0.406
2.00	0.014	41.488	0.20	20.548	48.59	0.495
2.50	0.018	41.637	0.22	22.694	53.47	0.545
3.00	0.021	41.787	0.24	24.036	56.43	0.575
3.50	0.025	41.937	0.23	23.553	55.09	0.562
4.00	0.028	42.089	0.21	21.192	49.39	0.504
4.50	0.032	42.242	0.16	16.632	38.62	0.394
5.00	0.035	42.397	0.14	14.057	32.52	0.332
5.50	0.039	42.552	0.13	13.198	30.43	0.310

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ANEXO 5

ENSAYOS AL SUELO TRATADO CON UNA

DOSIFICACIÓN DE 2.0 Lt/m³



LIMITES DE CONSISTENCIA

REALIZADO POR:	BACH: Fabiola Nadia Ramos Quispe.				
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".				
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400				
CALICATA O CANTERA:	KM: 11+400	MUESTRA:	M-1	PROFUNDIDAD:	1.5 m
FECHA:	09 de Junio del 2022.				

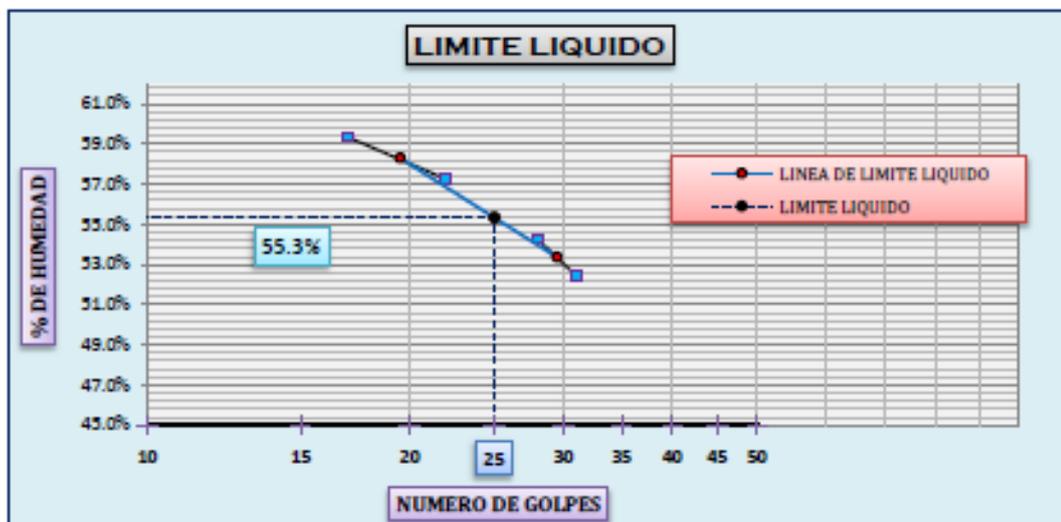
LIMITE LIQUIDO

DESCRIPCION	UND	1	2	3	4
CAPSULA	N°	B-3	P-2	T-W	P-4
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	55.99	56.16	58.85	55.5
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	48.33	49.02	51.23	48.16
AGUA	gr.	7.66	7.14	7.62	7.34
PESO DE LA CAPSULA	gr.	35.42	36.55	37.19	34.17
PESO DEL SUELO SECO	gr.	12.91	12.47	14.04	13.99
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	59.33%	57.26%	54.27%	52.47%
NUMERO DE GOLPES	N°	17	22	28	31

LIMITE PLASTICO

DESCRIPCION	UND	1	2	3
CAPSULA	No	T-2	S-1	A-6
CAPSULA + SUELO HUMEDO	gr.	26.68	30.65	26.22
CAPSULA + SUELO SECO	gr.	25.19	28.88	24.31
AGUA	gr.	1.49	1.77	1.91
PESO DE LA CAPSULA	gr.	21.48	24.48	19.54
PESO DEL SUELO SECO	gr.	3.71	4.4	4.77
LIMITE PLASTICO	%	40.16%	40.23%	40.04%

LIMITE LIQUIDO	55.3%
LIMITE PLASTICO	40.1%
INDICE DE PLASTICIDAD	15.2%



ENSAYO DE CBR (VALOR RELATIVO DE SOPORTE)

