



**Universidad Científica del Perú - UCP**  
Registrado en el Asiento N° A00010 de la Partida N° 11000318, Personas Jurídicas de Iquitos,  
Superintendencia de los Registros Públicos - SUNARP

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS:**

**ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARENO LIMO  
ARCILLOSOS EN SELVA BAJA. APLICACIÓN DE ADITIVO  
TERRASIL PARA MEJORAMIENTO DE MATERIAL DE BASE EN VÍA  
DE ACCESO “VILLA MILAGRITOS” - SAN JUAN BAUTISTA, PERÚ,  
2022”.**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

**AUTORES:**

Br. MANUYAMA SOLSOL, Sharon Julissa

Br. NAJAR TANGO, Andrew Miguel

**ASESOR:**

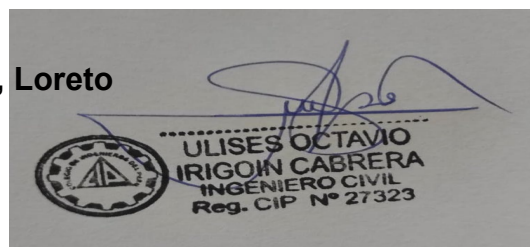
Ing. M Sc Ulises Octavio Irigoin Cabrera

**COASESOR:**

Ing. M Sc Claudia de Jesús Morales Aquituari

**San Juan Bautista, Maynas, Loreto**

**2022**



## DEDICATORIA

*A Dios, todo poderoso por dirigir y forjar mi camino. Por Siempre brindarme salud y protección.*

*A mis padres, Felipe y Soledad, por ser los autores principales de mi vida, muchos de mis logros los debo a ustedes, infinitamente agradecidos con Uds. Mis amores eternos por las enseñanzas y valores inculcados en mis hermanos y mi persona. A mi esposo Claudio por ser el complemento en mi vida y el mayor motor y motivo para seguir superándome mi pequeño hijo Felipe Alejandro Grandez Manuyama.*

**Sharon Julissa Manuyama Solsol**

*A Dios, por darme sabiduría y fuerzas para seguir adelante ante los obstáculos que se me presenten.*

*A mis padres, Miguel Najar y Rosa Tangoa, quienes son siempre mi inspiración para mejorar cada día y lograr mis objetivos.*

**Andrewn Miguel Najar Tangoa**

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestros padres, por darnos la vida.

Al asesor, Ing. Ulises Octavio Irigoien Cabrera por su dedicación y dirección en la realización de esta tesis; y, por transmitirnos sus conocimientos en el campo de la ingeniería.

Al personal del laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales de la UCP, Téc. Jack Sarmiento por la orientación y aporte durante la realización de los ensayos.

A los practicantes del laboratorio, por apoyarnos durante los ensayos de investigación.

A todas las personas que de alguna manera nos brindaron su respaldo en la realización de la presente tesis.

Los autores

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP**

El presidente del Comité de Ética de la Universidad Científica del Perú - UCP

Hace constar que:


El Trabajo de Investigación titulado:

**"ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARENO LIMO ARCILLOSOS EN SELVA  
BAJA. APLICACIÓN DE ADITIVO TERRASIL PARA MEJORAMIENTO DE  
MATERIAL DE BASE EN VÍA DE ACCESO "VILLA MILAGRITOS" - SAN JUAN  
BAUTISTA, PERÚ, 2022"**

De los alumnos: **MANUYAMA SOLSOL SHARON JULISSA Y NAJAR TANGO  
ANDREW N MIGUEL**, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó  
satisfactoriamente la revisión por el Software Antiplagio, con un porcentaje  
de **18% de plagio**.

Se expide la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que  
estime conveniente.

San Juan, 14 de Julio del 2022.



Dr. César J. Ramal Asayag  
Presidente del Comité de Ética – UCP

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



UNIVERSIDAD  
CIENTÍFICA  
DEL PERÚ

"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA

#### FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal N°897-2021-UCP-FCEI de fecha 07 de diciembre de 2021. La FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador de la sustentación de tesis a los señores:

- |  |            |
|--|------------|
| • Ing. Carol Begoña García Langer, M. Sc.  | Presidente |
| • Ing. Juan Jesús Ocaña Aponte, M. Sc.     | Miembro    |
| • Ing. Jeffrey Stefano Arévalo Flores, Mg. | Miembro    |

Como Asesor: Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera, M. Sc.

Como Co Asesora: Ing. Claudia de Jesús Morales Aquituarí.

En la ciudad de Iquitos, siendo las 19:00 horas del día 16 de agosto del 2022, en las instalaciones de la sala de audiencias de la Universidad Científica del Perú, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: "ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ARENO LIMO ARCILLOSOS EN SELVA BAJA. APLICACIÓN DE ADITIVO TERRASIL PARA MEJORAMIENTO DE MATERIAL DE BASE EN VÍA DE ACCESO "VILLA MILAGRITOS" - SAN JUAN BAUTISTA, PERÚ, 2022".

Presentado por los sustentantes:

**SHARON JULISSA MANUYAMA SOLSOL Y  
ANDREW N MIGUEL NAJAR TANGO**


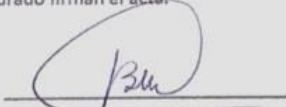
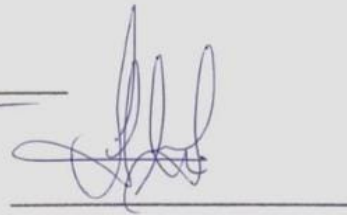
Como requisito para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL**

Luego de escuchar la sustentación y formuladas las preguntas las que fueron:

El Jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión: *ABSUELTA*

La sustentación es: *APROBADO POR UNANIMIDAD*

En fe de lo cual los miembros del Jurado firman el acta.

 _____ Miembro	 _____ Presidente	 _____ Miembro
---	--	--

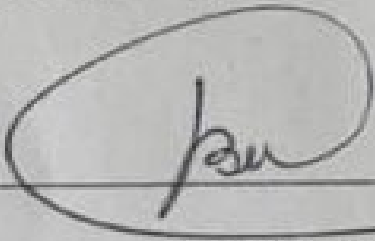
Contáctanos:

Iquitos – Perú  
065 - 26 1088 / 065 - 26 2240  
Av. Abelardo Quiñones Km. 2.5

Filial Tarapoto – Perú  
42 – 58 5638 / 42 – 58 5640  
Leoncio Prado 1070 / Martines de Compagñon 933

Universidad Científica del Perú  
www.ucp.edu.pe

MIEMBROS DEL JURADO



Presidente

Ing Carol Begoña Garcia Langer, M. Sc.



Miembro

Ing Juan Jesús Ocaña Aponte, M. Sc.



Miembro

Ing Jefree Stefano Arévalo Flores, Mg.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
RESUMEN .....	xv
1. Marco teórico .....	1
1.1 Antecedentes del estudio .....	1
1.2 Bases teóricas .....	19
1.2.1 Origen de los suelos .....	19
1.2.2 Suelos residuales .....	22
1.2.3 Suelos sedimentarios .....	24
1.2.4 Humedad de los suelos .....	26
1.2.5 La Mecánica de los Suelos y la construcción de carreteras .....	28
1.2.6 Propiedades físicas y clasificación de los suelos .....	44
1.2.7 Análisis de materia orgánica .....	66
1.2.8 Propiedades físicas y químicas y tipos de arcillas .....	67
1.2.9 Estabilización de suelos .....	72
1.2.10 Métodos de estabilización de suelos .....	82
1.2.11 Respuesta de los suelos a la estabilización con aditivos en carreteras .....	86
1.2.12 Estabilización de suelos con productos químicos en carreteras .....	90
1.2.13 Estabilización de vías No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito .....	98
1.2.14 Proceso de estabilización de base de pavimento con Terrasil .....	112

1.2.15	Jerarquización vial y clasificación de carreteras en el Perú	115
1.2.16	Gestión del sistema vial carretero peruano .....	120
1.3	Definición de términos básicos .....	127
2.	Planteamiento del problema .....	134
2.1.	Descripción del problema .....	134
2.2.	Formulación del problema .....	139
2.2.1.	Problema general.....	140
2.2.2.	Problemas específicos .....	140
2.3.	Objetivos.....	141
2.3.1.	Objetivo general.....	141
2.3.2.	Objetivos específicos .....	141
2.4.	Hipótesis.....	142
2.4.1.	Hipótesis general .....	142
2.5.	Variables.....	142
2.5.1.	Identificación de variables.....	142
2.5.2.	Definición conceptual y operacional de las variables.....	142
2.5.3.	Operacionalización de las variables.....	142
3.	Metodología .....	144
3.1.	Tipo y diseño de investigación.....	144
3.1.1.	Tipo de investigación .....	144
3.1.2.	Diseño de investigación .....	144
3.2.	Población y muestra .....	145
3.2.1.	Población .....	145
3.2.2.	Muestra .....	145
3.3.	Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.....	146
3.3.1.	Técnicas de recolección de datos.....	146
3.3.2.	Instrumentos de recolección de datos .....	147



3.3.3.	Laboratorios y Procedimientos.....	147
3.3.4.	Materiales a utilizar .....	149
3.3.5.	Equipos a utilizar.....	149
3.3.6.	Descripción de Ensayos a realizar: Para el suelo areno limo arcilloso con adición de Terrasil al 0 % .....	149
3.3.7.	Ensayos para el suelo areno limo arcilloso con adición apropiada de Terrasil	152
3.4.	Procesamiento y análisis de datos .....	152
4.	Resultados y discusión de resultados .....	153
4.1.	Resultados.....	153
4.2.	Discusión .....	170
5.	Conclusiones y recomendaciones .....	174
5.1.	Conclusiones .....	174
5.2.	Recomendaciones.....	176
	Referencias Bibliográficas.....	177
	Anexos .....	186

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Alternativa 1. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2 .....	4
<b>Tabla 2.</b>	Alternativa 2. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2 .....	5
<b>Tabla 3.</b>	Alternativa 3. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2 .....	5
<b>Tabla 4.</b>	Alternativa 4. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2 .....	5
<b>Tabla 5.</b>	Alternativa 5. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2 .....	6
<b>Tabla 6.</b>	Adición de Cal .....	9
<b>Tabla 7.</b>	Mezclas de suelo Aeródromo de San Lorenzo.....	12
<b>Tabla 8.</b>	Mezclas de suelo Aeródromo de Sepahua.....	12
<b>Tabla 9.</b>	Resultados de ensayos CBR y compresión no confinada Aeródromo San Lorenzo .....	14
<b>Tabla 10.</b>	Resultados de ensayos CBR y compresión no confinada Aeródromo Sepahua .....	14
<b>Tabla 11.</b>	Ensayos en Muestra: A-4(1). .....	16
<b>Tabla 12.</b>	Ensayos en Muestra: Combinación A-2(4) 85% y A-7-5(9) 15%. ..	17
<b>Tabla 13.</b>	Ensayos en Muestra: A-4(1). CBR al 95%, M.D.S. y O.C.H.....	17
<b>Tabla 14.</b>	Características básicas para la superficie de rodadura de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito.....	37
<b>Tabla 15.</b>	Categoría de la Subrasante según su CBR indicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones- MTC .....	41
<b>Tabla 16.</b>	Denominaciones de la compacidad.....	45
<b>Tabla 17.</b>	Clasificación de los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría. ....	55
<b>Tabla 18.</b>	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.....	55
<b>Tabla 19.</b>	Comparación entre el Sistema AASHTO y el Sistema SUCS .....	62
<b>Tabla 20.</b>	Comparación entre el Sistema SUCS y el Sistema AASHTO .....	62
<b>Tabla 21.</b>	Niveles de Materia Orgánica.....	67
<b>Tabla 22.</b>	Métodos de mejoramiento de suelos.....	82

<b>Tabla 23.</b>	Procedimientos para modificar un suelo natural.....	83
<b>Tabla 24.</b>	Respuesta de los principales tipos de suelos a la estabilización con diversos aditivos.....	87
<b>Tabla 25.</b>	Tabla de límites en el suelo para su estabilización con cemento ....	95
<b>Tabla 26.</b>	Porcentaje de Cemento según Manual de Carreteras de Bajo Tránsito del Perú.....	96
<b>Tabla 27.</b>	Porcentaje de Cemento según el Instituto Mexicano del Transporte.....	96
<b>Tabla 28.</b>	Porcentaje de Cemento sugeridos en otros países.....	97
<b>Tabla 29.</b>	Ensayos del diseño de mezcla estabilización suelo cemento.....	98
<b>Tabla 30.</b>	Especificaciones Técnicas de tipos de estabilizadores y parámetros.....	99
<b>Tabla 31.</b>	Características de materiales para Base.....	103
<b>Tabla 32.</b>	Dosificación Terrasil para ensayo CBR sugerida por fabricante.....	107
<b>Tabla 33.</b>	Tabla 301.C -01, (Ensayos y Frecuencias para suelo estabilizado con productos químicos).....	114
<b>Tabla 34.</b>	Clasificación de Carreteras según su Función.....	117
<b>Tabla 35.</b>	Clasificación de Carreteras según su Demanda.....	118
<b>Tabla 36.</b>	Clasificación de Carreteras según su Condición Geográfica.....	118
<b>Tabla 37.</b>	Clasificación de Carreteras según su Tipo de Superficie de Rodadura.....	119
<b>Tabla 38.</b>	Longitud de la red vial, según tipo de superficie de rodadura y sistema de carretera, periodo 2005-2008 (kilómetros).....	121
<b>Tabla 39.</b>	Evolución de la Red Vial Peruana.....	122
<b>Tabla 40.</b>	Características técnicas de la vía de acceso "Villa Milagritos" (de 7.5 km aproximadamente).....	138
<b>Tabla 41.</b>	Cantidad de muestra por calicata.....	145
<b>Tabla 42.</b>	Cantidad de muestras a ensayar.....	146

<b>Tabla 43.</b>	Fases de recopilación de datos .....	146
<b>Tabla 44.</b>	Coordenadas UTM de ubicación de Cantera.....	146
<b>Tabla 45.</b>	Coordenadas de emplazamiento de calicatas .....	147
<b>Tabla 46.</b>	Ensayos a realizar en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de Materiales de Construcción de la UCP.....	148
<b>Tabla 47.</b>	Materiales a utilizar para realizar el proyecto .....	149
<b>Tabla 48.</b>	Equipos a utilizar para realizar el proyecto .....	149
<b>Tabla 49.</b>	Contenido de Humedad de suelo areno limo arcilloso cantera Milagritos III con adición Terrasil al 0 %.....	149
<b>Tabla 50.</b>	Análisis granulométrico de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%.....	150
<b>Tabla 51.</b>	Análisis granulométrico con el hidrómetro de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%.....	150
<b>Tabla 52.</b>	Análisis de Límite Líquido de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%.....	150
<b>Tabla 53.</b>	Análisis de Límite Plástico de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%.....	151
<b>Tabla 54.</b>	Compactación Proctor Modificado de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0% .....	151
<b>Tabla 55.</b>	Ensayo CBR de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0% .....	151
<b>Tabla 56.</b>	Límite de Consistencia del material natural .....	154
<b>Tabla 57.</b>	Límite Líquido ASTM D 4318 - T 89 .....	154
<b>Tabla 58.</b>	Límite Plástico ASTM D 4318 - T 90.....	154
<b>Tabla 59.</b>	Ensayo de Proctor Modificado del suelo natural. Método A (ASTM D1557) .....	155
<b>Tabla 60.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883 suelo natural	156
<b>Tabla 61.</b>	Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	156
<b>Tabla 62.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	157
<b>Tabla 63.</b>	Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	157

<b>Tabla 64.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	158
<b>Tabla 65.</b>	Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	158
<b>Tabla 66.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	159
<b>Tabla 67.</b>	Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	159
<b>Tabla 68.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	160
<b>Tabla 69.</b>	Análisis granulométrico por tamizado .....	161
<b>Tabla 70.</b>	Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	162
<b>Tabla 71.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	163
<b>Tabla 72.</b>	Ensayo de Próctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	164
<b>Tabla 73.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	165
<b>Tabla 74.</b>	Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	165
<b>Tabla 75.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	166
<b>Tabla 76.</b>	Ensayo de Próctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	167
<b>Tabla 77.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	167
<b>Tabla 78.</b>	Ensayo de Próctor Modificado. Método A (ASTM D1557).....	168
<b>Tabla 79.</b>	Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883.....	168

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951). .....	49
<b>Figura 2.</b>	Curvas granulométricas .....	50
<b>Figura 3.</b>	La caolinita, mineral eléctricamente neutro .....	69
<b>Figura 4.</b>	Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica. ....	70
<b>Figura 5.</b>	Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica .....	72
<b>Figura 6.</b>	Curva de flujo.....	155
<b>Figura 7.</b>	Curva de compactación .....	155
<b>Figura 8.</b>	Curva C.B.R.....	156
<b>Figura 9.</b>	Curva C.B.R.....	157
<b>Figura 10.</b>	Curva C.B.R.....	158
<b>Figura 11.</b>	Curva C.B.R.....	159
<b>Figura 12.</b>	Curva C.B.R.....	160
<b>Figura 13.</b>	Curva granulométrica.....	162
<b>Figura 14.</b>	Curva de compactación .....	163
<b>Figura 15.</b>	Curva C.B.R.....	164
<b>Figura 16.</b>	Curva de compactación .....	164
<b>Figura 17.</b>	Curva C.B.R.....	165
<b>Figura 18.</b>	Curva C.B.R.....	166
<b>Figura 19.</b>	Curva C.B.R.....	168
<b>Figura 20.</b>	Curva C.B.R.....	168

## RESUMEN

En este trabajo de tesis el objetivo principal es establecer las características físicas y mecánicas del suelo natural de textura areno limo arcilloso de una colina, emplazado en una cantera de 15 m de potencia y 10 hectáreas de extensión, ubicada en el km 8+000 costado derecho de la vía de penetración Villa Milagritos para cuya conformación de su base y sub base se pretende usar previa mejora de sus propiedades naturales tales como pH de 5,94%, índice de Plasticidad (IP) de 9.93%, densidad seca (Ds) de 1.895 gr/cm<sup>3</sup> y CBR al 100% de 27.29 %, y alcanzar las exigidas por el MTC (2008) para vías de bajo tránsito y no pavimentada como ésta.

En esta investigación cuasi experimental se utilizó dosificaciones de 0,3%, 0,5%, 0,75% y 1.0% de Terrasil y una cantidad constante de 0.5% de cemento portland. En su desarrollo se empleó la estadística descriptiva e inferencial. Los mejores resultados de su estabilización se alcanzaron con la adición de 0.5% de cemento portland y con la adición de Terrasil en dosificación al 1,0% del peso del suelo, lográndose un IP de 8.35%, una Ds de 1,886 gr/cm<sup>3</sup> y CBR al 95 % de 42,31 %, a cuya luz al encontrarse en el rango aceptable, su uso para conformación de sub base y base, de la vía de penetración Villa Milagritos es técnicamente factible.

**Palabras Clave:** Estabilización, cemento portland, terrasil, carretera no pavimentada, bajo tránsito.

## **1. Marco teórico**

### **1.1 Antecedentes del estudio**

En estos últimos años en el Perú, constituye lineamiento estratégico, la ampliación, conservación y modernización de la infraestructura de transportes de calidad y competitiva, que promuevan la inclusión social, la integración interna y externa del país y protección del medio ambiente, por lo que se viene desarrollando un agresivo programa de construcción y rehabilitación de carreteras, incluyendo la regulación sobre el uso de estabilizadores como insumo indispensable para mejorar la capacidad de soporte o CBR (California Bearing Ratio) de los materiales de características marginales de la subrasante y suelos granulares de buenas características, pero de estabilidad insuficiente para conformación de las capas de material tipo afirmado de subbase y Base; y, garantizar así mayor vida útil a la infraestructura vial y el cumplimiento de lo previsto en el Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo tránsito del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008). (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2016).

HUESO y ORELLANA (2009), en su trabajo de Tesis sobre estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador” llegó, entre otras, a las siguientes conclusiones: “La adición de cal disminuye la plasticidad del suelo, reduciendo de igual manera su cohesión, y la resistencia durante los primeros días del curado; razón por la cual la resistencia a compresión a temprana edad en probetas elaboradas con suelo natural son superiores que las de la mezcla suelo – cal” (Hueso y Orellana, 2009).



“La dosificación del porcentaje de la cal a utilizar, dependerá de las características y propiedades que presente cada suelo en particular” (Hueso y Orellana, 2009), en (Vasquez y Marín, 2020).

“El suelo estabilizado con cal y analizados para fines de esta investigación, presenta resultados de resistencia a la compresión con un incremento del más del 100% a los valores obtenidas para el mismo suelo sin cal a los 90 días curado, tiempo que se define en las normas del ASTM 5102 -04, como el tiempo necesario en los que especímenes de mezcla suelo- cal alcanzan una resistencia a la compresión aceptable” (Hueso y Orellana, 2009).