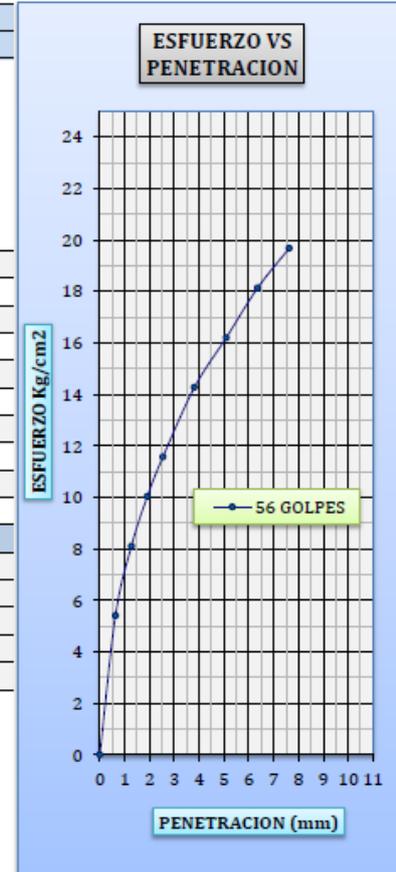
MOLDE No	H-11	N° DE GOLPES POR CAPA	56
N° DE CAPAS	5	COND. DE LA MUESTRA	SATURADO

Peso del Suelo Humedo + Molde	gr.	11136
Peso del Molde	gr.	7053
Peso del Suelo Humedo	gr.	4083
Volumen del Suelo	cc.	2117.74
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc.	1.928

Capsula N°	No	M-05	M-06
Suelo Humedo + Capsula	gr.	148.03	160.95
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	127.54	137.71
Peso del Agua	gr.	20.49	23.24
Peso de la Capsula	gr.	30.88	29.36
Peso del Suelo Seco	gr.	96.66	108.35
% de Humedad	%	21.20%	21.45%
Promedio de Humedad	%	21.32%	
Densidad del Suelo Seco	gr/cc.	1.589	

Fecha	Hora	Tiempo	Dial	Expansion (mm)	Expansion (%)
03/05/2022	05:40 p.m.	0 hrs	0.20	0	0.00%
04/05/2022	05:40 p.m.	24 hrs	0.38	0.18	0.15%
05/05/2022	05:40 p.m.	48 hrs	0.69	0.49	0.42%
06/05/2022	05:40 p.m.	72 hrs	2.34	2.14	1.84%
07/05/2022	05:40 p.m.	96 hrs	3.32	3.12	2.68%

Penetracion (mm)	MOLDE No H-11			Carga Est.
	Dial	Kg	Kg/cm2	
0.00	0.00	0.00	0.00	
0.63	1.05	107.0	5.4	
1.27	1.58	160.6	8.1	
1.91	1.95	198.8	10.0	
2.54	2.25	229.4	11.6	70.41
3.81	2.78	282.9	14.3	
5.09	3.15	321.1	16.2	105.10
6.35	3.53	359.3	18.1	
7.62	3.83	389.9	19.7	