CAPEDO, J. (2008), en su tesis titulada “Estabilización de suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de Pavimentos en la Carretera Lima – Huacho”, se estudió la estabilización química de suelo arcilloso y concluyó: “En las vías terrestres es un requisito que cada capa subrasante tenga una resistencia adecuada de acuerdo a especificaciones del proyecto, ya que sirve de cimiento entre la estructura vial y el terreno natural. Existen varios métodos para estabilizar el suelo arcilloso. Se puede utilizar material de banco para construir la capa subrasante o la combinación de este material con el suelo natural del terreno, pero tendría que analizarse, para ver que resultaría más económica. (Capedo, 2008) en (Vásquez y Marín, 2020).

Gutierrez (2010), en su Tesis, evaluó la estabilización química de suelos para su uso como material de sub base y base en carreteras no pavimentadas en el Perú, para lo cual determinó las ventajas comparativas del cloruro de magnesio (Bischofita) frente

al cloruro de calcio, llegando a determinar que el cloruro de magnesio ofrece mayores ventajas técnicas, económicas y ambientales frente al cloruro de calcio y otras sales; estableciendo así, líneas de acción a seguir al momento de optar por uno u otro tipo de aditivo estabilizador de una carretera no pavimentada ubicada en la costa peruana. En el desarrollo de su investigación precisó que cuando se usa estabilizadores químicos de suelos, el propósito es reducir el deterioro superficial de carpetas granulares de rodado, como también controlar las emisiones de polvo, ambos problemas presentes en carreteras no pavimentadas en las que se busca reducir los costos de mantenimiento. Asimismo formuló procedimientos para la evaluación de las ventajas económica, técnica y ambiental de los aditivos estabilizadores a partir de la revisión bibliográfica de investigaciones existentes sobre el caso. (Gutierrez, 2010).

Vásquez (2010), en su Tesis para optar el título de ingeniero civil por la Universidad Nacional de Ingeniería, titulada "Pavimentos no tradicionales para carreteras de selva baja con bajo volumen de tránsito, aplicación: Carretera Contamana – Aguas Calientes, Loreto", recomienda elegir apropiadamente el método de estabilización de suelos, tomando en cuenta el tipo de suelo, procedimientos constructivos, costos y las condiciones que deberá soportar la vía durante su vida de servicio (Vásquez, 2010). Vásquez (2010), en su trabajo, indicó que la carretera está conformada por dos sectores bien definidos: el primer sector comprendido entre las progresivas 00+000 a 14+400 que presenta suelo arcilloso de alta plasticidad del tipo CH, correspondiéndole un CBR de diseño de 4.20 efectuado con cal; y, el segundo sector comprendido entre las progresivas 14+400 a 18+200 con un suelo areno limoso (SM) y un CBR de diseño de 4.50 efectuado con cemento, señalando que en ambos sectores existen tramos en un total de 760 m en los que el

CBR es menor que el CBR de diseño, para los cuales se plantea el empleo de una geomalla como refuerzo y un geotextil con el fin de impedir la migración de finos entre capas del pavimento (Vásquez 2010, pg 112). Vásquez (2010), en los diseños de estabilización suelo-cal, suelo-cemento y suelo-asfalto, utilizó las dos canteras estudiadas por la empresa contratista de la carretera: una de arcilla color beige, de alta plasticidad, consistencia media y 24% de humedad natural, clasificada como CH (SUCS) o A-7-6(17) (AASHTO), de 1103 kg/m<sup>3</sup> de peso volumétrico, de 1297kg/m<sup>3</sup> de peso unitario varillado y de 2.67 de gravedad específica, y la otra de material arenoso, clasificada como SM (SUCS) o A-2-4(0) (AASHTO) de 12% a 14 % de contenido de humedad y peso volumétrico comprendido entre 1350 kg/m<sup>3</sup> y 1359 kg/m<sup>3</sup>, 2.61 de gravedad específica y un porcentaje de equivalente de arena entre 70% y 76% (Vásquez, 2010).

Vásquez (2010) señala que: En la pavimentación de la carretera Contamana - Aguas calientes, se identificaron las siguientes cinco (5) alternativas de solución de estabilización de suelos:

“Alternativa 1: No se realiza ningún tratamiento a la subrasante y se utiliza material de cantera de arena limosa. Se imprimirá posteriormente para protegerlo de la lluvia”. (Vásquez, 2010).

**Tabla 1.** Alternativa 1. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2

Estructura del pavimento	CBR	Sector 1 Espesor (Cm)	Sector 2 Espesor (Cm)
Imprimación asfáltica		-	-
Base A-2-4 (0)	13%	30	30
Sub base A-2-4 (0)	13%	50	45

**Fuente:** Gama Ingeniería, Proyecto Contamana en Vásquez (2010)

“Alternativa 2: No se realiza ningún tratamiento a la subrasante y se utiliza material de cantera de arena limosa y grava traída de Aguaytía

- Pucallpa. Se imprimirá posteriormente para protegerlo de la lluvia”.  
(Vásquez, 2010).

**Tabla 2.** Alternativa 2. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2

Estructura del pavimento	CBR	Sector 1 Espesor (Cm)	Sector 2 Espesor (Cm)
Imprimación asfáltica		-	-
Base A-2-4 (0)	80%	10	10
Sub base A-2-4 (0)	80%	30	30

**Fuente:** Gama Ingeniería, Proyecto Contamana en Vásquez (2010)

“Alternativa 3: Se realiza tratamiento con aditivo estabilizador a la subrasante y se utiliza material de cantera de arena limosa. Se imprimirá posteriormente para protegerlo de la lluvia”. (Vásquez, 2010)

**Tabla 3.** Alternativa 3. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2

Estructura del pavimento	CBR	Sector 1 Espesor (Cm)	Sector 2 Espesor (Cm)
Imprimación asfáltica		-	-
Base A-2-4 (0)	13%	10	10
Sub base A-2-4 (0)	13%	25	25

**Fuente:** Gama Ingeniería, Proyecto Contamana en Vásquez (2010)

“Alternativa 4: Se realiza tratamiento con aditivo estabilizador a la subrasante y se utiliza material de cantera de arena limosa y grava traída de Aguaytía - Pucallpa. Se imprimirá posteriormente para protegerlo de la lluvia”. (Vásquez, 2010).

**Tabla 4.** Alternativa 4. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2

Estructura del pavimento	CBR	Sector 1 Espesor (Cm)	Sector 2 Espesor (Cm)
Imprimación asfáltica		-	-
Base A-2-4 (0)	80%	5.0	5.0
Sub base A-2-4 (0)	80%	10.0	10.0

**Fuente:** Gama Ingeniería, Proyecto Contamana en Vásquez (2010)

Alternativa 5: “Se realiza tratamiento con aditivo estabilizador a la subrasante, recubriéndola con geomalla y/o geotextil. Además, se empleará el material de cantera de arena limosa, estabilizada con aditivo. Se imprimirá posteriormente para protegerlo de la lluvia. No se realiza ningún corte a la subrasante”. (Vásquez, 2010)

**Tabla 5.** Alternativa 5. Estructura del pavimento en Sector 1 y Sector 2

Estructura del pavimento	CBR	Sector 1 Espesor (Cm)	Sector 2 Espesor (Cm)
Imprimación asfáltica		-	-
Base A-2-4 (0)	26%	5.0	10.0
Sub base A-2-4 (0)	26%	10.0	15.0

**Fuente:** Gama Ingeniería, Proyecto Contamana en Vásquez (2010)

Según Vásquez (2010) se optó por la alternativa 5 debido a que es la más económica, representando solo la tercera parte del costo de la más cara (alternativa 2); y, además de ser la que constructivamente resulta más simple y de un control rutinario. (Vásquez, 2010).

Para la estabilización de la su base y base, al existir en la carretera solo dos canteras, una de arena y la otra de arcilla, el proyecto señaló conformar la sub base y base, haciendo uso de estos materiales y el empleo de agentes estabilizadores como la cal, cemento o asfalto según convenga de acuerdo con sus características de resistencia y facilidades en sus procesos constructivos. Para el nivel de sub base se planteó el uso de cal y cemento como gentes estabilizadores, dejando al asfalto para su empleo en la base (Vásquez, 2010).

Vásquez (2010), en su Tesis concluyó: “En selva baja, los métodos químicos de estabilización de suelos son los más apropiados; y, dentro de ellos, la estabilización con cal hidratada se comportó mejor con suelos arcillosos, debido a la interacción química con éstas,

siendo necesario adicionar como mínimo un 3% en peso, para asegurar el incremento de resistencia, obteniendo para la cantera a usar la necesidad de 6%, con el cual aseguró que el CBR de diseño de espesores para el nivel de subbase requerido supere el 26%” (Vásquez, 2020).

(Vásquez, 2010) para el diseño de la mezcla suelo-cal, recomendó usar las especificaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, según las cuales el contenido de materia orgánica del suelo debe ser menor de 3%, el índice de plasticidad mayor a 15% y el porcentaje que pasa la malla # 200 mayor al 35% (Vásquez, 2010).

Núñez (2011), en su Tesis “Elección y Dosificación del Conglomerante en estabilización de Suelos”, se propuso determinar un método para alcanzar la estabilización de un suelo de alta plasticidad, y como percepción teórica señala: “La estabilización de suelos no es más que el proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Se dice también que, es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad” (Nuñez, 2011). Nuñez (2011), considerando trabajos de investigación similares en los que tomaron en cuenta el IP para elegir el conglomerante estabilizador, determinó un IP de 18.425 como la plasticidad natural del suelo y, decidió su estabilización utilizando cal, reconociendo que un IP menor a 10 le corresponde a un suelo no plástico para el cual el conglomerante apropiado sería el cemento (Núñez, 2011).

Pérez (2012), con la finalidad de mejorar las características mecánicas del material natural de baja capacidad de soporte en la

subrasante de carretera Villa Rica – Puerto Bermúdez, correspondiente a la selva central, ante el escaso número de canteras de material granular, estudió como trabajo de tesis, el efecto que produce en el comportamiento de ese suelo arcilloso de alta plasticidad la adición de cenizas volantes de carbón y cemento Portland aplicados en diferentes concentraciones para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos, llegando a examinar factores como, tiempo de curado, tiempo de compactación, contenido de agua y otros factores que influyen en el comportamiento de la mezcla final (Pérez, 2012).

Pérez (2012), para evaluar su comportamiento, realizó ensayos de caracterización del suelo natural, la ceniza volante, las mezclas suelo + ceniza volante y suelo + ceniza volante + cemento; y, como resultados de ensayos de CBR al 100% de la MDS para cada tipo de material y/o mezcla, observa que el valor de CBR se incrementa desde 7.7% correspondiente al suelo arcilloso (CH) hasta un valor de CBR de 23.5% para una combinación de material arcilloso en un 60% y ceniza volante en un 40%, y hasta un valor de CBR de 51.0% para una combinación de material arcilloso en un 70%, ceniza volante en un 27% y cemento 3%, respectivamente (Pérez, 2012).

“Los diseños de estructuras típicas de pavimento rural, tanto con un suelo natural arcilloso y con suelo estabilizado, se relacionaron mediante el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities)”. (Pérez, 2012).

**Jara (2014)**, señala que: Los suelos arcillosos presentes en una subrasante crean problemas debido a su elevada plasticidad, reducida capacidad de soporte e inestabilidad de volumen en función de la humedad, por ello en su investigación se propuso como objetivo evaluar el efecto de la cal como estabilizante de una

subrasante de suelo arcilloso tipo A-7-5(29) para el mejoramiento de sus propiedades físicas y mecánicas; y utilizó los porcentajes de cal según norma ASTM 6276, equivalentes al diferentes porcentajes de cal, 0%, 2%, 4% y 6%, en peso de la muestra de suelo a evaluar. Los resultados obtenidos, en el índice de plasticidad correspondiente al suelo natural bajó de 36.87 a un valor de 9.23 con la adición de cal al 6%, y una variación considerable en el CBR del suelo natural, logrando subir de 2.55% hasta alcanzar al 95% de la MDS un valor de 11.48% al adicionarle cal al 4% (Jara, 2014). El CBR mínimo exigido por la Norma (MTC EM 115) para subrasantes es 6%.

Según, refiere Jara (2014): “En el Perú, la estabilización de suelos arcillosos con cal esta fundamentalmente centrado en la selva amazónica por contar con una gran variedad de suelos arcillosos y con alto contenido de humedad”. (Jara, 2014). En el Tercer Congreso Internacional realizado en Sao Pablo, Brasil, de Infraestructura de Transportes (CONINFRA, 2009) presentaron una estabilización de una subrasante de suelo arcilloso con cal señalando haber llegado a obtener los resultados que se muestra en la Tabla N° 6. Adición de Cal. (Jara, 2014)

**Tabla 6.** Adición de Cal

% CAL	PASA N°200	L.L.	IP	CLASIFICACIÓN		MÁX. DENS.	HUM. OPT.	CBR AL 95% MDS 0.1"	COMPRESIÓN NO CONFINADA (28d)(Mpa)
				AASHTO	SUCS				
0.0	36.7	29.4	10.2	A-4(0)	SC	1.945	13.3	23.0%	
2.0	38.6	30.6	7.4	A-4(1)	SM	1.920	13.7	54.0%	1.55
3.0	39.2	31.2	5.0	A-4(1)	SM	1.902	14.2	75.0%	1.97
4.0	39.2	31.2	5.0	A-4(1)	SM	1.902	14.2	82.5%	2.22
5.0	40.4	32.2	2.0	A-4(1)	SM	1.890	14.5	90.0%	2.24
6.0	41.0	30.1	3.9	A-4(1)	SM	1.870	14.7	69.0%	2.1

**Fuente:** CONINFRA, 2009 en (Jara, 2014).



**Cristobal (2015)**, con el objetivo de recomendar un nuevo producto estabilizador químico que incluya nuevas tecnologías en la estabilización de carpetas de rodadura a nivel de afirmado para mejorar las superficies de caminos no pavimentados y así dotarles de una mayor serviciabilidad y un costo de conservación y mantenimiento menores, para medir su efectividad sometió a ensayos de laboratorio y pruebas in situ a los productos Terrasil, Proes, Ionic Soil Stabilizer (ISS 2500) y PERMAZYME - estabilizadores químicos de suelos que venían utilizándose -, para lo cual, en el proyecto “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial EMP. PE 04-B (Hualapampa) –Sondor – Huancabamba – Pacaibamba – Socchabamba – Puesto Vado Grande / Sondor – Tabaconas – EMP. PE – 5N (Ambato)/ Huancabamba – Canchaque y Socchabamba – Ayabaca”, se propuso evaluar las mejoras de las características físico mecánicas del suelo granular usado para la conformación de la base estabilizada; y, para evaluar las propiedades hidrófobas que confiere el Terrasil en comparación con otros estabilizadores, escogió el proyecto de Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de San Lorenzo, distrito de Barranca, provincia Datem del Marañón, departamento de Loreto y Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de Sepahua, distrito de Sepahua, provincia de Atalaya, departamento de Ucayali. (Cristobal, 2015).

Cristóbal (2015), refiere que en las pruebas in situ en el Proyecto Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial EMP. PE 04-B, concesionado con “Consortio Gestiones Viales del Norte”, “Se ha colocado dos tipos de muestra en el tramo de prueba referenciados como: Tramo A: Terrasil (1 kg/m<sup>3</sup>), ubicado en el Km 2039+100 al 2039+150; y Tramo B: Terrasil (0.50 kg/m<sup>3</sup>) y cemento (1%), ubicado en el Km 2039+150 al 2039+250” (Cristobal, 2015).

Cristóbal (2015) señala que, “Se ha preparado varias series de muestras para efectuar el curado, a los 4, 7, 15 y 30 días al aire libre. De la misma mezcla colocada en las zonas mencionadas, en base a los resultados del CBR, Compresión Simple y Deflectometría se determinó el uso del aditivo solo y/o con cemento portland”. (Cristobal, 2015). La muestra de suelo natural granular corresponde según SUCS al tipo GP-GM y según AASHTO es un A-1-a.

Cristobal (2015) a partir de los resultados de las muestras tratadas por “Consortio Gestiones Viales del Norte” indica que: El ensayo de Proctor del agregado natural alcanzó una máxima densidad seca (MDS) de 2.102 y un óptimo contenido de humedad (OCH) de 8.78. El agregado natural + Terrasil en dosificación 1kg/m<sup>3</sup> alcanzó una MDS de 2.111 y un OCH de 8.5; y el agregado natural +Terrasil en dosificación 0.5kg/m<sup>3</sup> + 1% de cemento portland alcanzó una MDS de 2.116 y un OCH de 8.35.

El ensayo de CBR al 100% y al 95% de la MDS y 0.1” (4 días de curado) para el suelo natural fue de 52.5% y 38.6%, respectivamente. El CBR para el suelo natural + Terrasil en dosificación 1kg/m<sup>3</sup> al 100% y al 95% de la MDS y 0.1” (4 días de curado) fue de 85.2% y 68.3%, respectivamente; y, para el suelo natural + Terrasil en dosificación 0.5kg/m<sup>3</sup> + 1% de cemento portland al 100% y al 95% de la MDS y 0.1” (4 días de curado) fue de 110.2% y 83.4%, respectivamente.

Según los resultados, el comportamiento de los agregados con el aditivo Terrasil solo y con el Terrasil + cemento portland no existe diferencias significativas, salvo en la plasticidad que aumenta con Terrasil solo, en un promedio de 1 a 2 % y Terrasil con cemento de 2 a 3 %. (Cristobal, 2015).

Asimismo, con el fin de evaluar las propiedades hidrófobas que confiere el Terrasil en comparación a otros estabilizadores para los

proyectos de Rehabilitación y/o Mejoramiento de los aeródromo de San Lorenzo y Sepahua, Cristobal (2015) señala que las mezclas de suelos y estabilizador se sometieron a los ensayos previstos en la Norma MTC E 1109 – 2004 referidos a estabilizadores químicos, como se indica en la Tabla 7 y Tabla 8. (Cristobal, 2015).

**Tabla 7.** Mezclas de suelo Aeródromo de San Lorenzo

Mezcla I	Cantera de arcilla “El Nazareno” (60%) – Cantera San Lorenzo (Acopio) (40%)
Mezcla II	Cantera de arcilla “El Nazareno” (65%) – Cantera San Lorenzo (Acopio) (35%)

Fuente: Trabajo de Investigación Cristobal (2015).

**Tabla 8.** Mezclas de suelo Aeródromo de Sepahua

Mezcla I	Cantera de arcilla “El Mirador” (70%) – Cantera Río Urubamba (30%)
Mezcla II	Cantera de arcilla “El Mirador” (65%) – Cantera Río Urubamba (35%)

Fuente: Trabajo de Investigación Cristobal (2015).

Cristobal (2015) indica: La trabajabilidad, según la norma técnica de estabilizadores químicos MTC E 1109-2004 se puede evaluar mediante la relación humedad densidad (Ensayo de proctor Modificado). (Cristobal, 2015).

Para el **aeródromo de San Lorenzo**, según Cristobal (2015): Para la **mezcla I**, el ensayo de Proctor del suelo natural alcanzó una MDS de 1.741 y un OCH de 16. El suelo natural + Terrasil en dosificación 0.5kg/m<sup>3</sup> + 1% de cemento portland alcanzó una MDS de 1.753 y un OCH de 17.8. El suelo natural El suelo natural + PROES en dosificación 0.30 L/m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.726 y un OCH de 17.8. El suelo natural + ISS en dosificación 3.0L/m<sup>3</sup> alcanzó

una MDS de 1.792 y un OCH de 16.7. El suelo natural + PERMAZYME en dosificación 1 L/20m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.74 y un OCH de 17.2. (Cristobal, 2015).

Y para la **mezcla II**, el ensayo de Proctor del suelo natural alcanzó una MDS de 1.712 y un OCH de 19.3. El suelo natural + Terrasil en dosificación 0.5kg/m<sup>3</sup> + 1% de cemento portland alcanzó una MDS de 1.707 y un OCH de 19.5. El suelo natural El suelo natural + PROES en dosificación 0.30 L/m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.715 y un OCH de 18.9. El suelo natural + ISS en dosificación 3.0L/m<sup>3</sup> alcanzó una MDS de 1.691 y un OCH de 19.5. El suelo natural + PERMAZYME en dosificación 1 L/20m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.727 y un OCH de 17.4. (Cristobal, 2015)

Para el **aeródromo de Sepahua**, según Cristobal (2015): Para la **mezcla I**, el ensayo de Proctor del suelo natural alcanzó una MDS de 1.816 y un OCH de 15.5. El suelo natural + Terrasil en dosificación 0.5kg/m<sup>3</sup> + 1% de cemento portland alcanzó una MDS de 1.816 y un OCH de 15.5. El suelo natural El suelo natural + PROES en dosificación 0.30 L/m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.796 y un OCH de 15.4. El suelo natural + ISS en dosificación 3.0L/m<sup>3</sup> alcanzó una MDS de 1.818 y un OCH de 15.2. El suelo natural + PERMAZYME en dosificación 1 L/20m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.792 y un OCH de 15.7. (Cristobal, 2015).

Y para la **mezcla II**, el ensayo de Proctor del suelo natural alcanzó una MDS de 1.832 y un OCH de 15.0. El suelo natural + Terrasil en dosificación 0.5kg/m<sup>3</sup> + 1% de cemento portland alcanzó una MDS de 1.831 y un OCH de 15.0. El suelo natural El suelo natural + PROES en dosificación 0.30 L/m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.806 y un OCH de 15.1. El suelo natural + ISS en dosificación 3.0L/m<sup>3</sup> alcanzó una MDS de 1.819 y un OCH de 14.9. El suelo natural + PERMAZYME en dosificación 1 L/20m<sup>3</sup> + 3% de cal alcanzó una MDS de 1.811 y un OCH de 15.5. (Cristobal, 2015)

Los resultados de C.B.R. y Ensayo de Compresión no Confinada de los suelos estabilizados tanto para el aeródromo de San Lorenzo, como para el de Sepahua que fueron determinados por Cristobal (2015), se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10 siguientes:

**Tabla 9.** Resultados de ensayos CBR y compresión no confinada Aeródromo San Lorenzo

Dosificación	Mezcla I	Mezcla II	Compresión no Confinada [Kg/cm <sup>2</sup> ] – ASTM 1633
	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	
Natural	9.6	9.5	-
Terrasil (0.5 kg/m <sup>3</sup> ) + (1%) Cemento	26.0	25.0	10.86
PROES (0.30 L/m <sup>3</sup> ) + Cal (3%)	7.2	7.2	11.12
ISS (3.0 L/m <sup>3</sup> )	12.1	11.4	6.06
Permazyme (01L por 20m <sup>3</sup> ) + Cal (3%)	26.9	24.1	10.04

Fuente: Trabajo de Investigación Cristobal (2015)

**Tabla 10.** Resultados de ensayos CBR y compresión no confinada Aeródromo Sepahua

Dosificación	Mezcla I	Mezcla II	Compresión no Confinada [Kg/cm <sup>2</sup> ] – ASTM 1633
	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	Compresión no Confinada [kg/cm <sup>2</sup> ] – ASTM 1633
Natural	16.2	18.3	-
Terrasil (0.5 kg/m <sup>3</sup> ) + (1%) Cemento	26.0	25.1	10.07
PROES (0.30 L/m <sup>3</sup> ) + Cal (3%)	19.0	19.7	12.17

ISS (3.0 L/m3)	26.0	22.2	9.68
Permazyme (01L por 20m3) + Cal (3%)	35.3	30.6	12.03

Fuente: Fuente: Trabajo de Investigación Cristobal (2015)

Cristobal (2015) recomendó utilizar para estabilizar suelos en la construcción de caminos rurales en la selva peruana al producto químico Terrasil; dio a conocer las ventajas técnicas, económicas y ambientales de este estabilizador, el cual consiste en el uso de un organosilano iónico, capaz de repeler el agua, eliminar el hinchamiento y la absorción de los suelos, logrando conseguir una mejora de cualquier tipo de suelo, al conseguir que el suelo se comporte en todo momento en condiciones “secas”, lográndose de esta manera establecer un sistema eficaz del suelo tratado. (Cristobal, 2015)

**Atarama (2015)**, en su tesis evaluó la estabilización de suelos arenos arcillosos, arcillas inorgánicas, y gravas arenosas mal graduadas en la mejora de la transitabilidad de caminos de bajo tránsito utilizando el estabilizador químico PROES (aceite sulfonado). El suelo natural en mención que, según la clasificación AASHTO es del tipo A-2-6 y A-1, tiene un índice de plasticidad promedio de 13%, humedad natural promedio de 16% y cuyos ensayos de C.B.R. arrojaron valores entre 5% y 30%; y para las gravas arenosas mal gradadas A-1 el CBR alcanzó valores pmedidos entre 33% y 95%.

Después del tratamiento con el aditivo PROES en una dosificación entre 0.20 lt/m<sup>3</sup> y 0.30 lt/m<sup>3</sup> y cemento portland entre 50 y 60 kg/m<sup>3</sup> se logró mejorar sustantivamente el valor de CBR, pues esta capacidad de soporte al 95% de la MDS y 0.1” alcanzó valores entre 116.4% y 129.9% (Atarama 2015).

Atarama (2015), en su evaluación consideró tanto la funcionalidad de la carretera, midiendo la rugosidad de la superficie de rodadura, para lo cual aplicó el Índice Internacional de Rugosidad (IRI); así como, la evaluación estructural, a través de las deflexiones de la base estabilizada. Demostró que el uso del estabilizador PROES mejora el CBR del suelo, uniformiza las características físicas y mecánicas del suelo tratado y mejora su CBR.

**Angulo y Rojas (2016)**, en su tesis sobre estabilización de suelos arenos arcillosos en Loreto, estudiaron la influencia en sus propiedades mecánicas del aditivo PROES. En su investigación al efectuar la clasificación, determinaron la presencia de suelos A-4(1), A-2(4) y A-7-5(9) en la subrasante de la carretera de penetración al Asentamiento Humano “El Milagro”, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas; propusiéndose a su estabilización utilizando el estabilizador químico PROES. Realizaron ensayos de clasificación de suelos, de Proctor Modificado y CBR tanto para los tipos de suelo natural existentes en esta vía como en un nuevo suelo resultante de la combinación de éstos y de la adición de distintos porcentajes del citado estabilizador en presencia de 2% de cemento portland, llegando a la conclusión que en estas condiciones, la adición de PROES en una proporción de 0.3 lt/m<sup>3</sup>, mejora considerablemente el CBR del “suelo natural combinado”, superándose su valor entre 233% y 352%, como se indica en la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13:

**Tabla 11.** Resultados de Ensayos CBR, MDS y OCH en Muestra: A-4(1).

<b>Combinación</b>	<b>C.B.R. al 95%</b>	<b>M.D.S.</b>	<b>O.C.H.</b>
A-4 (1) Natural	14.4%	1.922gr/cm <sup>3</sup>	11.74%
A-4(1) 2% de cemento	25.5%	1.922gr/cm <sup>3</sup>	11.74%
A-4 (1), 2% cemento, 0.3 lt/m <sup>3</sup> aditivo líquido (sumergido)	36.1%	1.922gr/cm <sup>3</sup>	11.74%
A-4(1), 2% cemento, 0.3 lt/m <sup>3</sup> aditivo líquido (curado)	43.2%	1.922gr/cm <sup>3</sup>	11.74%

*Fuente: Angulo y Rojas. 2016*

**Tabla 12.** Resultados de Ensayos CBR, MDS y OCH en Muestra: Combinación A-2(4) 85% y A-7-5(9) 15%

Combinación	C.B.R. al 95%	M.D.S.	O.C.H.
A-2 (4) y A-7-5(9) Natural	43.7%	1.964gr/cm <sup>3</sup>	11.09%
A-2(4) y A-7-5(9), 2% de cemento	74.0%	1.964gr/cm <sup>3</sup>	11.09%
A-2 (4) y A-7-5(9), 2% cemento, 0.3 lt/m <sup>3</sup> aditivo líquido	102.0%	1.964gr/cm <sup>3</sup>	11.09%

*Fuente: Angulo y Rojas. 2016*

**Tabla 13.** Resultados de Ensayos CBR, MDS y OCH en Muestra: A-4(1).

Combinación	C.B.R. al 95%	M.D.S.	O.C.H.
A-3 (0) y A-7-5(9) Natural	23.6%	1.768gr/cm <sup>3</sup>	13.54%
A-3(0) y A-7-5(9) 2% de cemento	72.0%	1.768gr/cm <sup>3</sup>	13.54%
A-3 (0) y A-7-5(9) 2% cemento, 0.3 lt/m <sup>3</sup> aditivo líquido.	83.0%	1.768gr/cm <sup>3</sup>	13.54%

*Fuente: Angulo y Rojas. 2016*

**Salas (2017)**, en su tesis “Estabilización de Suelos con Adición de cemento y aditivo Terrasil para el mejoramiento de la base del Km 11+000 al km 9+000 de la carretera Puno – Tiquillaca – Mañazo”, tuvo por objetivo principal “establecer las características físicas y mecánicas de los suelos de la cantera “Lumpoorcoo”, obteniendo un índice plástico (IP) promedio de 10.26%, densidad seca (Ds) de 1.65 gr/cm<sup>3</sup>, CBR al 100% de 39.58%, lo que según lo sugerido por el MTC son valores que clasifican al suelo como “regulares”; proponiéndose mejorar las características mecánicas con adición de cemento y aditivo Terrasil. Los resultados con adición de cemento con el 4% dieron resultados esperados como en el IP de 6.19%, Ds en 2.09 gr/cm<sup>3</sup> y CBR al 100% en 64.87%, y con la adición de Terrasil con 10gr. por kg de suelo en el IP de 6.74%, Ds de 1.99 gr/cm<sup>3</sup> y CBR al 100% de 61.37%; concluyendo que los suelos de la



cantera Lumpoorcoo son posibles estabilizarlos con adición de cemento y el aditivo Terrasil para lograr las exigencias del MTC.

Hidalgo, F. y Hidalgo, J. 2020, en su tesis “Estabilización química de sub rasantes de suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja. Aplicación de aditivos terrasil y proes en vía de acceso “Moralillos”, Loreto, 2018”, con relación al aditivo terrasil concluyeron: “Con aditivo Terrasil según la adición en los porcentajes propuestos tiene una variación de CBR al 95 % que en un 10% de edición del aditivo llega a una estabilización óptima, en cuanto al 15% de adición de aditivo el CBR al 95% baja estabilización óptima:” (Hidalgo, F. y Hidalgo, J., 2020).

Ñaupari (2021), en su investigación utilizó cal y aceite sulfonado en diferentes porcentajes, analizó el CBR, el óptimo contenido de humedad y la densidad máxima; y, para formular su propuesta de estabilización de una arena arcillosa de mediana plasticidad, cita a Hueso y Orellana (2009), quienes en su tesis “Guía Básica para estabilizaciones de suelo con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador”, concluyen: “La adición de cal disminuye considerablemente la plasticidad de los suelos, para este suelo en particular con el porcentaje óptimo de la cal (determinado bajo la norma ASTM D 6276), además se reduce esta propiedad a cero (0), provocando un considerable cambio en su granulometría y de igual manera en su clasificación, pasando de un suelo arcilloso (CL) a ser un suelo limoso (ML)”.

Ñaupari (2021) en su tesis llegó, entre otras, a las siguientes conclusiones:

- “Se determinó que el suelo natural, según la clasificación SUCS es un “SC” Arena arcillosa de mediana plasticidad, y según la

clasificación AASHTO se encuentra en el grupo “A-6” suelos arcillosos, terreno de fundación de regular a malo” (Ñaupari, 2021).

- “(...) que la adición de 2%, 4% y 6% de cal y 1%, 2% y 3% de aceite sulfonado, influyen en la mejora de la máxima densidad seca, en la reducción del óptimo contenido de humedad y en el aumento en el índice de resistencia del suelo CBR”.

## **1.2 Bases teóricas**

### **1.2.1 Origen de los suelos**

“La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas, en cuyo proceso experimentan desintegración física y descomposición química”. (Vásquez y Marín, 2020). “Los suelos que provienen de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas presentan características diferentes si la alteración es física o química; así, cuando el efecto alterativo de las rocas se lleva a cabo por un medio físico se produce un suelo con la misma composición de ellas (Crespo, 2007)”. (Vásquez y Marín, 2020)

Esta fragmentación continua, debida a los agentes físicos como el sol que causa expansiones y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor, el agua, corrientes de aguas de los ríos, olas oceánicas, hielo glacial, acción de la congelación y descongelación, el viento y otras fuerzas de los glaciares, es un mero cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica (Jara, 2014); (Muelas s.f.) (Vásquez y Marín, 2020). “Por otra parte, la meteorización química de una roca para dar origen al suelo, es un proceso de descomposición, mediante el cual los minerales

constitutivos de las rocas madre cambian su constitución mineralógica de él debido principalmente a los agentes químicos, como la oxidación, carbonatación, y la hidratación. (Crespo, 2007)". (Vásquez y Marín, 2020)

En la descomposición química, los minerales persistentes se transforman en minerales de composición y propiedades físicas diferentes, proceso éste, donde la desintegración física completa la descomposición, pues los minerales y partículas rocosas de menor tamaño resultantes de la meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que los granos minerales firmemente soldados en roca compacta (Muelas s.f.); (Jara, 2014). (Vásquez y Marín, 2020).

Entre los distintos procesos de meteorización química de las rocas madre pueden citarse: la hidratación (paso de anhidrita a yeso), disolución (de los sulfatos en el agua), la oxidación (de minerales de hierro expuestos a la intemperie), la cementación (por agua conteniendo carbonatos), etc., (Jara, 2014). Así, la meteorización química de los feldespatos puede producir minerales arcillosos (Muelas s.f.). La meteorización química, también, se encuentra muy relacionada con la meteorización biológica, producida fundamentalmente por la actividad bacteriana, que origina putrefacciones en materiales orgánicos. (Muelas s.f.), (Vasquez y Marín, 2020).

La acción conjunta o individual de los factores generadores del proceso de meteorización puede graficarse en un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad. "En este perfil la roca sana ocupa la zona más profunda, transformándose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial. (Muelas s.f.)". (Vásquez y Marín, 2020). "Así, por ejemplo, la observación de una trinchera recién abierta (una excavación para una carretera, una

pared de cantera, etc.), a menudo revelará una sucesión de capas de diferentes materiales térreos". (Vásquez y Marín, 2020).

Generalmente, en la base de un afloramiento y aun en su lugar de origen se encuentra roca compacta denominada "roca firme", la cual se halla relativamente poco modificada. Si la roca firme sufrió esfuerzos asociados a procesos tectónicos, suele presentar innumerables grietas, denominadas juntas o diaclasas; y, si éstas se encuentran configurando familias de juntas que se cruzan, se espera que la roca se desintegre, fácilmente, en bloques. Por encima de la roca firme puede haber una capa de materia mineral blanda, denominada regolita o "manto". (Vásquez y Marín, 2020). "La regolita puede formarse in situ por descomposición y desintegración de la roca firme inmediatamente subyacente; a este tipo de suelo se denomina regolita residual o suelo residual. Si esta capa de partículas minerales relativamente sueltas o blandas, dispuestas sobre la roca firme, es transportada por agentes tales como corrientes de agua, hielo, viento, olas, recibe el nombre de regolita transportada o suelo sedimentario (Muelas s.f.)" (Vásquez y Marín, 2020).

Entonces, los suelos pueden ser residuales o transportados, según se les encuentre en el mismo lugar en que se han generado o en lugar diferente. El transporte por aire y agua y la sedimentación en esos dos medios constituyen el mecanismo usual que da lugar a un suelo transportado. Es evidente que la estructuración y la "distribución interna" de las propiedades tienen que ser completamente diferentes en un suelo residual que en un suelo transportado (Juárez y Rico, 2001). En los suelos residuales, el ataque mecánico y la desintegración química tienden a producir un resultado final que en estructura y disposición recuerda, aunque sea lejanamente, a la roca madre; pero, los suelos transportados y

depositados en aire o agua generan estructuras que están regidas únicamente por los mecanismos propios de la deposición y en nada por la disposición, características y condiciones iniciales de la roca original, condiciones éstas que se valora muy poco en la práctica de la Mecánica de los Suelos (Juárez y Rico, 2001). En una medida sin duda mayor que lo deseable, la Mecánica de Suelos actual se refiere sobre todo a los suelos transportados. Empezó por el interés que plantearon diversos problemas de índole general e importante, sobre todo del tipo de cimentaciones en ciudades grandes y con subsuelos particularmente difíciles; se desarrolló por las ideas que fueron surgiendo de los laboratorios y de las experiencias de campo de quienes afrontaban tales problemas. En general, tales ciudades catalizadoras del interés por la Mecánica de Suelos existen en valles o planicies de costa, en los que, por razón natural, los suelos son transportados y no residuales, más propios de zonas onduladas o montañosas; y, como consecuencia, se estudiaron sobre todo suelos transportados y se fueron conociendo sus propiedades, que a menudo se confundieron con las propiedades de los suelos en general, aun cuando lógicamente las de los suelos residuales hayan de ser diferentes. (Juárez y Rico, 2001).

### **1.2.2 Suelos residuales**

“Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan in situ. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de descomposición, se produce una acumulación de suelo residual. Entre los factores que influyen sobre la velocidad de alteración en la naturaleza de los productos de meteorización están el clima (temperatura y lluvia), el tiempo, la naturaleza de la roca original, la vegetación, el drenaje y la actividad bacteriana. Los suelos residuales suelen ser más

abundantes en zonas húmedas, templadas, favorables al ataque químico de las rocas y con suficiente vegetación para evitar que los productos de meteorización sean fácilmente arrastrados. (Muelas s.f.)” (Vásquez y Marín, 2020).

“En el Perú, los suelos tropicales en un gran porcentaje son de tipo saprolíticos, esto es, suelos arcillosos mezclados con limo y arena, principalmente. Algunos resultados de ensayos de resistencia al cortante efectuadas en estos suelos indican valores muy dispersos; sin embargo, se ha encontrado que la prueba de la veleta practicada en los suelos saprolíticos que se encuentran muy fisurados, la medida de la resistencia al corte sin drenaje efectuada en el campo arroja siempre valores mucho más confiables que las ensayos de laboratorio, comprobándose que estos valores son mucho más altos en casi todos los casos que los obtenidos por otros medios, siendo el límite más bajo los resultados de los ensayos triaxiales rápidos y los más próximos los resultados de los ensayos de Compresión-No-Confinada, quizás debido a la descompresión que sufren estos suelos al ser obtenidos en profundidad y a la alteración de los especímenes con el manipuleo, o los efectos de la succión en los suelos parcialmente saturados que hacen variar su resistencia al cortante”. (Carrillo-Gil, 1978).” (Vásquez y Marín, 2020).

“Carrillo-Gill (2016), al tratar sobre la estabilización con cal de suelos residuales en la selva baja peruana, señaló: “De la investigación llevada a cabo con fines de estabilización con cal para algunos suelos saprolíticos de la amazonia peruana que permanentemente presentan contenidos, de humedad natural mucho mayores que el óptimo de compactación, se han encontrado algunos resultados de laboratorio para especímenes que presentan portancia tan baja como CBR de 1% a 5% en promedio, y que al

mezclarse con cal se obtiene un aumento substancial en el valor del CBR para diferentes tiempos de curado, probablemente debido al desarrollo de la reacción puzolánica en el suelo, estableciéndose que con 5% a 6% de cal hidratada en peso es posible obtener un mínimo de 15% de CBR como resistencia inicial para las arcillas saprolíticas de la selva baja, y si se continua el curado, se encontró que después de un buen tiempo el CBR aumentó considerablemente llegando hasta valores mayores del 29% en 140 horas (Carrillo-Gil, et al, 1993). En la mayoría de los casos, la adición de 5%, a 6% de cal hidratada fue suficiente para lograr resistencias adecuadas para el diseño de pavimentos de carreteras, calles y aeródromos para aviones medianamente pesados que normalmente hacen servicio en las áreas selváticas del Perú”. (Vásquez y Marín, 2020).

### **1.2.3 Suelos sedimentarios**

“La formación de los suelos sedimentarios puede explicarse más adecuadamente considerando la formación, el transporte y el depósito de los sedimentos. (Muelas s.f.). El modo principal de la formación de sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. En general, las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización física de las rocas, mientras que las partículas arcillosas proceden de la alteración química de las mismas. (Muelas s.f.)”. (Vásquez y Marín, 2020).

“Los sedimentos pueden ser transportados por cualquiera de los cinco agentes siguientes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos. (Muleas s.f)” (Vásquez y Marín, 2020). El transporte de los suelos, o bien modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución; o,

produce una gradación de las partículas según su diámetro (Muelas s.f), (Vásquez y Marín, 2020).

Después de que, las partículas se han formado y han sido transportadas se depositan o acumulan para formar un suelo sedimentario. “Las tres causas principales de este depósito en el agua son la reducción de la velocidad, la disminución de la solubilidad y el aumento de electrolitos. Cuando una corriente de agua desemboca en un lago, océano, etc., pierde la mayor parte de su velocidad. Disminuye así la fuerza de la corriente y se produce una sedimentación. Cualquier cambio en la temperatura del agua o en su naturaleza química puede provocar una reducción en la solubilidad de la corriente, produciéndose la precipitación de algunos de los elementos disueltos. (Muelas s.f)”. (Vásquez y Marín, 2020)

“Según Muelas s.f. los suelos se caracterizan fundamentalmente por los siguientes aspectos:

- Los suelos están formados por partículas pequeñas (desde micras hasta algunos centímetros) e individualizadas que pueden considerarse indeformables.
- Entre estas partículas quedan poros con un volumen total del orden de magnitud del volumen ocupado por ellas (desde la mitad a varias veces superior).
- Un suelo en particular, es un sistema multifase (sólida, líquida y gaseosa).
- Los poros pueden estar llenos de agua (suelos saturados), o con aire y agua (suelos semisaturados), lo que condiciona la respuesta de conjunto del material.
- En condiciones normales de presión y temperatura, el agua se considera incompresible. (Muelas s.f)”. (Vásquez y Marín, 2020).