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR) 16.4%



ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

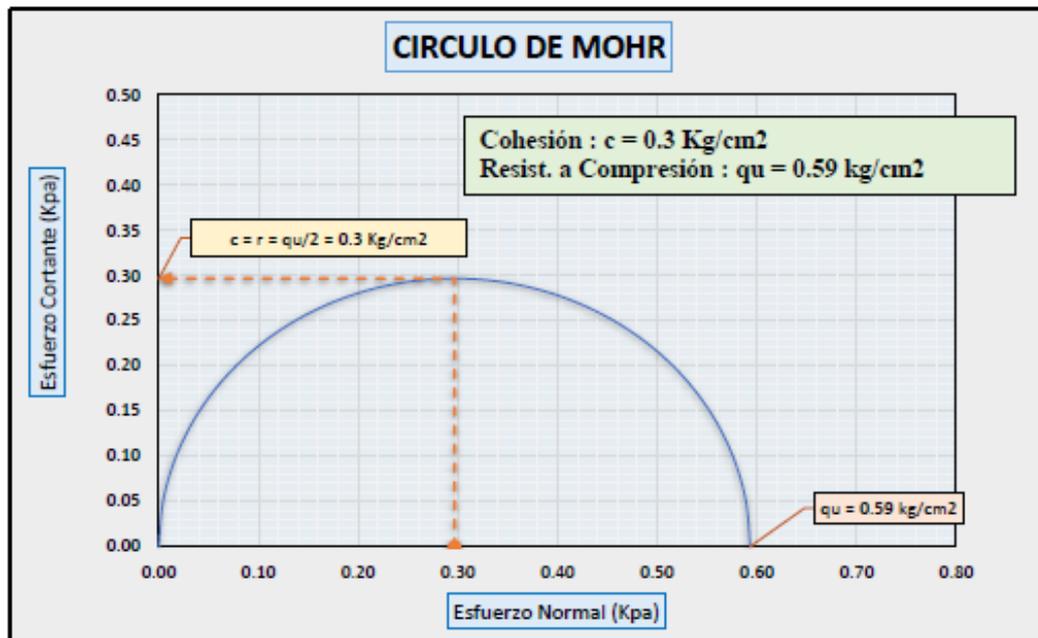
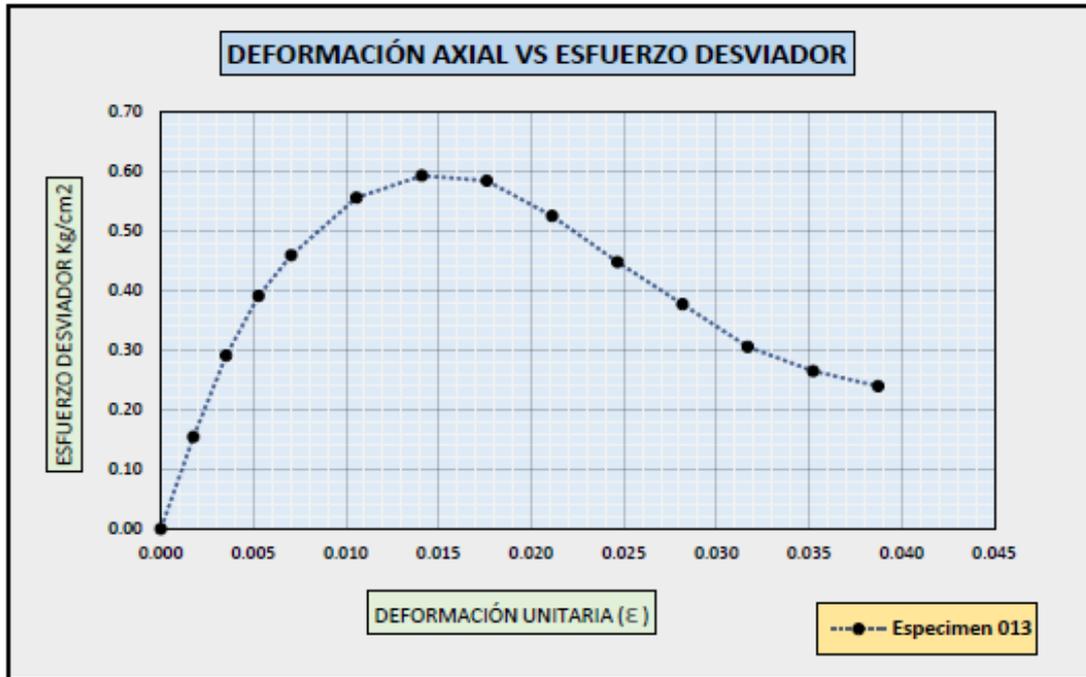
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALICATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	13 de Junio del 2022.

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 2.0 Lt/m³

Descripción	Especimen 013
Peso (g)	1049.81
Diámetro (cm)	7.17
Área Ao (Cm ²)	40.34
Altura Lo (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.83
Humedad W (%)	21.1%

Deformacion ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.339	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.410	0.06	6.244	15.16	0.155
0.50	0.004	40.481	0.12	11.786	28.56	0.291
0.75	0.005	40.553	0.16	15.864	38.38	0.391
1.00	0.007	40.625	0.18	18.667	45.08	0.459
1.50	0.011	40.770	0.22	22.681	54.57	0.556
2.00	0.014	40.915	0.24	24.274	58.20	0.593
2.50	0.018	41.062	0.24	24.019	57.38	0.585
3.00	0.021	41.210	0.21	21.662	51.57	0.526
3.50	0.025	41.358	0.18	18.540	43.98	0.448
4.00	0.028	41.508	0.15	15.673	37.04	0.378
4.50	0.032	41.659	0.13	12.742	30.01	0.306
5.00	0.035	41.811	0.11	11.086	26.01	0.265
5.50	0.039	41.964	0.10	10.066	23.53	0.240