#### 1.2.4 Humedad de los suelos

Las propiedades de los suelos cambian sustancialmente, por el agua de absorción que contienen. Un tipo especial de agua de absorción lo constituyen las aguas capilares que se desplazan siempre de la parte húmeda del suelo a la seca cuando ambas están en contacto. (Salas, 2017). El movimiento capilar de desplazamiento de aguas libres dentro del suelo es, generalmente, en sentido vertical ascendente, aunque puedan moverse en una dirección cualesquiera. En arcillas, el agua puede elevarse lentamente hasta alturas considerables, por su parte en las arenas el agua capilar se traslada sólo algunas pulgadas, pero lo hace muy rápidamente. El agua capilar puede trasladarse también de una masa de suelo saturada por completo, si ésta ofrece una cara expuesta a la intemperie de modo tal que su contenido de agua pueda evaporarse, como en el caso de las tierras de excavaciones continuas (tierras empuentadas), en las que el agua capilar se desplaza continuamente desde la parte saturada para remplazar el agua que se pierde por evaporación superficial. (Salas, 2017)

“La causa de la fuerza que “tira” del agua capilar puede explicarse, de manera elemental, por la acción de la tensión superficial del agua y por la fuerza de tracción del menisco. *La hipótesis de la tensión superficial* presupone que una delgadísima capa, la más alta (una membrana) de cualquier líquido, se extiende sobre él en todas las direcciones, a la manera de un guante muy ajustado sobre una mano. Si el menisco tiene la forma de una media esfera, la tensión superficial actúa en dirección ascendente en su periferia y tira del agua hacia arriba. Lo que se acaba de exponer es solo una “hipótesis de trabajo”, puesto que la verdadera causa del movimiento capilar no puede considerarse como establecida” (Juárez y Rico, 2001)”. (Salas, 2017). “*La hipótesis del potencial*

*capilar* se basa en una analogía de la fluencia capilar con respecto a la del calor o de la electricidad. El potencial capilar se mide por la altura  $h$  de la columna de agua trasladada” (Juárez y Rico, 2001)”. (Salas, 2017). “*La teoría de la libre energía* afirma que la materia posee energía libre (o disponible) y que dos o más sistemas de sus energías libres unitarias; de otro modo, se inicia un movimiento que parte del sistema que posee un valor mayor de energía libre unitaria y se dirige hacia el sistema que lo tiene menor. Por ejemplo, el agua posee mayor energía libre que una masa de suelo húmedo, de aquí el movimiento capilar que parte de la superficie libre del agua en dirección al suelo húmedo en contacto con tal superficie” (Juárez y Rico, 2001)” (Salas, 2017).

En una masa de tierra propiamente dicha, no existen canales rectos, pero el agua capilar se desplaza a través de una intrincada red de poros. Cuando la humedad capilar invade un suelo seco y en polvo, las partículas son retenidas, con firmeza unas contra las otras por una fuerza de compresión generalizada, a la que se le denomina presión capilar. “Cuanto más finos son los poros, tanto mayor es la fuerza de atracción del menisco y tanto mayor será la presión capilar. O, dicho de otro modo, cuanto más delgada son las películas capilares que rodean las partículas del suelo, tanto más intensa es la presión capilar. Cuando se seca un terrón de arcilla, las películas capilares se adelgazan y la arcilla se endurece” (Juarez y Rico, 2001) en (Salas, 2017).

El contenido de humedad se determina en los laboratorios de Mecánica de Suelos aplicando métodos debidamente estandarizados; y en las investigaciones de suelos, en el propio terreno se identifican aquellos como secos, húmedos, empapados y saturados y en la práctica se los estima por inspección visual y por el tacto (Juárez y Rico, 2001).

## **1.2.5 La Mecánica de los Suelos y la construcción de carreteras**

### **1.2.5.1 El terreno de fundación en la construcción de carreteras**

En el proceso de construcción de carreteras, los suelos son muy variados, no presentan un patrón de distribución y el tratamiento de sus características naturales para su uso o como terreno de fundación o como material es de una complejidad muy grande, que hacen imposible la división en tramos homogéneos; y, cualquier intento de sistematización científica, acompañado de la correspondiente tendencia generalizadora, debe ir precedido por otro, en que se procure clasificar a los suelos del modo más completo posible y para la interpretación de los resultados se recurra a la experiencia de los “viejos camineros”. Asimismo, por lo general se presentan problemas de asentamientos por deficiente capacidad de soporte y escasas o inexistencia cercana de canteras de materiales apropiados para su reemplazo que obligan al ingeniero a su mejoramiento.

#### **1.2.5.1.1 Asentamiento en el terreno de fundación**

Posiblemente el problema mas grave que entraña un suelo fino y compresible que constituye cimentación de una vía, es el que se refiere a los asentamientos por su pobre capacidad de soporte al recibir la sobrecarga que representan los terraplenes. Dichos asentamientos causan:

- 1) Pérdida de bombeo de la carretera, pues la presión ejercida por el terraplen es mayor, bajo el centro de la corona, que bajo los hombros.

- 2) Aparición de asentamientos diferenciales en el sentido longitudinal de la vía, por heterogeneidad de materiales y correspondientes diferentes cedimientos en el terreno de fundación; generando perjuicios, por encalaminado de la superficie lo cual a la vez acarrea fallas en el drenaje superficial, y en la funcionalidad de la vía.
- 3) Disminución en la altura inicial del terraplen, al adecuarse al hundimiento, lo cual es grave cuando se atraviesan zonas inundables o inundadas.
- 4) Perjuicios en el comportamiento de obras de drenaje y sub drenaje, que ante la presencia de hundimientos mayores en el centro que en los extremos, tienden a deformarse y adquieren una conformación hidráulicamente inconveniente y se agrietan o no funcionan.
- 5) Agrietamientos en la corona del terraplen, especialmente cuando ésta es muy ancha y cuando el terraplen tiene bermas.
- 6) Pérdida de la configuración apropiada de la transición entre los terraplenes de acceso y las estructuras, cuando éstas tienen cimentación profunda (pilotes, u otro tipo) y, no participan del asentamiento general.

Resulta muy difícil estimar cual pueda ser el orden de asentamiento permisible que se deba considerar en una vía terrestre construida sobre suelos blandos; sin embargo, si este asentamiento fuera igual en un tramo largo, el problema no sería significativo en comparación con los asentamientos diferenciales, excepto en ciertos casos, tales como terraplenes de acceso a estructuras rígidas o en zonas inundables, correspondiendo al ingeniero definir los valores admisibles en cada caso particular, partiendo de la importancia del problema y de cualesquiera otras consideraciones (Montejo, 1982).

#### **1.2.5.1.2 Mejoramiento del terreno de fundación**

El asentamiento del terreno es manifestación del proceso de consolidación, por ello todos los procedimientos que aceleren esta última servirán tanto para que aquella se produzcan con mayor rapidez y en consecuencia, se acelere a la vez, la resistencia al esfuerzo cortante, buscándose su ocurrencia durante el periodo de construcción, con lo que la estructura permanecería prácticamente libre del problema durante su vida de servicio.

Ante la problemática de asentamientos, si el terreno de fundación es de tal naturaleza que no garantiza su capacidad resistente o de respuesta frente a la compresibilidad debido a las presiones que transmite la estructura del terraplen, aun siendo éstas relativamente bajas, se suele utilizar algunos de los siguientes métodos de mejoramiento de las condiciones del terreno natural, basados en la granulometría, plasticidad y textura del suelo y factores climáticos, que es de práctica de la construcción caminera:

- 1. Uso de materiales ligeros:** Buscar en el entorno, dentro de distancias de acarreo tolerables, canteras de materiales de bajo peso específico para la construcción de los terraplenes, con el objetivo de reducir tanto las presiones comunicadas al terreno natural, y la geometría del talud de la sección transversal de la plataforma.
- 2. Sobre elevación de la rasante: Sobreelevar la rasante** inicial del terraplen, de manera que quede en el nivel requerido después de producirse el asentamiento,

sopesándose la capacidad del terreno natural para soportar la sección sobre elevada.

3. **Construcción previa de terraplenes:** Construir el terraplen con suficiente anticipación a las obras de conformación de la corona de rasante o pavimentación, permitiendo que ocurra el asentamiento y la consolidación del terreno natural durante ese periodo. La solución, aunque es limitada por el plazo de ejecución, es muy ventajosa sobre todo en construcción de accesos y pasos a desnivel.
  
4. **Uso de drenes verticales de arena:** Son perforaciones verticales rellenas de material permeable, de pequeño diámetro y de longitud suficiente para que sus efectos alcancen a la totalidad del manto compresible o, por lo menos, al espesor que vaya a producir la mayor parte del asentamiento. Los drenes verticales de arena constituyen un acelerador de los procesos de consolidación, cuya influencia en éstos puede ser establecida teóricamente.

“Su función se ejerce disminuyendo la longitud de las trayectorias que el agua debe recorrer para ser drenada de los estratos compresibles que se consoliden; esto se logra al permitirse el flujo en la dirección horizontal, además del flujo vertical usual. Como la mayoría de los suelos arcillosos finos son algo estratificados, de manera que la permeabilidad horizontal es más grande que en la dirección vertical, el flujo radial hacia los drenes verticales de arena es en principio, muy eficiente. Los drenes se instalan introduciendo en el terreno un tubo de ademe del que después se extrae el suelo y que debe recuperarse por

razones de costo, extrayéndolo a medida que se rellena de arena el espacio interior, o por medio de un mandril o broca apropiada, que haga una perforación cuyas paredes se sostengan al retirar la herramienta, por lo menos el tiempo necesario para rellenar el hueco con la arena que funciona como material drenante. Naturalmente el Segundo método suele ser de menor costo que el primero, pero no siempre es aplicable, pues en suelos muy blandos o duros no se sostienen las paredes de pozos relativamente profundos. No se ha estudiado, suficientemente, el efecto que los drenes verticales de arena pudieran tener sobre la resistencia del estrato compresible, por ejemplo al deslizamiento, al actuar como verdaderos pilotes de arena. El uso de los drenes verticales de arena suele ser costoso, sobre todo en países en que no exista la maquinaria especializada para su construcción con que es posible contar en la actualidad; por consiguiente, su utilización no puede recomendarse sin un cuidadoso estudio de su idoneidad y una completa consideración económica de otras alternativas” (Salas, 2017).

- 5. Compensación total o parcial de la carga del terraplén:** Se logra cuando al penetrar el material del terraplén desplaza lateralmente al suelo de fundación blando, (suelo arcilloso orgánico o turba), lo cual producirá una compensación del peso de aquel, que actuará únicamente con una presión correspondiente a la diferencia entre el peso del material colocado y el desplazado.
- 6. Remoción del material compresible:** Remover el material compresible y sustituirlo por otro en lo posible granular,

para garantizar a la vez su drenaje. Se considera la mejor solución en suelos muy blandos y compresibles, que se presentan bajo los terraplenes en espesores no mayores que 4 o 5 m, espesores superiores incrementan sustancialmente los costos.

- 7. Tratamiento físico-químico del suelo compresible:** Al añadir ciertas substancias al suelo se producen en éste intercambios iónicos entre sus partículas minerales y las materias disueltas en el agua intersticial, de manera que se modifican los nexos estructurales, mejorando la resistencia del suelo y disminuyendo su compresibilidad, lo cual obliga a realizar análisis físico-químicos del suelo y del agua.
  
- 8. Calcinación del suelo:** Este Método aún en experimentación, consiste, literalmente hablando, en calcinar la estructura del suelo, con elevadas temperaturas provenientes de la combustión de gases. En algunos casos se han reportado disminuciones notables de la compresibilidad y, por consiguiente, de los asentamientos (Montejo, 2006).
  
- 9. Colocación de entramados de ramas o fustes de árboles:** Al colocar estos elementos aún en estado verde bajo el terraplen se logra conformar una verdadera balsa bajo el terraplen, que reparte la carga y proporciona una especie de flotación al conjunto de la superestructura. El método se ha usado con excelentes resultados en la selva Peruana, en la construcción de accesos para la explotación petrolera.
  
- 10. Colocación de bermas o taludes muy tendidos:** Su



construcción se los usa para lograr uniformizar las presiones transmitidas al terreno bajo el terraplen, con lo que se uniformizan también los asentamientos, reduciendo los diferenciales; sin embargo, como el asentamiento total es mayor cuanto mayor es el ancho del área cargada, la bondad de estas medidas estará supeditada al balance que se efectúe de estos factores contradictorios.

**11. Escalonamiento de laderas naturales:** Los escalones, de huella horizontal y peralte vertical, proporcionan al terraplen apoyo horizontal cuando toda su sección se aloja en terreno firme, eliminando la componente de su peso a lo largo de la superficie de contacto con el terreno natural y, por lo tanto, la causa de la posible falla cuando su pendiente transversal sea fuerte y permita al terraplen deslizarse ladera abajo.

**12. Construcción de rellenos sobre apoyo irregular en roca:** Al hacer cortes en roca es muy común que, como consecuencia del proceso de excavación con explosivos, la cama del camino quede ríspida y llena de aristas irregulares y agudas que debe ser nivelada por una capa de suelo de suficiente espesor y apropiada resistencia, para impedir que las irregularidades señaladas se reflejen en el pavimento propiamente dicho (Montejo, 2006).

Este es uno de los casos ilustrativos de aquellos en que el mejoramiento del terreno consiste en la substitución de un apoyo muy firme por otro de suelo, aparentemente de peor calidad. Los problemas de interacción entre superestructura y terreno de cimentación en una obra vial son tan complejos que con frecuencia la norma de

mejoramiento adoptada es contradictoria, en el sentido de que resulta desventajosa desde uno o varios de los puntos de vista que intervienen; lo importante es entonces resaltar el aspecto fundamental que se pretende mejorar, balanceando convenientemente las virtudes y defectos de la norma de mejoramiento adoptada (Montejo, 2006).

**13. Compactación:** Donde el suelo natural lo permita, se debe mejorar la parte superior del terreno de cimentación con un proceso de compactación posterior al desmote, deshierbe y desenraizado. El tratamiento es frecuente, sobre todo en aeropistas, y suele ser somero, alcanzando 85 a 90%, en relación a cualquier estándar usual (Salas, 2017).

**14. Anclaje de bloques de roca fracturada:** En laderas rocosas inclinadas y cuando los planos de fracturamiento son desfavorables a la obra vial, se ha recurrido al anclaje de los bloques de roca con varillas de acero introducidas en perforaciones previas selladas posteriormente con concreto o lechada de cemento, de modo que literalmente se cosen los fragmentos cuya situación sea peligrosa (Montejo, 2006).

**15. Relleno de grietas:** Cuando la superficie del terreno de cimentación aparezca agrietada deberá investigarse y eliminarse la causa del agrietamiento, pues el fenómeno puede ser indicio tanto de la existencia de un estado de falla incipiente relativamente fácil de corregir, por ejemplo en una ladera inclinada, como de un verdadero estado de deslizamiento superficial generalizado o de un estado de tensión importante. Podría haber casos en que el cambio de trazo constituya la mejor solución, pues el agrietamiento puede estar asociado a fenómenos de gran escala y

corrección difícilísima y muy costosa; pero en los casos sencillos, una vez eliminada la causa del agrietamiento puede resultar muy conveniente rellenar las grietas, previamente formadas con arcilla, suelo-asfalto o algún material similar, con características plásticas. Las grietas abiertas pueden ser peligrosas; pues, al rellenarse de agua generan empujes hidrostáticos que pueden agravar cualquier tendencia a la inestabilidad preexistente. (Montejo, 2006).

#### **1.2.5.2 Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito**

Las Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, conforman el mayor porcentaje del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC), caracterizadas por tener una superficie de rodadura de material granular y son recorridas generalmente por un volumen menor de 50 vehículos por día y que muy pocas veces llegan hasta 200 vehículos por día.

“Las carreteras de bajo volumen de tránsito se estructuran como carreteras de bajo costo. Consecuentemente, tienen alineamientos de diseño que evitan excesivos movimientos de tierra, considerando estructuras y obras de arte, por lo general diseñadas para períodos de vida útil, de corto y mediano plazo; con capas de revestimiento granular afirmados y, en general, con características que disturban lo menos posible la naturaleza del terreno” (MTC, 2008).

“El estudio determinará las características geológicas del terreno a lo largo del trazo y las canteras de materiales, definiendo las unidades estratigráficas considerando las características geológicas más destacadas tanto de rocas como de suelos y el

grado de sensibilidad o la pérdida de estabilidad en relación a la obra a construir” (MTC, 2008).

**Tabla 14.** Características básicas para la superficie de rodadura de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito

Tipo CBVT	IMD Proyec.	Ancho de Calzada (m)	Estructuras y Superficie de Rodadura
T3	101-200	2 carriles 5.50-6.00	Afirmado (material granular, grava de tamaño máximo 5 cm homogenizado por zarandeado o por chancado) con superficie de rodadura adicional (min. 15cm), estabilizada con finos ligantes u otros; perfilado y compactado
T2	51-100	2 carriles 5.50-6.00	Afirmado (material granular, grava de tamaño máximo 5 cm homogenizado por zarandeado o por chancado) con superficie de rodadura Tamaño máximo 5cm); perfilado y compactado, min. 15cm
T1	16-50	1 carril(*) o 2 carriles 3.50-6.00	Afirmado (material granular, grava de tamaño máximo 5 cm homogenizado por zarandeado o por chancado) con superficie de rodadura Tamaño máximo 5cm); perfilado y compactado, min. 15cm.
T0	<15	1 carril (*) 3.50-4.50	Afirmado (tierra) en lo posible mejorada con grava seleccionada por zarandeo, perfilado y compactado, min. 15 cm.
Trocha carrozable	IMD Indefinido	1 sendero (*)	Suelo natural (tierra) en lo posible mejorado con grava natural seleccionada, perfilado y compactado

**Fuente:** Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito; p.7.

(\*) Con plazoletas de cruce, adelantamiento o volteo cada 500-1000m; mediante regulación de horas o días, por sentido de uso.

(\*\*) En caso de no disponer gravas en distancia cercana a la carretera pueden ser estabilizada mediante técnicas de estabilización suelo-cemento o cal o productos químicos u otros.

#### **1.2.5.2.1 Suelos y capas de revestimiento granular**

Según MTC (2008), las carreteras por sus capas superiores y superficie de rodadura pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

##### **i) Con superficie de rodadura no pavimentada**

- a) Carreteras de tierra constituidas por suelo natural y mejorado con grava seleccionada por zarandeo.
- b) Carreteras gravosas constituidas por una capa de revestimiento con material natural pétreo sin procesar, seleccionado manualmente o por zarandeo, de tamaño máximo de 75 mm.
- c) Carreteras afirmadas constituidas por una capa de revestimiento con materiales de cantera, dosificadas naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo 25mm.
  - c.1. afirmados con gravas naturales o zarandeadas.
  - c.2. afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado.
- d) Carreteras con superficie de rodadura estabilizada con materiales industriales:
  - d.1. Afirmados con grava con superficie estabilizada con materiales como: asfalto (imprimación reforzada), cemento, cal, aditivos químicos y

otros.

- d.2. Suelos naturales estabilizados con: material granular y finos ligantes, asfalto (imprimación reforzada), cemento, cal, aditivos químicos y otros.

**ii) Con superficie de rodadura pavimentada**

- e) Pavimentos de adoquines de concreto;
- f) Pavimentos flexibles:
  - f.1. Con capas granulares (sub base y base drenantes) y una superficie bituminosa de espesor de hasta 25mm (tratamiento superficial bicapa).
  - f.2. Con capas granulares (sub base y base drenantes) y una capa bituminosa de espesor variable > 25mm (carpetas asfálticas).
- g) Pavimentos semi rígidos, conformados con solo capas asfálticas (full depth).
- h) Pavimentos rígidos, conformado por losa de concreto hidráulico de cemento Portland.

“Para los propósitos del manual en mención, son aplicables a las carreteras de bajo volumen de tránsito, no pavimentadas, los tipos a, b, c y d”. (MTC, 2008)

El manual considera soluciones estructurales con materiales tradicionales cuyas propiedades mecánicas y comportamiento son conocidos y están considerados en las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito. También forman parte de esta Norma *las estabilizaciones y mejoramientos de suelos de la subrasante o de las capas de revestimiento granular* (MTC,

2008).

“Para la estabilización química de los suelos se utilizará la Norma Técnica de Estabilizadores Químicos MTC E 1109-2004” (MTC, 2008).

“En el funcionamiento estructural de las capas de revestimiento granular influye el tipo de suelo de la subrasante, el número total de los vehículos pesados por día o durante el período de diseño, incluido las cargas por eje y la presión de los neumáticos” (MTC, 2008).

“La demanda, medida en EE o por vehículos pesados, es particularmente importante para ciertos tipos de carreteras de bajo volumen pero que pudieran tener alto porcentaje de vehículos pesados como los que se construyen para propósitos especiales como el minero y forestal (extracción de madera)” (MTC, 2008).