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

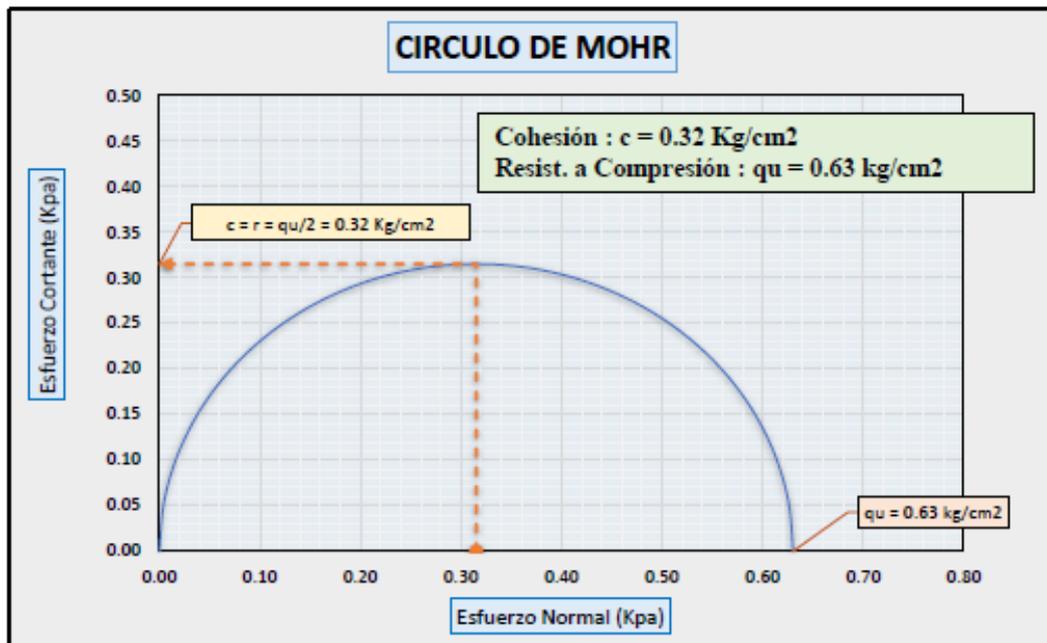
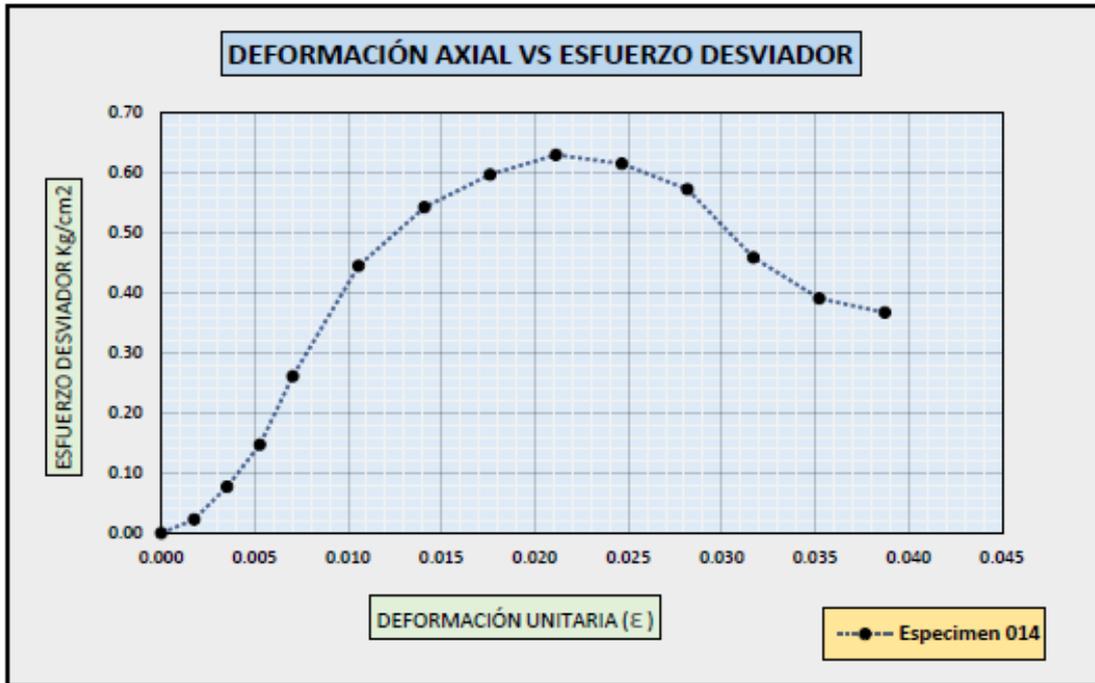
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS :	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR :	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALCATA O CANTERA :	KM: 11+400
FECHA :	13 de Junio del 2022.

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 2.0 Lt/m³

Descripción	Especimen 014
Peso (g)	1081.29
Diámetro (cm)	7.18
Área Ao (Cm ²)	40.53
Altura Lo (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.88
Humedad W (%)	21.2%

Deformacion ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.527	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.598	0.01	0.932	2.25	0.023
0.50	0.004	40.670	0.03	3.145	7.59	0.077
0.75	0.005	40.742	0.06	6.000	14.45	0.147
1.00	0.007	40.814	0.10	10.660	25.62	0.261
1.50	0.011	40.959	0.18	18.232	43.67	0.445
2.00	0.014	41.106	0.22	22.310	53.24	0.543
2.50	0.018	41.253	0.24	24.640	58.59	0.597
3.00	0.021	41.401	0.26	26.096	61.83	0.630
3.50	0.025	41.551	0.25	25.572	60.37	0.615
4.00	0.028	41.701	0.23	23.882	56.18	0.573
4.50	0.032	41.853	0.19	19.222	45.06	0.459
5.00	0.035	42.006	0.16	16.426	38.36	0.391
5.50	0.039	42.160	0.15	15.494	36.05	0.368

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE

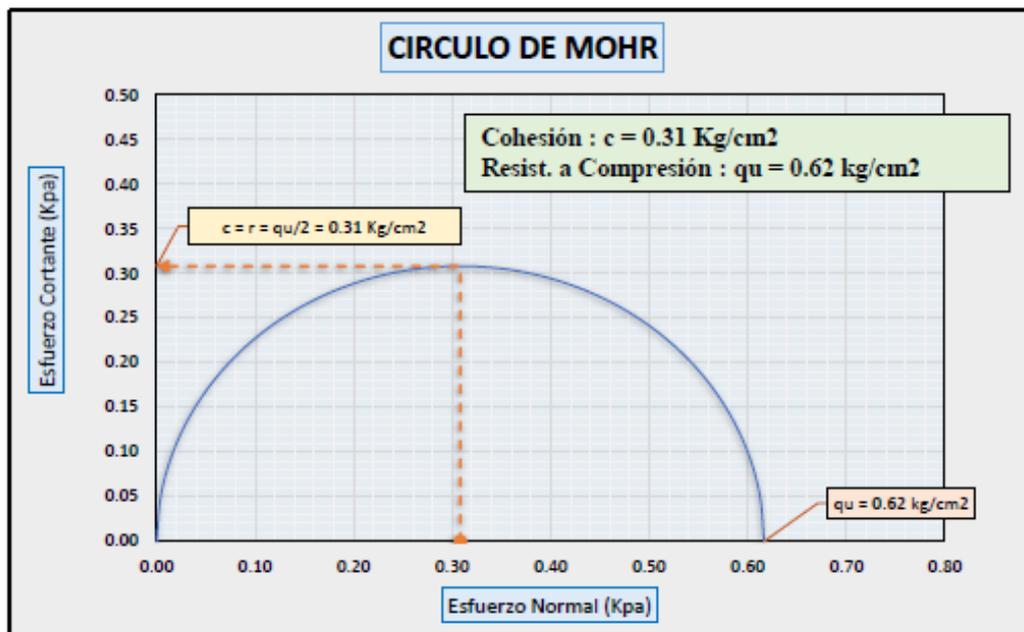
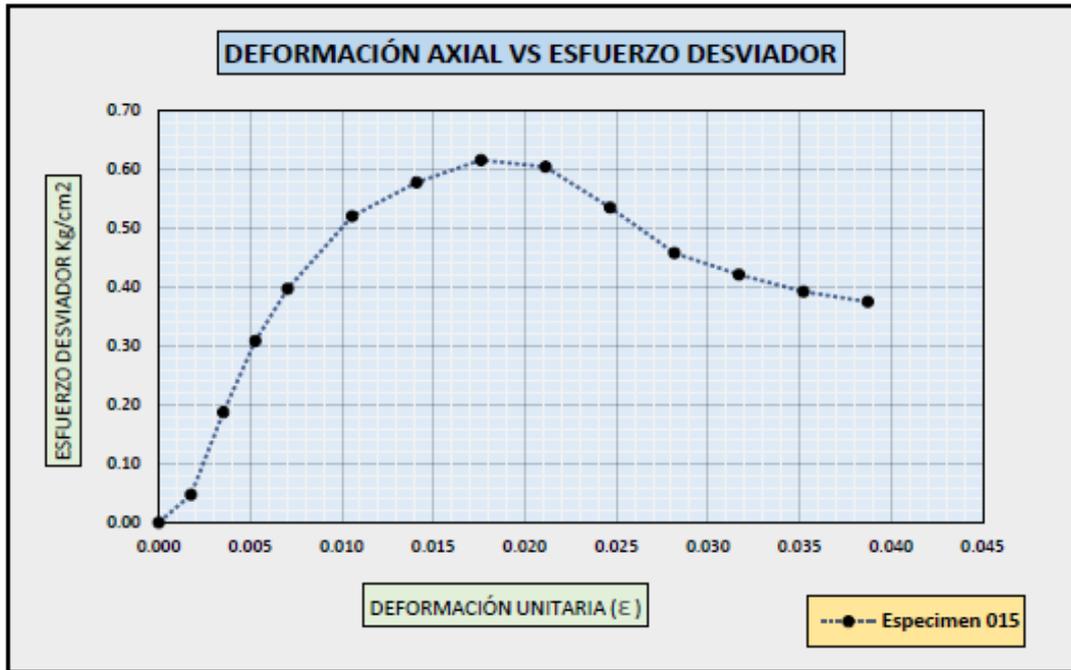
REALIZADO POR:	BACH.: Fabiola Nadia Ramos Quispe.
PROYECTO DE TESIS:	"NANOTECNOLOGIA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTE".
LUGAR:	TRAMO PUNO - MOQUEGUA KM 11+400
CALCATA O CANTERA:	KM: 11+400
FECHA:	13 de Junio del 2022.

DOSIFICACIÓN DE TERRASIL : 2.0 Lt/m³

Descripción	Especimen 015