### **1.2.5.3 Subrasante de carreteras y materiales apropiados para su coronación**

#### **1.2.5.3.1 Subrasantes**

Subrasante es la capa superficial de terreno natural, cuya función principal es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación. Se le considera como la cimentación del pavimento y es la capa del suelo bajo la estructura del pavimento, preparada y compactada como fundación para el pavimento. (MTC, 2005). Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las

características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima (MTC, 2008). Para construcción de carreteras se analizará hasta 0.45 m de espesor, y para rehabilitación los últimos 0.20 m.

Se identifican cinco categorías de subrasante como muestra la Tabla 15:

**Tabla 15.** Categoría de la Subrasante según su CBR indicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones- MTC

Nombre	Subrasante	CBR
<b>SO</b>	Muy Pobre	<3%
<b>S1</b>	Pobre	3%-5%
<b>S2</b>	Regular	6%-10%
<b>S3</b>	Buena	11%-19%
<b>S4</b>	Muy Buena	>20%

*Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones- MTC, 2013.*

#### 1.2.5.3.2 Materiales apropiados para coronación de subrasantes

Se considerarán como materiales apropiados para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor, se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y en su reemplazo se colocará un material granular con CBR mayor a 6%, para su estabilización. La profundidad mínima especificada de esta capa figura en el catálogo de estructuras de capas granulares que se presenta más adelante. Igualmente se estabilizarán las zonas húmedas locales y áreas blandas. Sobre la subrasante natural se colocará una capa de arena de espesor 0.20m mínimo y sobre ésta, se añadirá una capa de espesor mínimo de 0.30m de



material grueso rocoso o de piedras grandes (MTC, 2008)

La superficie de la subrasante debe quedar encima del nivel de la napa freática como mínimo a 0.60 m cuando se trate de una subrasante muy buena y buena; a 0.80 m cuando se trate de una subrasante regular; a 1.00 m cuando se trate de una subrasante pobre y a 1.20 m cuando se trate de una subrasante muy pobre. En caso necesario, se colocarán subdrenes o capas anticontaminantes y/o drenantes o se elevará la rasante hasta el nivel necesario. Los subdrenes para proteger la capa de afirmado se proyectarán cuando la subrasante no esté constituida por material permeable y cuando las capas de rodadura no puedan drenar adecuadamente. Los subdrenes que se proyecten para interceptor filtraciones o para rebajar el nivel freático elevado, pueden utilizarse también para drenar el afirmado (MTC, 2008).

El espesor total determinado, está compuesto por una capa de afirmado, por la granulometría del material y aspectos constructivos, el espesor de la capa de afirmado no será menor de 150mm (MTC, 2008). Se podrán ajustar las secciones de afirmado en función de las condiciones y experiencias locales, para lo cual:

- Se analizará las condiciones de la subrasante natural, la calidad de los materiales de las canteras, la demanda específica de tráfico en el tramo y se decidirá el espesor necesario de la nueva estructura de la capa granular de rodadura.
- En caso de que el tramo tenga ya una capa de afirmado, se aprovechará el aporte estructural de la capa existente. Sólo se colocará el espesor de afirmado necesario para

completar el espesor total obtenido según la metodología de diseño empleada. Este espesor complementario no será menor a 100 mm. El nuevo material de afirmado se mezclará con el existente hasta homogenizarlo y conformar la nueva capa de afirmado, debidamente perfilada y compactada.

- Para carreteras de muy bajo volumen de tránsito, menor a 50, se estudiarán y analizarán diferentes alternativas constructivas de capas granulares, incluyendo macadam granular, y estabilización con gravas.
- En el caso de no haber disponibilidades de gravas de fácil uso a distancias económicamente razonables, se podrá recurrir a procedimientos *de estabilización de los suelos naturales*, analizando económicamente alternativas como estabilización con cal, estabilización con sal, estabilización con cemento, estabilización química (según norma MTC E 1109), según sea el caso.
- En caso de que se requiriese proteger la superficie de las carreteras afirmadas para retardar su deterioro por razones de erosión y pérdidas de material, debido al tránsito y/o para evitar la presencia de polvo levantado por el tránsito que crea riesgos y deteriora el ambiente agrícola, podrá colocarse una capa protectora que podría ser una imprimación reforzada bituminosa o una capa superficial de afirmado con mayor índice de plasticidad que reemplazaría un espesor similar del afirmado diseñado o una estabilización con cloruros de sodio, de magnesio, u otros estabilizadores químicos.

Jara (2014), en su trabajo de tesis sobre “Efecto de la cal como

estabilizante de una sub rasante de suelo arcilloso” haciendo referencia a Juárez y Rico (2005), manifiesta que “Es común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización; pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación” (Juárez y Rico, 2005).

La organización de las partículas es tal que el agua puede, si existe la suficiente cantidad, tener continuidad a través de los poros existentes entre éstas, formando una masa continua en el sentido de distribución de presiones. Las propiedades del suelo son afectadas de manera esencial por el agua de absorción que contiene

## **1.2.6 Propiedades físicas y clasificación de los suelos**

### **1.2.6.1 Relaciones peso – volumen**

El suelo constituye un sistema de tres fases perfectamente diferenciables: la sólida (partículas minerales), la líquida (agua generalmente) y la gaseosa (aire o gas). Un elemento de suelo natural se lo separa en sus tres fases para facilitar la deducción de las relaciones entre ellas (Das, 2001). Las propiedades físicas se expresan, básicamente, a partir de las relaciones peso-volumen, (relaciones en volumen y relaciones en peso), la densidad o compacidad relativa, granulometría y plasticidad.

Las relaciones en volumen son: índice de poros, porosidad y

grado de saturación; y, las relaciones en peso: humedad, peso específico de las partículas sólidas, peso específico del agua, peso específico seco, peso específico aparente y peso específico saturado (Das, 2001).

### 1.2.6.2 Densidad o compacidad relativa

Una magnitud muy empleada para caracterizar la compacidad de un suelo granular es la densidad relativa, definida como:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \times 100 = \frac{\gamma_{dm\acute{a}x}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{dm\acute{i}n}}{\gamma_{dm\acute{a}x} - \gamma_{dm\acute{i}n}} \times 100$$

Siendo:

$e_{m\acute{a}x}$ : Índice de huecos del suelo en el estado más suelto

$e_{m\acute{i}n}$ : Índice de huecos del suelo en el estado más denso

$e$ : Índice de huecos in situ

$\gamma_d$ : Peso específico seco in situ

$\gamma_{dm\acute{a}x}$ : Peso específico seco en el estado más denso ( $e_{m\acute{i}n}$ )

$\gamma_{dm\acute{i}n}$ : Peso específico seco en el estado más suelto ( $e_{m\acute{a}x}$ )

En la tabla siguiente se indican las denominaciones de la compacidad de los suelos granulares a partir de su densidad relativa:

**Tabla 16.** Denominaciones de la compacidad

Densidad relativa (%)	Denominación
0-15	Muy suelto
15-35	Suelto
35-65	Medio
65-85	Denso
85-100	Muy denso

**Fuente:** Das, 2001

### 1.2.6.3 Granulometría

Los tamaños de las partículas de cualquier masa de suelo varían considerablemente, es decir su distribución no es uniforme. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución, en porcentaje, de los distintos tamaños dentro del suelo. (Muelas s.f). La distribución granulométrica de partículas de tamaño superior a 0,08 mm se determina generalmente mediante un análisis granulométrico por tamizado. Para partículas de tamaño inferior al mencionado (0,08 mm) se emplea los ensayos de granulometría por sedimentación (Muelas s.f).

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de tamices (cuyo tamaño de malla suele ir disminuyendo en progresión geométrica de razón 2), agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz. (Muelas s.f). El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en un gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje de material que pasa se representa en escala aritmética (ordenadas), (Muelas s.f).

Una vez determinada dicha curva granulométrica, existen dos coeficientes que se utilizan para una mejor descripción de la granulometría de un suelo (Muelas s.f). Estos coeficientes son:

- **Coefficiente de uniformidad:**  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

- **Coefficiente de curvatura:**  $C_c = \frac{(D^2)_{30}}{D_{60} \times D_{10}}$

El coeficiente de uniformidad representa la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% de material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 10%. (Das, 2001). Se determina dividiendo el cuadrado del diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 30% del material, entre el producto de los diámetros correspondientes a los tamices por los que pasa un 60% y un 10% del material. (Muelas s.f).

El coeficiente de curvatura del suelo, también llamado de graduación, si adopta valores entre 1 y 3 se considera como suelo bien graduado.

Das (2001), al tratar del análisis granulométrico con el hidrómetro, señala que: El análisis granulométrico por sedimentación (partículas de tamaño inferior a 0,08 mm) se lleva a cabo con el hidrómetro, y se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que está aún en suspensión en cualquier tiempo dado, t. El diámetro máximo de las partículas de suelo, aún, en suspensión en el tiempo t se determina mediante la ley de Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

D = diámetro de la partícula de suelo

$G_s$  = peso específico de los sólidos

$\eta$  = viscosidad del agua

$\gamma_w$  = peso específico del agua

L = longitud efectiva (es decir, longitud medida de la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro).

t = tiempo

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la ecuación anterior se habrán asentado más allá de la zona de medición. Así, con lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado puede calcularse; y prepararse, a partir de los diámetros, una gráfica de la distribución granulométrica de los suelos (Das, 2001). Por su parte, Crespo Villalaz (2007), señala: Los Procedimientos para la determinación de los tamaños de partículas menores a 0.074 mm están basados en la Ley de Stokes, que da la velocidad de sedimentación de partículas sólidas esféricas en un líquido.

La velocidad de sedimentación está dada por la fórmula:

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 (D_a - D_w)}{9 \cdot \rho} = \frac{H}{t}$$

En la que:

v = Velocidad de caída de las partículas en cm/seg.

g = Aceleración de la gravedad en cm/seg<sup>2</sup>

r = Radio de la esfera en cm

$D_a$  = Densidad absoluta del material en g/cm<sup>3</sup>

$D_w$  = Densidad absoluta del agua en g/cm<sup>3</sup>.

$\rho$  = Viscosidad absoluta del agua en g/cm.seg

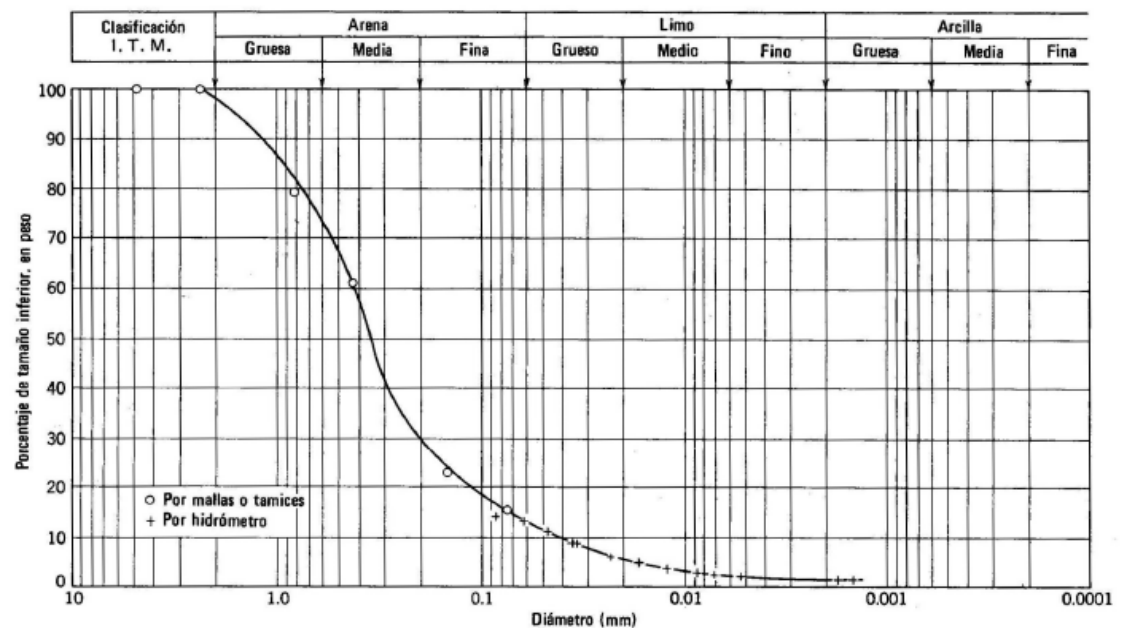
H = Altura de caída de la esfera en cm

t = Tiempo transcurrido, en seg.

Con agua a 20°C,  $\rho = 0.0101$  g/(cm.seg) y con esferas de densidad absoluta de 2.65 g/cm<sup>3</sup>, que es un valor medio entre los minerales que se encuentran en el suelo, la fórmula anterior se transforma, quedando así:

$$v = 35,613.86 r^2$$

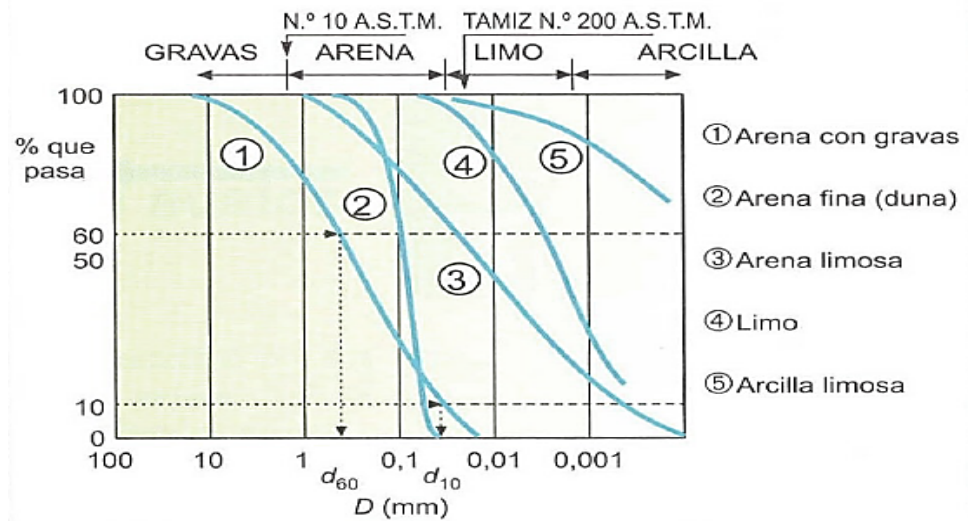
Con los dos métodos de análisis granulométrico expuestos, tanto el por tamizado, como con el hidrómetro, puede determinarse la curva granulométrica completa de una muestra de suelo areno limo arcilloso (ver curvas granulométricas adjuntas).



**Figura 1.** Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).

**Fuente:** Lambe, 1951.





**Figura 2.** Curvas granulométricas

**Fuente:** Muelas s.f.

En función de la granulometría se clasifican los suelos en cuatro grandes grupos: gravas, arenas, limos y arcillas. Las arcillas, son los materiales cuyas partículas tienen tamaños inferiores a 0.002mm, y, están constituidos por minerales de silicatos, los que estructuralmente conforman cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos.

#### 1.2.6.4 Plasticidad

La plasticidad, es la variación de la consistencia en función de la humedad, es propia de las arcillas y limos (suelos finos), ya que los suelos gruesos (arenas y gravas) no retienen agua y se mantienen inalterables en presencia de ésta” (Jara, 2014). Si un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua (Das, 2001). Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan Límites de

Atterberg (Lambe & Whitman, 1995). El concepto de que un suelo puede presentarse en varios estados, en función del contenido de humedad, se basa en que cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el comportamiento del suelo al de un líquido (Jara, 2014).

La determinación de los Límites de Atterberg se lleva a cabo en laboratorio, definiéndose el límite plástico como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3 mm de diámetro. El límite líquido del suelo, se determina utilizando la copa de Casagrande (Designación de Prueba D -4318 de la ASTM) (Das, 2001). La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como Índice de Plasticidad (Das, 2001):

$$IP = LL - LP$$

El índice de liquidez o fluidez se define como:

$$I_L = \frac{W_n - W_p}{W_L - W_p}$$

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, mientras que el índice de liquidez indica la proximidad de la humedad natural del suelo al límite líquido (Lambe & Whitman, 1995).

Con el fin de proporcionar una representación adecuada de la plasticidad de una muestra de suelo se emplea la denominada Carta de Plasticidad de Casagrande (Muelas, s.f.). Muelas (s.f.), indica que, en el gráfico “Carta de Plasticidad de Casagrande”, se representa la relación del límite líquido

(abscisas) con el índice de plasticidad (ordenadas). Casagrande definió que los suelos con  $LL > 50$  son de "alta plasticidad" (pueden admitir un mayor contenido de agua y por tanto pueden experimentar deformaciones plásticas mayores).

Los suelos con  $LL < 50$  se denominan de "baja plasticidad". Complementariamente, el Ing. Casagrande, definió una línea A, que separa los suelos arcillosos de los más limosos. Así, a partir del criterio de alta y baja plasticidad y de la línea A, se pueden definir varias zonas. Los suelos limosos y con apreciable contenido orgánico tienen un intervalo de humedad menor para pasar del estado semisólido al estado líquido (menor índice de plasticidad), situándose por debajo de la línea A. En el caso de las arcillas, dicho intervalo de humedad es mayor, situándose por encima de la línea A. Se definen, por tanto, varios tipos de suelos: arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL), limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH) y limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL) (Muelas, s.f.).

#### **1.2.6.5 Clasificación de suelos**

Los sistemas de clasificación de suelos son tan antiguos como la propia Mecánica de Suelos, y aunque la división de un suelo en sus fracciones granulométricas permitan clasificarlo en términos de grava, arena, limo y arcilla o sus combinaciones, ahora para muchos ingenieros ya es evidente que un sistema de clasificación de suelos debe agruparlos de acuerdo con sus propiedades mecánicas básicas, por ser estas lo que interesa para las aplicaciones ingenieriles” y no únicamente relacionado con el tamaño de las partículas constitutivas de esos suelos o fracciones (Kramer, 2009).

A la vez, el criterio clasificador ha de ser preponderantemente de naturaleza cualitativa, puesto que un sistema que incluye relaciones cuantitativas resultaría excesivamente engorroso y complicado. Probablemente, lo menos que puede esperar un técnico de un sistema de clasificación es que sirva para normar su criterio respecto al suelo en cuestión, antes de que adquiera conocimientos más profundos y extensos de las propiedades del mismo; así, al usar el sistema será posible, entre otras cosas, obtener criterios para saber en qué direcciones es conveniente profundizar la investigación. A pesar de su sencillez, los criterios de clasificación puramente granulométricos resultan hoy poco apropiados porque la correlación de la distribución granulométrica con las propiedades fundamentales resulta demasiado insegura y sujeta a excepciones y caso especiales (Kramer, 2009).

La clasificación de suelos consiste en incluir un suelo en un grupo representativo de suelos por presentar comportamiento semejante, dado sus propiedades geotécnicas similares. La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características necesarias para asignarlo un determinado grupo (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995). Las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la distribución granulométrica, los Límites de Atterberg, el contenido en materia orgánica, etc.

“La clasificación de suelos constituye una ayuda valiosa para el ingeniero, le da indicaciones generales, transformando de manera empírica los resultados de la experiencia de campo. Sin embargo, el ingeniero debe ser precavido al utilizar las clasificaciones de suelos, pues la correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de muchos años

de experiencia. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995). La resolución de problemas de flujo, asentamiento o estabilidad únicamente a partir de clasificaciones puede llevarle a resultados desastrosos”. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

Los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el SUCS (Unified Soil Classification System) y el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (Muelas s.f).

#### **1.2.6.5.1 El Sistema de clasificación SUCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su “Sistema de clasificación de aeropuertos” propuesto inicialmente en 1942 para aeropuertos y después, en 1952, revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos de ingeniería en los que intervienen suelos (permeabilidad, resistencia y compresibilidad de diversos tipos de suelos de cada grupo para su empleo en presas de tierra, canales, cimentaciones y pistas de aeropuertos). (Muelas, s.f)

Clasifica los suelos en base a su granulometría, los Límites de Atterberg y el contenido de materia orgánica. Según Muelas, (s.f), abarca solo gravas, arenas, suelos limosos y arcillosos.

**Tabla 17.** Clasificación de los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría.

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tamaño</b>
Gravas	Los granos son observables directamente, existen grandes huecos entre las partículas y no retienen el agua.	80 mm. y 4,75 mm
Arenas	Estas son observables a simple vista y se mantienen inalterables en presencia de agua.	4,75 mm. y 0,075 mm
Limos	Retienen el agua y si se forma una pasta limo-agua y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se aprecia cómo el agua se exuda con facilidad.	0,075 mm y 0,002 mm
Arcillas	Son partículas de tamaño gel y están formadas por minerales silicatos, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, unidas por enlaces covalentes débiles y pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas, produciendo aumentos de volumen, a veces muy importantes. Por tanto, presentan una gran capacidad de retención de agua, con un porcentaje de huecos muy elevado (huecos pequeños, pero con una gran superficie de absorción en las partículas). Debido a que el tamaño de los huecos es muy pequeño (aunque el índice de huecos es elevado), exhiben unos tiempos de expulsión de agua muy elevados, y una permeabilidad muy baja (Muelas s.f.).	Tamaños inferiores a 0,002 mm

**Fuente:** Crespo, 2007

**Tabla 18.** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.

<b>Símbolo de grupo</b>	<b>Criterios</b>
CL	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI > 7$ ; Límites de Atterberg sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
ML	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI < 4$ ; Límites de Atterberg debajo de la línea A (véase zona ML en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)

OL	Orgánico; (LL no secado en horno) / (LL secado en horno) <0.75; LL <50 (véase zona OL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CH	Inorgánico; LL≥50; PI sobre o arriba de la línea A (véase zona CH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
MH	Inorgánico; LL≥50; PI debajo de la línea A (véase zona MH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
OH	Orgánico;( LL no secado en horno) / (LL secado en horno) <0.75; LL≥50 (véase zona OH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CL-ML	Inorgánico; LL >50; 4≤PI≤7; Límites de Atterberg arriba de la línea A. Se grafica en la zona sombreada en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)

**Fuente:** (Das, 2001)

#### **1.2.6.5.2 El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)**

(Designación ASTM D-3282; método AASHTO M145) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928; y, actualmente es usado principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de los terraplenes, subrasantes, subbases y bases de carreteras.

Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo varía inversamente con su índice de grupo, es decir que un suelo con índice de grupo igual a cero indica que es material

-bueno- para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material -muy malo- para la construcción de carreteras.

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Los suelos que tienen más del 35% de partículas que pasan a través del tamiz N° 200 se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos están constituidos principalmente por limo y arcilla.

El sistema de clasificación AASHTO presenta las siguientes características:

Clasifica a los suelos en tres principales categorías:

- Suelos granulares. Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N° 200 es menor o igual al 35% del total de la muestra. Estos suelos constituyen los grupos A-1, A-2 y A-3.
- Suelos limo-arcilla o material fino. Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N° 200 es mayor al 35% del total de la muestra. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
- Suelos orgánicos. Son los suelos que están constituidos principalmente por materia orgánica. Este tipo de suelo constituye el grupo A-8.

Adopta el siguiente rango de tamaño de partículas:

- Cantos rodados. Son fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en el tamiz de 3" (75 mm).



- Grava. Es la fracción que pasa el tamiz de 3ll (75 mm) y es retenido en el tamiz N° 10 (2 mm).
- Arena. Es la fracción que pasa el tamiz N° 10 (2 mm) y es retenido en el tamiz N° 200 (0.075 mm).
- El limo y la arcilla. Son partículas que pasan el tamiz N° 200 (0.075 mm).

Establece un rango del índice de plasticidad que diferencia a los suelos limosos de los suelos arcillosos.

- El término limoso es aplicado a la fracción fina del suelo que tiene un índice de plasticidad de 10 o menos.
- El término arcilloso es aplicado cuando la fracción fina tiene un índice de plasticidad de 11 o más.

Considera solo la porción de suelo que pasa a través del tamiz de 75 mm. Si existieran partículas mayores (guijarros y cantos rodados), éstas son excluidas de la muestra de suelo que será clasificado, sin embargo, el porcentaje de ese material debe ser medido y anotado junto con el resultado de la clasificación.

### **Ecuación empírica del índice de grupo**

$$IG = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F_{200} - 15)(IP - 10)$$

Donde:

$F_{200}$  = Porcentaje que pasa la malla N° 200, expresado como # entero

LL = Límite Líquido

IP = Índice de plasticidad

El primer término de la ecuación: “ $(F_{200} - 35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)]$ ” es el índice parcial de grupo determinado con el límite líquido. El segundo término: “ $0.01 (F_{200} - 15)(IP -$

10)” es el índice parcial de grupo determinado con el índice de plasticidad. Sin embargo, también se puede determinar el índice de grupo a partir del ábaco mostrado para el cálculo del Índice de Grupo (Norma ASTM, 2003).

Si el suelo no es plástico y no se puede determinar el Límite líquido, entonces el índice de grupo (IG) será:  $IG = 0$ . Este es el caso de los suelos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3, en donde su índice de grupo siempre es cero.

Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4, los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 y los suelos arcillosos, entre 11 y 20, o más. Los valores del índice de grupo, se utilizan solo para comparar suelos dentro el mismo grupo y no entre grupos diferentes; así por ejemplo, no se pueden comparar un suelo A-3 (0) y un suelo A-2-7 (3), por el valor del índice de grupo; sin embargo, si se pueden comparar un suelo A-3 (0), con un suelo A-3 (3), donde por del valor del índice de grupo se puede deducir que el suelo A-3 (0) es de mejor calidad que el suelo A-3 (3), por tener este un valor del índice de grupo menor ( $0 < 3$ ).

La ecuación empírica del índice de grupo diseñada para conseguir una evaluación aproximada de los suelos del mismo grupo, en los materiales granulares arcillosos, y los materiales limo arcillosos, se basa en las siguientes suposiciones:

- Los materiales que se encuentran en los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 son apropiados para su uso como subrasantes cuando están adecuadamente drenados y compactados y el espesor de la capa de pavimento es moderado (base y carpeta de rodadura), así como

también el tráfico que soportará sea adecuado; también este material puede lograrse por adiciones de pequeñas cantidades de ligantes naturales o artificiales.

- Los materiales granulares arcillosos de los grupos A-2-6 y A-2-7 y los materiales limosos y arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, pueden clasificarse para su utilización en subrasantes desde adecuadas como materiales de subbase equivalentes a las categorías A-2-4 y A-2-5, hasta regulares e inadecuadas hasta el punto de requerir una capa de subbase o una capa mayor de subbase que la requerida en el anterior caso (1), para proporcionar un adecuado soporte a las cargas de tráfico.
- Se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz N° 200 (0.0075 mm.) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es solo el 15% cuando se ve afectado por el IP mayor que 10.
- Se supone que el LL igual o mayor que 40% es crítico.
- Se supone que el IP igual o mayor que 10% es crítico.

#### **1.2.6.5.3 Comparación entre los sistemas SUCS y AASHTO**

El sistema AASHTO es esencialmente para la construcción de carreteras mientras que el Unificado no presenta restricciones de ningún tipo y su uso es más general.

Ambos sistemas de clasificación están basados en los mismos ensayos de laboratorio, como la distribución de tamaño de partículas, el límite líquido y plástico, con la diferencia de que

cada sistema adopta distintos valores como límites entre los tipos de suelos. Así, el sistema AASHTO considera como suelo fino si más del 35% del total de la muestra de suelo pasa por el tamiz N° 200, en tanto el sistema Unificado lo hace si más del 50% de la muestra de suelo pasa por el mismo tamiz.

En el sistema AASHTO el tamiz N° 10 es el que separa la grava de la arena mientras que en el unificado es el tamiz N° 4.

En el sistema Unificado los suelos gravosos de los arenosos están muy claramente separados, mientras que en el sistema AASHTO no lo están. El grupo A-2 en particular contiene una amplia variedad de suelos gravosos y arenosos. En el sistema Unificado los símbolos GW, SM, CH y otros son usados para una mejor descripción de las propiedades de los suelos, mientras que los símbolos de grupo A del sistema AASHTO no son tan descriptivos en este aspecto.

En el sistema Unificado se puede clasificar a los suelos orgánicos como OL, OH y Pt; mientras que en el sistema AASHTO no se los toma en cuenta en el proceso de clasificación, y se los deja con el grupo A-8, que no figura en las tablas de clasificación.

Liu (1967) analizó diferentes aspectos asociados a los sistemas de clasificación de suelos AASHTO y Sistema Unificado SUCS. Los resultados de este estudio comparativo entre ambos sistemas, destacando las clasificaciones *más probable*, *posible* y *posible pero improbable*, se presentan en las tablas siguientes; sin embargo, Liu (1967) concluye que estas significativas diferencias, no deben resultar

sorprendentes, sobre todo si se consideran sus orígenes y propósitos, frente a lo cual Holtz et al (2011), mencionan que el propósito original del Sistema AASHTO fue de utilidad para determinar la calidad de materiales a ser empleados en rellenos, sub bases y bases de pavimentos y subrasantes.

**Tabla 19.** Comparación entre el Sistema AASHTO y el Sistema SUCS

Grupo de suelo en sistema AASHTO	Grupos de suelos comparables en el Sistema Unificado SUCS		
	Más probable	Posible	Posible pero improbable
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, BM
A-1-b	BW, BP, GM, SM	GP	—
A-3	SP	—	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP.
A-2-5	GM, SM	—	GW, GP, SW, SP.
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP.
A-2-7	GM, GC, SM, SC	—	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	—	SM, GM
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

**Fuente:** Liu (1967)

\* después de Liu (1967)

**Tabla 20.** Comparación entre el Sistema SUCS y el Sistema AASHTO

Grupo de suelo Sistema SUCS	Grupos de suelos comparables en el Sistema AASHTO		
	Más probable	Posible	Posible pero improbable
GW	A-1-a	-----	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7

GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2-7	A-2-4	A-4, A-6, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4	A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	---
CL	A-6, A-7-6	A-4	---
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	---
MH	A-7-5, A-5	----	A-7-6
CH	A-7-6	A-7-5	---
OH	A-7-5, A-5	----	A-7-6
Pt	----	----	----

**Fuente: Liu (1967)**

\* después de Liu (1967)

#### 1.2.6.5.4 Clasificación de suelos con fines de estabilización

Existen varios sistemas para clasificar a los suelos con fines de estabilización, uno de los más conocidos es el **Sistema Northcote**, que se basa en el tamaño, forma y arreglo de las partículas, es decir en la textura. Entendiéndose el concepto de textura desde el punto de vista geotécnico, a la forma en que están agregadas las partículas de arena, limo y arcilla; describiéndose, al tratar de la forma, tamaño y grado de desarrollo. Asimismo, se subdivide a estos suelos en subgrupos de acuerdo con algunas características visibles

tales como el color, presencia de concreciones, rellenos en las grietas o fisuras, etc., así como con características no detectables a simple vista como lo el nivel de alcalinidad o acidez, cuyo valor permite caracterizarlo mejor; y, es sabido que, mientras mejor se conozcan las características físicas y químicas de un suelo mejor se puede emprender el estudio de la estabilización.

Según el Sistema Northcote, el primer paso para la determinación de la composición y propiedades esperadas en un suelo, es el reconocimiento visual y manual; el segundo paso importante es la determinación del tipo de minerales que contiene el suelo, pues de ellos depende en forma directa la estabilidad volumétrica, la cohesión y, en especial la reactividad a la estabilización. Es determinante, para la estabilización de suelos, el reconocimiento de los minerales presentes en éstos, aunque, de los cientos de minerales que se han encontrado en los limos y arcillas contenidos en un suelo, basta para fines prácticos e ingenieriles, el reconocimiento de la existencia de al menos de diez de ellos.

Los tipos de minerales se pueden determinar con microscopios electrónicos, difracción de rayos X, espectrometría con rayos infrarrojos y análisis químicos, sin embargo, los minerales de un suelo se pueden reconocer con cierto grado de aproximación a la mayoría de los grupos minerales en base a observaciones y pruebas sencillas de campo; pero, para lograr que el reconocimiento de los suelos sea más efectivo debe complementarse con el conocimiento de las propiedades del suelo y de sus componentes a través de los ensayos antes citados. Álvarez (2000) en (Salas, 2017).

El método Northcote se basa en tres premisas que según Álvarez (2000) son las siguientes:

- a) Observaciones generales del lugar y del perfil de suelos. Es necesario efectuar pozos a cielo abierto o extraer muestras inalteradas. Es de utilidad el análisis de cortes existentes en la región o extraer muestras alteradas, en donde se toma nota de los colores del suelo y del agua en los encharcamientos cercanos.
- b) Apreciación de la textura del suelo. La textura del suelo puede estimarse con la ayuda de agua de lluvia o destilada.

Inmersión del espécimen del suelo, completamente en agua de lluvia o destilada. EL procedimiento que se recomienda se le ha designado como “prueba del grumo”. No se deben agregar agentes dispersantes, ni humedecedores. El procedimiento consiste en colocar un pequeño grumo de suelo secado al aire (aproximadamente del tamaño de un frijol) dentro de un vaso de vidrio claro lleno de agua destilada o de lluvia. Es muy importante que no se altere el grumo en ninguna forma, salvo el secado, antes de su inmersión en agua. Se observa el comportamiento del grumo, después de la inmersión, durante un lapso de hasta 10 minutos. (Álvarez, 2000).

Deben anotarse todas las observaciones de campo en forma apropiada. Álvarez (2000) recomienda registrar los siguientes datos:

- Coordenadas UTM de su localización
- Profundidad a partir de la superficie.
- Color. Cuando se presenten motas, anotar sus coloraciones.



- Inclusiones. Indicar si se trata de carbonatos, hierro, raíces, materia orgánica.
- Textura y consistencia
- Dispersión en agua
- Tipo de perfil
- Geología. Tipo de rocas o formaciones en la región.
- Aguas superficiales. Coloración, turbidez, etc.
- Erosión. Tipo de erosión
- Presencia de deslizamientos
- Micro relieve en los suelos
- Mineral inferido.

La dispersión se detecta mediante la formación de halos, alrededor de cada grumo, fácilmente visibles contra un fondo oscuro, mientras más pronunciados sean los halos, más alta será la dispersión. El asentamiento del suelo en el líquido que permanece claro durante menos de 10 minutos será un signo de la ausencia de dispersión. Si no se reconoce fácilmente la presencia de carbonatos, esta se puede verificar mediante la efervescencia del suelo al colocar una gota de ácido en éste (ácido de una batería puede ser suficiente). La finalidad de reconocer a los suelos tanto visual como manualmente es permitir tomar decisiones lógicas respecto al tipo de estabilización más adecuado, así como las pruebas a efectuar. Álvarez (2000) en (Salas, 2017).

### **1.2.7 Análisis de materia orgánica**

El ensayo de los niveles de contenido de materia orgánica que contiene un suelo se realiza por el método Walkley y Black. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiana que, dentro del suelo, influyen

sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas.

El método se basa en la oxidación por medio del Dicromato de Potasio que reacciona en un volumen con dos de Ácido Sulfúrico concentrado. El exceso de Dicromato de Potasio se determina valorando con solución de Sulfato Ferroso Amoniacal en presencia como indicador Difenilamina Sulfúrica.

Previamente a la determinación de materia orgánica se debe estar seguros que no existen sales de cloro ya que pueden ser la fuente de error, en caso que existan se deben eliminar las sales solubles antes de la determinación. En la Tabla 4.05 se muestra los Niveles de Materia Orgánica.

**Tabla 21.** Niveles de Materia Orgánica

<b>Niveles de contenido</b>	<b>Porcentaje de materia orgánica</b>
<b>Bajo</b>	0 - 2
<b>Medio</b>	2 - 4
<b>Alto</b>	Más de 4

### **1.2.8 Propiedades físicas y químicas y tipos de arcillas**

Para entender mejor la respuesta que tendrán los suelos ante una estabilización es necesario conocer los aspectos físicos-químicos de éstos. De manera general se considera, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de las 2 micras (0.002 mm) o menores y presentan una actividad eléctrica importante que rige su comportamiento, dada su gran superficie especifica en relación con su volumen, y aun con su masa.

En los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas y están compuestos predominantemente por minerales cristalinos, algunos de los cuales tienen muy poca actividad superficial por lo que no

contribuyen a los efectos conocidos como plasticidad y cohesión, como pueden ser el cuarzo y la calcita, por ejemplo. Por lo que, es imprescindible la clasificación de los suelos (SUCS, AASHTO), la determinación de la composición mineralógica del suelo y el material estabilizante y el análisis de los niveles de materia orgánica que contiene el suelo.

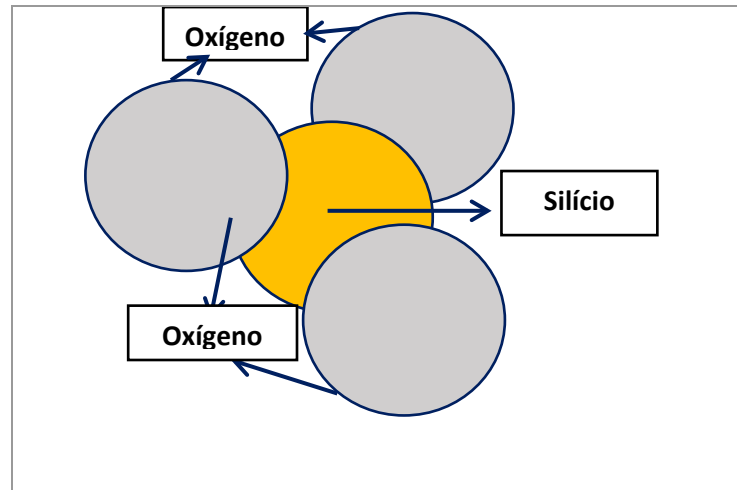
Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta plasticidad y cohesión, podemos denominarlos como arcillosos, existen aproximadamente 15 minerales de este tipo, pero se pueden agrupar en 3 grupos dominantes, a saber: Caolinita, Montmorilonita e Illita (Fernández, 1991).

#### **1. Caolinita:**

Se pueden unir láminas de este mismo tipo unas sobre otras para formar cristales de caolín conocidas como Caolinita, siendo las fuerzas que las unen del tipo hidrogeno y desarrolladas entre los iones oxígeno ( $O^{2-}$ ) y los iones hidroxilo ( $OH^{-}$ ). Esta unión es relativamente fuerte. Si se tienen diferentes estructuras en las láminas, se obtienen diferentes minerales arcillosos con la misma composición de caolín. Aunque las láminas de sílica (fig. 2.2) y gibsita son capaces de extenderse en forma indefinida en la dirección horizontal (de los planos), se ha encontrado que las partículas de caolín que generalmente son de forma hexagonal, se presentan como partículas planas cuyos radios varían de 0.5 a 1.0 micras (Fernández, 1991).

La caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero bajo la presencia de agua se disocian algunos de los hidroxilos ( $OH^{-}$ ) y pierden los iones hidrogeno ( $H^{+}$ ), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa que se equilibra con

la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo, Sodio ( $\text{Na}^+$ ) o Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ). (Fernández, 1991).



**Figura 3.** La caolinita, mineral eléctricamente neutro

**Fuente:** Fernández, 1991.

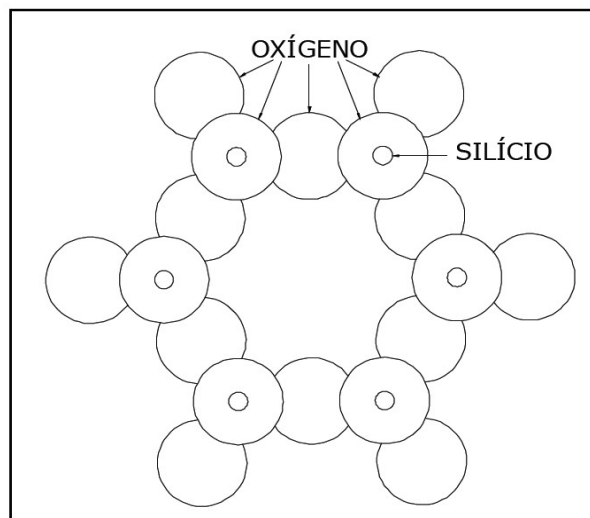
## 2. Montmorilonitas

En las láminas formadas por unidades tetraédricas y octaédricas frecuentemente ocurre lo que se conoce como sustitución isomorfa, que consiste en la sustitución de un átomo por otro. Si el agua contiene cationes tales como Sodio ( $\text{Na}^{+1}$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), Potasio ( $\text{K}^{+1}$ ) o similares, estos son atraídos a las unidades de tal manera que satisfacen casi totalmente a la carga negativa resultante de la solución isomorfa. El problema es que estos cationes no quedan fijos en las láminas si no que se pueden intercambiar fácilmente (Fernández, 1991).

El espesor de las láminas de la montmorilonita es del orden de 10 Angstroms ( $1 \times 10^{-10}\text{m}$ ) y se colocan una sobre la otra como las hojas de un libro, teniéndose como liga entre las unidades

a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos (Fernández, 1991).

La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en lo general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de montmorilonita. Como resultado de lo anterior, los suelos que contengan cantidades considerables de montmorilonita presentan importantes características de expansión (Fernández, 1991).



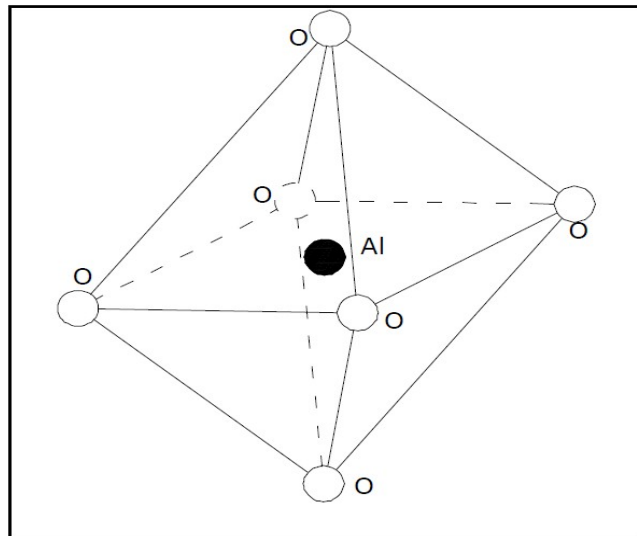
**Figura 4.** Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica.  
Fuente: Fernández, 1991.