Peso (g)	1071.98
Diámetro (cm)	7.17
Area Ao (Cm ²)	40.34
Altura Lo (cm)	14.20
Densidad (g/cm ³)	1.87
Humeada W (%)	21.1%

Deformación ΔL (mm)	Deformación Unitaria $\varepsilon = \Delta L/L_0$	Area Corr. (cm ²) $A' = A_0/(1-\varepsilon)$	Lectura Carga (KN)	Carga (Kg) P	Esfuerzo Normal (KPa)	Esfuerzo (Kg/cm ²) $\sigma = P/A'$
0.00	0.000	40.339	0.00	0.000	0.00	0.000
0.25	0.002	40.410	0.02	1.925	4.67	0.048
0.50	0.004	40.481	0.07	7.589	18.39	0.187
0.75	0.005	40.553	0.12	12.516	30.28	0.309
1.00	0.007	40.625	0.16	16.140	38.97	0.397
1.50	0.011	40.770	0.21	21.237	51.10	0.521
2.00	0.014	40.915	0.23	23.672	56.76	0.579
2.50	0.018	41.062	0.25	25.314	60.48	0.616
3.00	0.021	41.210	0.24	24.918	59.32	0.605
3.50	0.025	41.358	0.22	22.143	52.52	0.535
4.00	0.028	41.508	0.19	19.028	44.97	0.458
4.50	0.032	41.659	0.17	17.556	41.34	0.421
5.00	0.035	41.811	0.16	16.423	38.53	0.393
5.50	0.039	41.964	0.15	15.744	36.80	0.375

GRAFICO DE ESFUERZO - DEFORMACION





ANEXO 6

FICHA TÉCNICA DEL AGENTE ESTABILIZADOR QUÍMICO TERRASIL

FICHA TÉCNICA

Definición

TERRASIL es un aditivo para suelos de última generación, formado al 100% por organosilanos, capaz de repeler el agua, eliminar el hinchamiento y la absorción de suelos. Es, por tanto, un agente impermeabilizante de suelos, que aporta ventajas adicionales a la estabilización tradicional de suelos.