### 3. Iilitas

La unidad estructural de la ilita es muy semejante a la montmorilonita con la excepción de que siempre se presenta una sustitución isomorfa adicional de átomos de sílice ( $\text{Si}^{+4}$ ) por átomos de aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) en la lámina de sílica (Fig.5), resultando con ello una carga residual negativa, más alta que

la correspondiente a la de la lámina de montmorilonita. Sin embargo, una parte sustancial de esta carga residual negativa se equilibra con cationes de potasio ( $K^{+1}$ ) no intercambiables, lo que provee una liga fuerte entre las láminas de illita para constituir las partículas (Fernandez, 1991).

Las ligas mediante los Cationes no intercambiables ( $K^{+1}$ ) son más débiles que las ligas de hidrogeno que unen a las unidades estructurales de la caolinita, pero son mucho más fuertes, que las ligas de los cationes intercambiables, que forman a los cristales de la montmorilonita (Fernández, 1991). Esto se debe, en parte, al hecho de que los cationes ( $K^{+1}$ ) se fijan entre las superficies de las láminas de sílica y en consecuencia se encuentran mucho más cerca del catión intercambiado que en el caso de la montmorilonita en donde el catión intercambiado queda en la lámina central (Fernández, 1991). Debido a esto, la estructura de la illita no se expande por el paso del agua a través de sus láminas como ocurre en la montmorilonita (Fernández, 1991).



**Figura 5.** Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica

**Fuente:** *Fernández, 1991*

### 1.2.9 Estabilización de suelos

En el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección: Suelos y Pavimentos (MTC, 2013), se hace la siguiente aproximación: “La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subbase o base granular tratada (con cemento o con cal o con asfalto, etc.)” (MTC, 2013).

(Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008), definen la estabilización, como el proceso de combinar o mezclar materiales con el suelo para mejorar sus propiedades.

La estabilización significa, no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, sino también asegurar la permanencia de ese estado a través del tiempo. Este último aspecto del proceso tiene fundamental importancia, ya que, de su existencia, depende la existencia del primero (Márquez, 2005).

En la Sección: Suelos y Pavimentos del Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Dirección General de Caminos y Ferrocarriles – Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación” (MTC, 2013).

Para Cristobal (2015): “Las distintas actividades de conservación de los caminos no pavimentados se realizan en intervalos de tiempo diferentes e involucran variados niveles de trabajo. Tanto la periodicidad de las actividades como el trabajo específico requerido dependen de la magnitud del deterioro, volúmenes de tránsito, calidad de los materiales que conforman la estructura y subrasante, condiciones climáticas, y principalmente, del nivel de servicio al que se requiere mantener el camino”. (Cristobal, 2015).

Los suelos con contenidos apreciables de arcillas y limos, presentan graves problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de infraestructuras, dentro de las cuales en los



caminos se presentan las mayores exigencias por su exposición al clima, debido a que estos suelos poseen elevada plasticidad, reducida capacidad portante e inestabilidad de volumen en función de la humedad (expansión y contracción) (Beltrán y Copado, 2011).

#### **1.2.9.1 Mejoramiento de propiedades por estabilización del suelo**

En la Sección: Suelos y Pavimentos del Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Dirección General de Caminos y Ferrocarriles – Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se indica: “Se considerarán como materiales aptos para las capas de la subrasante suelos con CBR igual o mayor a 6%. En caso de ser menor (subrasante pobre o subrasante inadecuada), o se presenten zonas húmedas locales o áreas blandas, será materia de un Estudio Especial para la estabilización, mejoramiento o reemplazo, donde el Ingeniero responsable analizará diversas alternativas de estabilización o de solución, como: Estabilización mecánica, Reemplazo del suelo de cimentación, Estabilización con productos o aditivos que mejoran las propiedades del suelo, Estabilización con geosintéticos (geotextiles, geomallas u otros), Pedraplenes, capas de arena, Elevar la rasante o cambiar el trazo vial si las alternativas analizadas resultan ser demasiado costosas y complejas” (MTC, 2013)

Según otros investigadores, el proceso puede incluir la mezcla entre diversos tipos de suelos para alcanzar una graduación deseada (estabilización mecánica) o la mezcla del suelo con aditivos disponibles en el mercado (estabilización física y/o química), que puedan mejorar su graduación, textura o plasticidad. Igualmente, el estabilizante puede actuar como ligante para la cementación del suelo. (Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008).

#### **a. Estabilidad volumétrica**

La expansión y contracción de muchos suelos, originados por los cambios de humedad, se puede presentar en forma rápida o acompañada a las variaciones estacionales o con la actividad propia de la construcción (Montejo, 2008). Los suelos que varían altamente su volumen en función de la humedad, son llamados *expansivos*, éstos se presentan con mucha frecuencia en la selva peruana donde los suelos se expanden y se contraen ocasionado por los cambios de humedad, debido a las lluvias permanentes, por lo cual se debe tener especial cuidado en el diseño y construcción de vías en esta región (Vásquez, 2010). Ahora bien, si las presiones de expansión que se desarrollen debido a un incremento en la humedad no se controlan de alguna manera, estas presiones pueden levantar pavimentos, levantar cimentaciones de edificaciones, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc. por lo cual es de vital importancia detectar a los suelos expansivos, su composición y tratamiento más adecuado para evitar lo anterior (Martínez, 2012).

Actualmente, las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos consisten en introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión expansiva interna, utilizar membranas impermeables y apoyar la estructura a profundidades tales que no se registre variación estacional en la humedad. Un medio más podría consistir en modificar la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular, esto puede lograrse por medios químicos o térmicos (Martínez, 2012).

Por último, algunas veces se puede aumentar la impermeabilidad de un suelo y por ende reducir la velocidad de los cambios volumétricos en suelos expansivos, compactándolos a pesos volumétricos altos, pero debe tenerse en cuenta que la humedad de compactación juega un papel también muy importante en el fenómeno de los cambios volumétricos (Martínez, 2012).

#### **b. Resistencia**

Es la capacidad del suelo a evitar su deformación y falla ante una carga; generalmente es en general más baja cuanto mayor sea su contenido de humedad salvo algunas excepciones. Existen casos en los que al bajar la humedad también lo hace la resistencia, por ejemplo, un suelo cohesivo al secarse y no estar confinado se agrieta y termina comportándose como un suelo friccionante, lo que deviene en derrumbes (Montejo, 2008). Los suelos arcillosos al secarse, alcanzan grandes resistencias teniendo inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillos (Martínez, 2012).

Se ha visto que en suelos finos tiene una importancia decisiva la forma de aplicación de la energía de compactación, sobre todo cuando se emplean humedades más altas que la óptima.

Al estudiar los efectos de una estabilización, debe tenerse presente el fin que se busca, así, si el suelo estabilizado va a permanecer húmedo en las condiciones de trabajo, entonces la determinación de la resistencia bajo estas circunstancias sería la adecuada, por el contrario, si el suelo permanecerá

seco y agrietado, probablemente sea más efectivo efectuar pruebas, con cargas repetidas para estudiar efectos de disgregación y pulverización. Para suelos de textura abierta y mal graduados sería más importante determinar su susceptibilidad a recompactarse provocando con ello deformaciones en las estructuras sobre las cuales se apoyen (Martínez, 2012).

Algunas veces resulta muy difícil incrementar la resistencia de un suelo mediante la adición de agentes estabilizantes, tal es el caso de los suelos con alto contenido de humedad, del orden de 10 %, ya que esta acción inhibe la acción de tales agentes (Martínez, 2012).

El incremento en el peso volumétrico de un suelo orgánico mediante la compactación, se ha considerado, en general, como un incremento en la Resistencia. Algunos de los procedimientos utilizados para incrementar el peso volumétrico de un suelo; según Martínez (2012) son:

1. Compactación mediante amasado, vibración o impactos.
2. Vibroflotación.
3. Precarga.
4. Drenaje.
5. Adición de agentes que reduzcan la fricción y cohesión entre las partículas.

Resulta un tanto evidente que los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se produzcan cambios volumétricos, son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo como lo es la adición de agentes que transformen a un suelo fino en una masa rígida o granular (Martínez, 2012).

### **c. Permeabilidad**

Es el contenido de vacíos en su estructura, es decir, el espacio comprendido entre sus partículas provocando la circulación de agua a través de sus poros. En los suelos la permeabilidad se plantea en dos problemas básicos, como lo es el relacionado con la disipación de las presiones de poro y el relacionado con el flujo del agua a través de los suelos. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en terracerías y el flujo de agua puede generar en arcillas, tubificaciones y arrastres (Martínez, 2012).

Si se compacta un suelo con humedades muy bajas o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan resistiendo al esfuerzo cortante de compactación y permitiendo que se forme con ello una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado, ya que este tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos (Martínez, 2012). Se debe tener presente que, los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad de un suelo, no necesariamente mejoran su estabilidad volumétrica o resistencia mecánica y en algunos casos inclusive puede resultar contraproducente a estos aspectos (Martínez, 2012).

Se puede reducir la permeabilidad de un suelo mediante la inyección de lechadas, sin embargo éstas al no sellar perfectamente los poros, solamente se logra disminuir el gasto y el flujo sin lograr una impermeabilidad adecuada.;

entonces, no es difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelos por métodos tales como la compactación, inyección, etc.; aunque, en materiales arcillosos, el uso de floculantes puede reducir la permeabilidad también significativamente, y algunas sustancias defloculantes como el polifosfato de sodio pueden sellar perfectamente los poros de un suelo (Montejo, 2008), (Martínez, 2012).

#### **d. Compresibilidad**

Es una propiedad donde se observa el cambio volumétrico de la estructura de un suelo debido a las condiciones naturales y artificiales que se presenten (Vásquez, 2010). La compresibilidad de un suelo puede presentar variaciones importantes dependiendo de algunos factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a la que el suelo soportaba anteriormente, tiempo de aplicación de la carga una vez que se ha disipado la presión de poro en exceso de la hidrostática, naturaleza química del líquido intersticial, entre otros (Martínez, 2012). Estos cambios en volumen o compresibilidad, influyen considerablemente en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tienen una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan deslizamientos (Vásquez, 2010), (Martínez, 2012).

#### **e. Durabilidad**

Condición muy deseable en los suelos estabilizados, al igual que en todos los materiales de construcción, es la durabilidad, definida como la resistencia a los procesos de intemperización, erosión y abrasión (Martínez, 2012). En la durabilidad de caminos se involucran, entonces, aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, erosión o la abrasión del tráfico; de esta manera, en la infraestructura de transporte, los problemas de durabilidad están relacionados a las capas superficiales del pavimento en especial el nivel de rodadura (Vásquez, 2010). Martínez (2012), señala que la durabilidad está referida no solo las capas superficiales, sino que también se presentan erosiones profundas internas en los terraplenes o cortes debido no solo a una baja durabilidad sino también a una alta permeabilidad de los suelos.

En los suelos estabilizados la durabilidad baja se debe generalmente a un diseño deficiente que puede tener su origen en una mala elección de un estabilizante, o también puede deberse a una cantidad insuficiente de estabilizante (Martínez, 2012).

Una deficiencia importante en los estudios de estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. La durabilidad es pues uno de los factores más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobrediseñar los materiales o sobredimensionar la estructura, lo cual a veces no puede ser lo correcto (Martínez, 2012).

En el diseño de la estabilización de un suelo se deben tener muy presentes las variaciones que se espera lograr en lo que respecta a la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica,

permeabilidad, durabilidad y compresibilidad, ya que se puede presentar el caso de que el mejoramiento de alguna de las propiedades del suelo mediante la estabilización, provoque que otras características resulten en condiciones desfavorables, esto es especialmente cierto en el caso de la estabilización mediante la compactación (Martínez, 2012).

#### **1.2.9.2 Uso específico de la estabilización en la estructura del pavimento**

El diseño de pavimentos se basa en la premisa de que el paquete es tan competente como cada una de las capas que lo componen. Por lo tanto, cada capa debe soportar el cortante, las deflexiones excesivas que causan el agrietamiento por fatiga y prevenir la excesiva deformación permanente. (Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008).

Entonces, la calidad de la capa de suelo puede ser mejorada de forma tal que con menores espesores se logre una mejor distribución de cargas.

Los dos usos principales de la estabilización son:

##### **a. Mejoramiento de la calidad**

Una de las principales mejorías que se logran a través de la estabilización de la subrasante es en cuanto a la graduación del suelo. Igualmente se logra reducir el índice de plasticidad y el potencial de expansividad. Por otro lado, se incrementa su durabilidad y dureza. En climas húmedos la estabilización puede también ser usada para proveer una superficie más apta para llevar a cabo operaciones constructivas. Estos tipos



de mejoras pueden ser llamadas: “modificación del suelo”. (Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008).

**b. Reducción del espesor**

La dureza y rigidez del suelo puede ser mejorada a través de la incorporación de aditivos que permitan la reducción en los espesores de diseño, respecto a los materiales sin tratar. Los espesores de diseño de la base o la subbase pueden ser reducidos si el material estabilizado presenta la graduación, la dureza, la estabilidad y la durabilidad requerido. (Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008).

En los casos en los que se requiere realizar sustitución de material, la posibilidad de reducir el espesor del material que se va a colocar es de mucha utilidad ya que se reducen los costos en cuanto a excavaciones. (Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008).

**1.2.10 Métodos de estabilización de suelos**

Son varios los procedimientos para modificar un suelo natural, y someterlo a tratamiento, una forma de clasificarlos es de la siguiente manera (Gárnica, et al., 2002):

**Tabla 22.** Métodos de mejoramiento de suelos

<b>Métodos</b>	<b>Físicos</b>	Confinamiento (suelos no cohesivos).
		Preconsolidación (suelos cohesivos).
		Mezclas (suelo con suelo).
		Vibroflotación.
	<b>Químicos (Estabilizaciones)</b>	Con cemento.
		Con asfalto.
		Con sal.
		Con cal.

		Con otras sustancias: (Sales como la Bischofita).
	<b>Mecánicos</b>	Compactación.

**Fuente:** *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*, Rico Rodriguez, Alonso y Del Castillo, Hermilio, Editorial Limusa S.A., 1974, México.

**Tabla 23.** Procedimientos para modificar un suelo natural.

<b>PROCEDIMIENTOS</b>		
<b>Procedimientos mecánicos (compactación):</b>	<b>Procedimientos físicos:</b>	<b>Procedimientos químicos (estabilizaciones):</b>
Amasado (rodillos pata de cabra).	Mezcla (suelo con suelo)	Cal
Impactos de Carga (pisones).	Confinamiento (suelos friccionantes)	Cemento Portland
Presión estática (rodillos lisos y neumáticos).	Consolidación previa (suelos finos arcillosos)	Ceniza volante
Vibración (rodillos vibratorios).	Vibroflotación	Asfaltos
Métodos Mixtos (combinación de los métodos anteriores).		Otros

En el diseño de la estabilización de un suelo se deben tener presentes las variaciones que se espera lograr en lo que se respecta a la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y compresibilidad. El método de diseño obviamente depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. ( Torrente & Sagúes, 1947), (Gutierrez, 2010).

#### **1.2.10.1 Estabilización química**

Gutierrez (2010), señala que “La estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar sus propiedades de comportamiento, ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio (Ministerio de Transportes y Comunicaciones: Norma Técnica de Estabilizadores Químicos)”.

Entre los productos químicos usados como estabilizadores de las vías no pavimentadas tenemos: los óxidos e hidróxidos de calcio, los cloruros de calcio (Ca), sodio (Na), los cloruros férricos; el silicato sódico, el cloruro de magnesio hexahidratado ( $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ ) o Bischofita y las resinas. En el Perú, es en la Norma Técnica de Estabilizadores Químicos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, donde se encuentra las recomendaciones y sugerencias necesarias a tenerse en cuenta en caso se desee verificar si el producto químico estabilizador cumple con las características indicadas en la documentación técnica entregada por el fabricante o distribuidor. También, en dicha Norma se establecen los métodos de ensayo que se deben utilizar en la evaluación de las propiedades y el comportamiento del suelo mejorado; además de establecer recomendaciones a tenerse en cuenta en la utilización de los diversos estabilizadores químicos, excepto la cal y ceniza.

Según, Perez (2012), la técnica de estabilización química de suelos se basa en la interacción de los elementos presentes en el suelo, de los componentes del medio ambiente y de la

sustancia química estabilizadora. El suelo influye de acuerdo a su mineralogía, o sea, presencia de cuarzo y minerales de arcillas; el medio ambiente influye a través de la temperatura, agua, aire; y, si de cal se trata, ésta interactúa con el sistema debido a la presencia de óxido de calcio o magnesio. Esta interdependencia se manifiesta en función de las reacciones físicas, químicas y físico-químicas, predominantemente de las que ocurren entre la cal y el suelo. Así, el proceso de estabilización envuelve cuatro reacciones distintas que son: intercambio iónico, la floculación y aglomeración, reacciones puzolánicas y carbonatación.

(Salas, 2018), en su tesis para optar el título profesional de ingeniero civil, hace mención a los conceptos que Torrente & Sagúes (1947), introdujo sobre la estabilización química, en la que, hace referencia principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. El diseño de estabilizaciones con agentes químicos estabilizantes, consiste en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo y de acuerdo a ello determinar el tipo y cantidad de agente estabilizante, así como el procedimiento para efectuar la estabilización. Las características principales de las sustancias químicas usadas como agentes estabilizadores son:

- Cal: Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- Cemento Portland: Aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Productos Asfálticos: Es muy usado para material triturado sin cohesión.

- Cloruro de Sodio: Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Cloruro de Calcio: Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo.
- Escorias de Fundición: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Polímeros: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Hule de Neumáticos: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

#### **1.2.11 Respuesta de los suelos a la estabilización con aditivos en carreteras**

En el cuadro siguiente se presenta la respuesta de los principales tipos de suelos a la estabilización con diversos aditivos. Los aditivos, materiales o agentes a usarse en el proceso de estabilización de las carreteras no pavimentadas son clasificados tal como se detalla en los siguientes apartados.

**Tabla 24.** Respuesta de los principales tipos de suelos a la estabilización con diversos aditivos

Componente dominante	Estabilizante recomendado	Objetivos
Arenas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arcilla de baja plasticidad</li> <li>• Cemento Portland</li> <li>• Asfaltos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para estabilización mecánica</li> <li>• Incrementar el peso volumétrico de la cohesión</li> <li>• Incrementar la cohesión</li> </ul>
Limos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependerá del tipo de minerales que contenga</li> </ul>	-----
Alófanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cal</li> </ul>	Acción puzolánica e incremento del peso volumétrico
Caolín	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena</li> <li>• Cemento Portland</li> <li>• Cal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para estabilización mecánica</li> <li>• Para resistencias tempranas</li> <li>• Trabajabilidad y Resistencia tardía</li> </ul>
Ilita (mineral de arcilla)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento</li> <li>• Cal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para resistencias tempranas</li> <li>• Trabajabilidad y Resistencia tardía</li> </ul>
Montmorilonita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajabilidad y Resistencia, reducción de expansiones y contracciones</li> </ul>

**Fuente:** Gárnica et al. *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*; pág. 10.

Pérez (2012), en su investigación señala: “En los suelos de fundación de baja capacidad de soporte, con presencia de arcilla débil o compresible se hace comúnmente mediante la eliminación de los suelos arcillosos de baja capacidad de soporte y se los sustituye en todo su volumen y espesores considerables generalmente por grava arenosa, piedra triturada, arena, los cuales son compactados para aumentar la capacidad de carga (Kukko, 2000). Hoy día, a las cuestiones de costo, plazo y calidad en los procesos de ejecución de obras, se agrega como factores determinantes de optimización, la cuestión ambiental presente en la extracción y transporte del material de préstamo para la

sustitución de los de mala calidad y los vertederos para depositar el material inapropiado. Por tanto, se hace cada vez más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente dentro del área de las propias obras, sean cuales sean sus propiedades. Ello obliga a un estudio detallado de sus propiedades para así adoptar los tratamientos y medidas necesarias a tomar en cuenta para lograr que su comportamiento sea satisfactorio durante la vida útil de la obra, y por supuesto, a un costo razonable (Beltrán y Copado, 2011).

La estabilización de suelos in situ, es la técnica de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que, al encontrarse en el sitio de la obra, no reúnen las condiciones necesarias para su utilización. Los medios para la estabilización de suelos van desde el reemplazo del material inadecuado hasta la incorporación de elementos químicos que al reaccionar con el suelo dan como resultado un suelo con mejores propiedades.

Con la estabilización de suelos in situ se pretende aumentar la resistencia mecánica de los suelos, se entrelazan las partículas de una forma más efectiva y se aseguran que las condiciones de humedad en las que trabaja el suelo varíen dentro de unos rangos reducidos, para conseguir una adecuada estabilidad a las cargas y una escasa variación volumétrica; además, se produce un aumento de la durabilidad de dicha capa. Crea poco impacto ambiental, ya que ahorra transportar a un vertedero enormes volúmenes de material de excavación, y por otro, acarrear enormes volúmenes de material de préstamo.