Características físicas

Forma	Líquida
Color	Rojizo pálido
Punto de inflamación	> 90 °C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Propiedades Explosiva	No Explosivo
Densidad	1,04 g/ml
Viscosidad(25°C)	100-500 cps

NOTA: Las características son típicas. Estas pueden variar sin que se vea afectado el desempeño del producto.

Dosificación Mezclada

Agua	Terrasil
Necesaria para alcanzar el óptimo de compactación	0,2-2 kg/m ³

Aplicar en el procedimiento mezclado con el material a estabilizar y en disolución con el agua óptima para alcanzar la densidad máxima.

Estas son dosificaciones recomendadas. La solución definitiva se obtiene de los ensayos de laboratorio realizados a cada tipo de material, evaluando el costo-beneficio en cada proyecto.

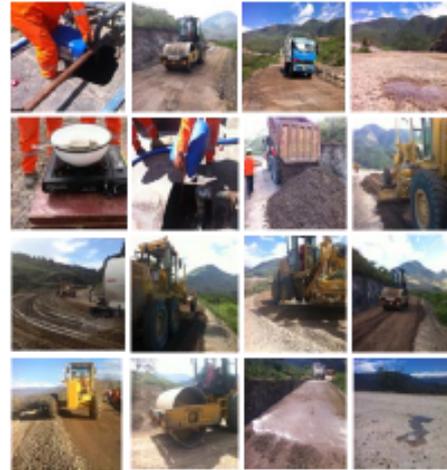
Dosificación Riegos

Agua	Terrasil	Dosificación
300 litros	1 kg	0,01 Kg/m ²

Aplicar sobre la superficie compactada con 3 lit³ de la disolución en dos fases

Estas son dosificaciones recomendadas. La solución definitiva se obtiene de los ensayos de laboratorio realizados a cada tipo de material, evaluando el costo-beneficio en cada proyecto.

Aplicación del sistema



Pasos a seguir:

1. Mezcla de TerraSil para impermeabilización de suelo existente. (Siempre que sea posible y se vaya a realizar una recarga u aportación de material)
2. Compactación del terreno existente
3. Riego de la solución 1:300. 3 litros/m² en dos fases. RIEGO-SECADO-RIEGO
4. Comprobar impermeabilidad.
5. Comprobación de datos de humedad y características del material a estabilizar
6. Mezcla de TerraSil en el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima de compactación.
7. Colocación del material sobre el suelo existente impermeabilizado, si se aporta material o se realiza recarga.
8. Escarificado o reciclado en función de la maquinaria a emplear.
9. Aplicación de la mezcla de agua + TerraSil.
10. Mezclado con el material a estabilizar.
11. Nivelación, bombeos y pendientes.
12. Compactado de la tongada estabilizada.
13. Refinado del material.
14. Compactado al 100%.
15. Riego de sellado 1:300 de TerraSil.
16. Comprobación de impermeabilidad.

Beneficios

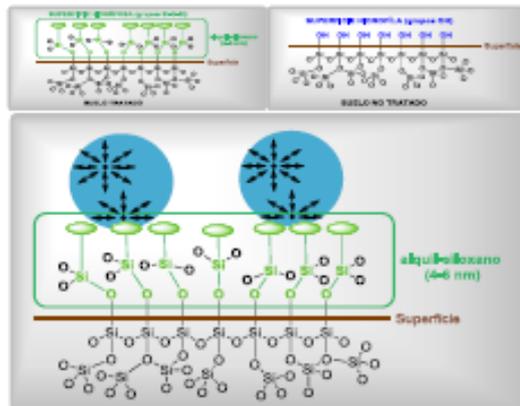
1. El suelo tratado consigue características hidrófobas de forma permanente.
2. El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor).
3. Reduce el índice de plasticidad de los suelos.
4. Se aumentan los valores de CBR.
5. El Hinchamiento se reduce.
6. Mejora el Módulo Resiliente.
7. Se mejoran los datos de densidad y compactación en obra.
8. Es posible reducir el consumo de agua necesaria para la compactación del material.

Modo de Acción

TerraSil es un aditivo modificador de suelos compuesto al 100% por organosilanos, soluble en agua, estable al calor y la radiación ultravioleta. Su principal acción, por tanto, consiste en la impermeabilización de suelos y subsuelos.

Posee grupos silanol, que reaccionan con los silicatos presentes en el suelo, transformando su superficie y confiriéndoles propiedades hidrófobas permanentes.

Así, el suelo repelerá las moléculas de agua, impermeabilizándolo y evitando los problemas derivados de la presencia de la misma.



Repulsión de las gotas de agua sobre la superficie por interacciones desfavorables polar-apolar.

Debido a la inexistencia de grupos polares en la superficie de los suelos, las gotas de agua no sufren ruptura en sus moléculas constitutivas, al no formarse los enlaces de hidrógeno necesarios para ello. De esta manera, las repulsiones de tipo sustancia polar-sustancia apolar originan que se mantenga la tensión superficial en las gotas de agua, permaneciendo sobre la superficie del suelo.



Aspecto de gotas de agua depositadas sobre suelos tratados con TerraSil. Como se puede observar, la repelencia de la gota es total.

Presentación

La presentación de los productos se realiza en bidones de 20 kg.

Exposición a la humedad

El producto es reactivo a la humedad. La exposición excesiva a la humedad puede conducir a un aumento de la viscosidad y gelificación.

Almacenamiento

Almacenar en lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en lugar seco y bien ventilado. Mantener alejado de cualquier material oxidante, inflamable, percloratos, ácido crómico o ácido nítrico.

Estabilidad del producto mezclado

No almacenar el producto después de la dilución en agua.



ANEXO 7

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO



Análisis de precios unitarios

Presupuesto	0201001	NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUB RASANTE						
Sub Presupuesto	001	CONSTRUCCION DE PAVIMENTO			Fecha de Presupuesto : 01/08/2022			
Partida	MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE (CON MATERIAL DE CANTERA)							
Rendimiento	m3/día	MO. 500	EQ. 500	Costo Unitario Directo por m3 :			141.39	
Código	Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de Obra							
0101010002	CAPATAZ			hh	0.1	0.0016	25.22	0.04
0101010003	OPERARIO			hh	0.5	0.008	24.22	0.19
0101010005	PEON			hh	4	0.064	19.20	1.23
	Materiales							1.46
0207070001	AGUA PUESTA EN OBRA			m3		0.065	8.02	0.52
0222170002	MATERIAL DE CANTERA			m3		1.000	131.5	131.50
	Equipos							132.02
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES			% MO		0.03	1.46	0.04
0301100007	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP			hm	1	0.016	156.84	2.51
03012000010001	MOTONIVELADORA 130-135 HP			hm	1	0.016	205.77	3.29
03012200050001	CAMION CISTERNA (2,500 GLNS)			hm	1	0.016	128.96	2.06
								7.91

Análisis de precios unitarios

Presupuesto	0201001	NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUB RASANTE						
Sub Presupuesto	001	CONSTRUCCION DE PAVIMENTO			Fecha de Presupuesto : 01/08/2022			
Partida	MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE (1.4L/M3 DE ADITIVO TERRASIL)							
Rendimiento	m3/día	MO. 500	EQ. 500	Costo Unitario Directo por m3 :			101.87	
Código	Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de Obra							
0101010002	CAPATAZ			hh	0.1	0.0016	25.22	0.04
0101010003	OPERARIO			hh	0.5	0.008	24.22	0.19
0101010005	PEON			hh	4	0.064	19.20	1.23
	Materiales							1.46
0207070001	AGUA PUESTA EN OBRA			m3		0.065	8.02	0.52
0222170002	ADITIVO ESTABILIZADOR TERRASIL			l		1.4	65.7	91.98
	Equipos							92.50
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES			% MO		0.03	1.46	0.04
0301100007	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP			hm	1	0.016	156.84	2.51
03012000010001	MOTONIVELADORA 130-135 HP			hm	1	0.016	205.77	3.29
03012200050001	CAMION CISTERNA (2,500 GLNS)			hm	1	0.016	128.96	2.06
								7.91