Vásquez (2010), refiriéndose a estabilización de suelos, recalca la premisa: "No existe el Estabilizador que se aplique a los suelos y mejore todas sus propiedades". Existen muchos agentes

estabilizantes que ofrecen diversas mejoras en las propiedades físicas y mecánicas en el suelo, por lo que una adecuada selección del método de estabilización parte de reducir al mínimo los posibles agentes estabilizadores en función de las limitaciones de fuentes de materiales, clima, tráfico y las exigencias del diseño de pavimento y las mínimas afectaciones ambientales. Una vez predeterminado el o los posibles agentes de estabilización se proceden a realizar los diseños de mezcla, con éstos a diferentes proporciones con el fin de obtener los porcentajes óptimos y así poder discriminar en función de los factores económicos su empleo (Vásquez, 2010).

El proceso de estabilización que inicialmente se aplicaba solamente a suelos y materiales de escasa calidad se ha extendido actualmente a capas granulares formadas por gravas de calidad tratadas. Este tipo de materiales se fabrican en plantas especiales y están sometidos a continuos controles de calidad, para ser transportados posteriormente a obra. Hasta ahora los principales aditivos empleados han sido el cemento y la cal, sin embargo, la estabilización con estos aditivos aumenta los costos en la construcción y no controlan de manera satisfactoria la pérdida de humedad en los suelos utilizados para fundación de una construcción (Roldán de Paz, 2010).

El diseño de la estabilización se suelos con agentes estabilizantes, por ejemplo, con cal y cemento, consiste en primer término en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con base en la cual se determina el tipo y cantidad de estabilizante, así como, el procedimiento para efectuar la estabilización. Estos materiales son generalmente utilizados para estabilizar capas de base o sub-base, también son muy utilizados para mejorar subrasantes. Sin embargo, según Nuñez (2011), los proyectos típicos



que se han beneficiado de la estabilización con cal y cemento, incluyen:

- Autopistas, carreteras principales y secundarias.
- Pistas de aterrizaje y de servicio en aeropuertos.
- Aparcamientos y explanadas de fábricas.
- Estabilización de laderas.
- Caminos vecinales, pistas forestales y caminos Rurales.
- Vías férreas.
- Recuperación de muelles en desuso.
- Recuperación de terrenos contaminados.
- Rellenos estructurales.

#### **1.2.12 Estabilización de suelos con productos químicos en carreteras**

Según la sección 301.C del Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” (EG-2013) de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (MTC, 2013), esta actividad consiste en la construcción de una o más capas de suelos estabilizados con productos químicos, de acuerdo con estas especificaciones técnicas, así como de las dimensiones, alineamientos y secciones transversales indicados en el proyecto.

En las EG-2013 (MTC, 2013), se especifica:” Cualquiera que sea el material a emplear, deberá estar libre de materia orgánica. La fracción inferior del tamiz de 425µm (N° 40) deberá presentar un Límite Líquido inferior a 40 y un índice plástico cuando menos de 6 pero no superior a 12%, determinados según normas de ensayo MTC E 110 y MTC E111. En cuanto a la composición química, la proporción de sulfatos del suelo, expresada como SO<sub>4</sub> no podrá exceder de 0,2% en peso (MTC, 2013).

Para Cristobal (2015): “La inestabilidad de los suelos es uno de los principales problemas que presentan las carreteras no pavimentadas; para corregir este problema se usan variadas técnicas de estabilización de suelos; una de las formas de estabilización de suelos, es aquella que se realiza utilizando productos químicos no tóxicos que dotan a estos suelos (carreteras) un mejor comportamiento en servicio”. (Cristobal, 2015)

“La estabilización de suelos para el diseño y construcción de pavimentos se define como un mejoramiento de los materiales de terreno de fundación, subbase y base, incrementando de manera notoria su resistencia y capacidad de carga y disminuyendo su sensibilidad al agua y a los cambios volumétricos durante el ciclo de humedecimiento y secado”. (Cristobal, 2015).

Cristobal (2015) frente a otros estabilizadores químicos, propone para estabilizar caminos no pavimentados en la selva peruana, el uso de Terrasil, indicando que este producto está compuesto al 100% por organosilanos, y es capaz de reaccionar con los suelos a nivel molecular. Forma enlaces Si-O-Si (siloxano) con las moléculas de la superficie, cuya elevada fortaleza aporta una eficacia prolongada en el tiempo. El producto genera una membrana transpirable, que confiere propiedades hidrófobas, al mismo tiempo que permite la evaporación de agua. Además, mejora la adherencia con polímeros y betunes y elimina el índice de plasticidad de los suelos. Posee grupos Silanol, que reaccionan con los silicatos presentes en el suelo, transformando su superficie y confiriéndoles propiedades hidrófobas permanentes. Así, el suelo repelará las moléculas de agua, impermeabilizándolo y evitando los problemas derivados de la presencia de la misma. La evaluación de resultados indica que para varios tipos de suelos ensayados puede lograrse

sustantivos incrementos en la capacidad de soporte de los suelos con la adición del aditivo. (Cristobal, 2015).

Para Cristobal (2015): “En el Perú, el uso de estabilizadores químicos tradicionales (asfalto, cemento y cal) no es adecuado técnica y económicamente para carpetas granulares de rodado. Económicamente la estabilización de caminos no pavimentados con cal, cemento y asfalto no se justifica en países en desarrollo, menos aun para caminos con bajos volúmenes de tránsito. Además, el uso de estos estabilizadores presenta algunas dificultades en caminos no pavimentados, siendo los principales: (1) se forma una carpeta endurecida que no permite o dificulta la ejecución de las actividades de perfilado y nivelado con la maquinaria tradicional (motoniveladora) cuando se presenten los deterioros. (2) Como las dosis que se utilizan para estabilizar caminos de grava son pequeñas, la carpeta de rodado estabilizada no resiste adecuadamente la acción abrasiva del tránsito, y requiere ser cubierta con una superficie delgada de rodado (Por ej.: tratamiento superficial doble)”. (Cristobal, 2015).

#### **1.2.12.1 Proceso del cemento en la estabilización de suelos**

El diseño de estabilización de suelos mediante cemento portland se puede realizar por resistencia o por durabilidad, esta última hace que tenga mayor contenido de cemento y por ende mayor resistencia y rigidez pero menor flexibilidad que la hace poco aplicable en esta zonas debido a la naturaleza de la sub rasante, asimismo, cuanto mayor es el contenido de cemento el suelo estabilizado tiene a fisurarse; por ejemplo, el diseño de estabilización de suelos en la carretera Contamana - Aguas Calientes se efectuó por resistencia (Vásquez, 2010).

Según Vásquez (2010), básicamente existen dos procesos químicos los que ocurren durante la adición de cemento al suelo los cuales se describen así:

1. “Fijación de los iones cálcicos por el suelo. Este primer proceso modifica las propiedades del suelo (LP), los silicatos del cemento al ponerse en contacto con agua originan silicatos hidratados tornando a la solución del agua en alcalina (pH desde más de 7 hasta aproximadamente 12) con abundancia de calcio que es tomado por el suelo para modificar sus cargas superficiales variando de manera sus condiciones de plasticidad, ocurriendo esto en el segundo proceso” (Vásquez, 2010).
2. “Cementación de las partículas. Modificadas las propiedades de plasticidad del material habiendo sido absorbidos los iones calcio por el suelo, comienza un segundo proceso en el cual el cemento actúa sobre el adhiriendo sus partículas dando lugar a una cementación casi irreversible que origina una cohesión por cementación que aumenta la resistencia al corte del producto resultante. Ocurre algo así como una modificación íntima en el material de cada partícula que las suelda unas con otras” (Vásquez, 2010).

“Hay tres requisitos básicos que deberán tenerse en cuenta al elaborar un suelo cemento a efectos de lograr un producto resultante que sea durable y estable” (Vásquez, 2010).

- Modificación de la humedad óptima
- Compactación uniforme y a máxima densidad.
- Incorporación de suficiente cantidad de cemento para reducir la pérdida de peso u cambio de volumen y humedad a cantidades despreciables después de los ensayos de

durabilidad.

Además de tales condiciones es necesario lograr una mezcla íntima de suelo pulverizado cemento y agua.

Los porcentajes de cemento pueden expresarse en peso o en volumen del suelo seco (Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto, 2009)

Aun pudiéndose estabilizarse cualquier suelo con cemento - a excepción de los suelos muy plásticos, orgánicos o con altos contenidos de sales que puedan afectar el desempeño del cemento -, existen criterios que limitan y especifican las características que debe tener un suelo para considerarse aceptable en la elaboración de una mezcla de suelo-cemento.

Así, constituyen limitantes aspectos relativos a la granulometría y el índice de plasticidad del suelo, proceso constructivo y cumplimiento de requerimientos del diseño de mezcla y de la estructura del pavimento; sin embargo, estas limitaciones no solamente son del orden económico, sino el objetivo es limitar la cantidad de cemento buscándose un mejor comportamiento estructural. Los suelos estabilizados con cemento, no deben considerarse como materiales inertes, pues la adición de agua y cemento al suelo hace que reaccione químicamente, produciéndose cambios a través del tiempo y modificando sus propiedades físicas a corto, medio y largo plazo (Vásquez, 2010).

Una comparación de requisitos granulométricos y otras propiedades en el suelo, exigidos por algunas entidades de países e investigadores se presenta en la tabla a continuación:

**Tabla 25.** Tabla de límites en el suelo para su estabilización con cemento

Límites del suelo	MTC - Perú EG 2000	Colombia INVIAS	Costa Rica EG	México Instituto mexicano de transporte	El Salvador	Rico del Castillo (Ing. de suelos en las vías terrestres)
% contenido de materia orgánica						1-2 máx
% de resistencia a k	<10	---	---	---	---	---
Límite líquido	<40	<35	<40	45 - 50	<40	<50
Índice de plasticidad	<18	<15	<8	<25	<8	<18
Tamaño máximo	---	3"	---	---	2"	80mm
% que pasa N° 4	---	60	50-100	---	50-100	---
% que pasa N° 40	---	---	20-70	---	---	---
% que pasa N° 200	---	<50	5-35	---	5-35	0-60
De la Mezcla						
Resistencia a la compr	1.78	2.1	1.96	---	---	1.78
Expansión	---	---	0	---	---	---

**Fuente:** (Vásquez, 2010)

Según Vásquez (2010), del cuadro anterior podemos concordar en que los límites tanto del punto de vista químico, como económico son:

- (MTC E 118-2000) Contenido de materia orgánica menor a 2%.
- (MTC E 209-2000) Resistencia a los sulfatos menor a 10%.
- (MTC E 110-2000) Límite Líquido menor a 40.
- (MTC E 111-2000) Índice de plasticidad menor a 15.
- (MTC E 107-2000) Porcentaje que pasa la malla N° 4 entre 50 y 100%.
- (MTC E 107-2000) Porcentaje que pasa la malla 200 entre 5 y 35%.
- La resistencia a la compresión será como mínimo 1.8 8Mpa

Si bien, el proceso de selección de óptimo contenido de cemento para su estabilización está en función de los requisitos de resistencia requeridos por el diseño estructural del pavimento, de los requisitos de durabilidad y de los de flexibilidad de la estructura, también ha quedado establecido en varias investigaciones con PROES y Terrasil que la adición del cemento cumple una función de catalizador y permite que estos agentes estabilizadores de suelos interactúen en su presencia.

Existen varias propuestas para estimar el porcentaje de cemento para estabilizar suelos; pero casi en todos los países recomiendan estimar una pre dosificación, y en Perú y otros países como se observan en las siguientes tablas, recomiendan estimarlo entre esos rangos, según el tipo de suelo:

**Tabla 26.** Porcentaje de Cemento según Manual de Carreteras de Bajo Transito del Perú.

Tipo de suelo	% de cemento en peso	
A-1-a	3	5
A-1-b	5	8
A-2	5	9
A-3	7	11
A-4	7	12
A-5	8	13
A-6	9	15
A-7	10	16

**Fuente:** Manual de carreteras de bajo transito del Perú

**Tabla 27.** Porcentaje de Cemento según el Instituto Mexicano del Transporte.

Tipo de suelo	% de cemento en peso	
GW, GP, GM y SW	3	7

SC, GC	5	9
SP, SM	7	11
ML	7	12
CL, OL, MH	8	13
CH	9	15

**Fuente:** Instituto Mexicano del Transporte en (Vásquez, 2010)

**Tabla 28.** Porcentaje de Cemento sugeridos en otros países

% en peso	El Salvador	Método PCA	USASE	Colombia Invias	España
5	No exige contenido	GW, GP, GM, SW, SP, SM.	GW, SW, GP, SW, SM, SW	No exige contenido	Considera un 3% como contenido inicial para todos los tipos de suelos
6	inicial. Para	GM, GP, SM, SP	SC, GW, GM, GW, GC	inicial.	
7	todos los tipos el	GM, GC; SM, SC			
9	contenido es 2%	SP			
10		CL, ML, MH, CH	SP; CL, ML, ML-CL, CH		
11		---	MH, OH		
12		CL, CH	---		
13		MH, CH	---		

**Fuente:** (Vásquez, 2012)

Considerando el tipo de suelo resultante de la clasificación, su pH y el Índice de Plasticidad, se selecciona el porcentaje de pre dosificación, así como dosificaciones de mayor contenido de cemento para definir el porcentaje óptimo de cemento para los requisitos de resistencia, flexibilidad y durabilidad del pavimento.

Los ensayos de laboratorio que se requieren efectuar son: granulometría, Limite líquido, Limite Plástico, clasificación, Proctor, CBR, compresión simple, secado y humedecimiento; éstos y su norma se presentan en la siguiente tabla.



**Tabla 29.** Ensayos del diseño de mezcla estabilización suelo cemento

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>
Granulometría	MTC E107, ASTM D422
Límite Líquido	MTC E 110, ASTM D 4318
Límite Plástico e Índice de Plasticidad	MTC E 111, ASTM D 4318
Proctor Modificado	ASTM E 115, ASTM D1557
CBR	MTC E 132, ASTM D 1883
Compresión No confinada	MTC E 121, ASTM D 2188

Se considera como óptimo contenido de cemento, al porcentaje que satisfaga los requisitos de resistencia y durabilidad sin superar el valor de 55Kg/cm<sup>2</sup>, porque sobrepasado esa resistencia la casuística señala de la tendencia de fisuramiento de la capa estabilizada, fisuras que se podrían reflejar en las capas superiores y deteriorar prematuramente la estructura del pavimento.

### **1.2.13 Estabilización de vías No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito**

La Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, a través de la Dirección de Normatividad Vial que es la unidad orgánica encargada de la formulación de normas técnicas y administrativas para la gestión de infraestructura de caminos en febrero 2015, por Resolución Directoral N° 003 – 2015 – MTC/14 publicada en el Diario Oficial E.P de 6 de febrero 2015, aprobó el Documento Técnico: “Soluciones Básicas en Carreteras No Pavimentadas” (MTC, 2015), para dotar de mejores condiciones de transitabilidad (mejorar el nivel de servicio) y durabilidad (alargar la vida útil) a las carreteras no pavimentadas del Sistema Nacional de Carreteras (MTC, 2015).

Aun, las soluciones básicas en mención, impliquen una mayor inversión inicial por la incorporación de un material estabilizador al material conformante de la capa de rodadura con el empleo de equipos convencionales, tienen por finalidad, mejorar el nivel de servicio de las superficies de rodadura de las carreteras no pavimentadas, que sufren rápido deterioro por efecto del tránsito y el clima, formándose baches, encalaminado, desprendimiento de agregados y emisión de polvo, posibilitando que dichas capas de rodadura tengan menor grado de deterioro, estén exentas de polvo, demanden menor frecuencia de mantenimiento periódico, y permitan el tránsito vehicular durante cualquier época del año.

El mejoramiento de la vida útil, está referida a incrementar el periodo de diseño de 5 años (afirmado) a 10 años (solución básica), y la posibilidad de programar las actividades de mantenimiento periódico en tiempos previsibles, lo que no ocurre actualmente con las capas de afirmado convencional (MTC, 2015).

La tabla siguiente contiene las especificaciones técnicas de los tipos de estabilizadores de suelos y los parámetros máximos y/o mínimos que deben cumplir los suelos estabilizados, tanto en el diseño como en la ejecución de una obra vial:

**Tabla 30.** Especificaciones Técnicas de tipos de estabilizadores y parámetros

Suelo estabilizado con	Parámetros
Cemento	1. Resistencia a compresión simple = 1.8 MPa mínimo (MTC E1103)
	2. Humedecimiento – secado (MTC E 1104): - Para suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A-3 = 14% de Pérdida Máxima.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para suelos A-2-6; A-2-7; A-4; A5 = 10% de Pérdida Máxima.</li> <li>- Para suelos A-6; A-7 = 7% de Pérdida Máxima</li> </ul>
Emulsión Asfáltica	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estabilidad Marshall =230 Kg mínimo (MTC E 504).</li> <li>2. Pérdida de estabilidad después de saturado = 50% máximo.</li> <li>3. Porcentaje de recubrimiento y trabajabilidad de la mezcla debe estar entre 50 y 100 %</li> </ol>
Cal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. CBR* = 100% mínimo (MTC E 115, MTC E 132)</li> <li>2. Expansión <math>\leq</math> 0.5%</li> </ol>
Sales	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. CBR* = 100% mínimo, CBR no saturado (MTC E 115 E 132)</li> </ol>
Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. CBR* = 100% mínimo (MTC E 115, MTC E 132)</li> <li>2. Expansión <math>\leq</math> 0.5%</li> </ol>

(\*) CBR corresponde a la penetración de 0.1”

**Fuente:** Resolución Directoral N° 003-2015-MTC/14. (E.P. 6 /02/15)

(Torrente & Sagues, 1974), menciona que “Existen en la práctica diversos métodos para estabilizar los suelos; cada método, utiliza diferentes agentes estabilizadores, entre los que se pueden encontrar: La cal, el cloruro de sodio, el cemento, los asfaltos, las imprimaciones reforzadas, la Bischofita entre otros; incluso se ha utilizado la combinación de diferentes productos estabilizadores, así como la mezcla de suelos con el fin de dar soluciones óptimas a problemas particulares. Según el Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas, la capacidad portante o CBR (California Bearing Ratio) de los materiales de las capas de subrasante y del afirmado, deberá estar de acuerdo a los valores de diseño; no se admitirán valores inferiores. En consecuencia, sí

los materiales a utilizarse en la carretera no cumplen las características generales previamente descritas, se efectuará la estabilización correspondiente del suelo. De esta forma, se podrán utilizar suelos de características marginales como subrasante o en capas inferiores de la capa de rodadura y suelos granulares de buenas características, pero de estabilidad insuficiente (CBR menor al mínimo requerido) en la capa de afirmado. La estabilización puede ser granulométrica o mecánica, conformada por mezclas de dos o más suelos de diferentes características, de tal forma que se obtenga un suelo de mejor granulometría, plasticidad, permeabilidad o impermeabilidad, etc. También la estabilización se realiza mediante aditivos que actúan física o químicamente sobre las propiedades del suelo.” (Torrente & Sagúes, 1947), (Salas, 2018).

Para el diseño de la estructura del pavimento de estos tipos de vías, a partir de la determinación del CBR, se evalúa el método sugerido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), El procedimiento de este método se basa en ecuaciones que permiten determinar el espesor de material requerido sobre una capa o subrasante de un CBR conocido. La condición es que el CBR del material de la capa superior sea mayor que el de la subyacente. El espesor del pavimento obtenido mediante este método es tal que permite un cierto número de repeticiones, antes que la estructura alcance un nivel de deformación que corresponda a una serviciabilidad baja. Este método ha sido desarrollado para los caminos de bajo tránsito con repeticiones de hasta 1'000,000 de ejes equivalentes de 18,000 libras (Pérez, 2012).

Para el diseño del pavimento de bajo volumen de tránsito se emplea el “Manual Para El Diseño de Carreteras No

Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito – MTC (2008)”. Teniendo en cuenta la capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima (Pérez, 2012).

#### **1.2.13.1 Estabilización de suelos para subrasante, sub base o base**

El principal fin de la estabilización es aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre partículas y asegurando que las condiciones de humedad del suelo varíen dentro de los rangos adecuados. Con esto se logran tres objetivos importantes: adecuada estabilidad ante las cargas, durabilidad de la capa y una variación volumétrica mínima. (Elizondo Arrieta & Sibaja Obando, 2008).

Se identifican en el manual del MTC cinco categorías de subrasante:

S0 : SUBRASANTE MUY POBRE CBR < 3%

S1 : SUBRASANTE POBRE CBR = 3% - 5%

S2 : SUBRASANTE REGULAR CBR = 6 - 10%

S3 : SUBRASANTE BUENA CBR = 11 - 19%

S4 : SUBRASANTE MUY BUENA CBR > 20%

**La base de un pavimento** es la capa de material que se construye sobre la sub base, que para que cumpla su función, debe tener:

- La resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos
- El espesor suficiente para que pueda resistir y transmitir las presiones a la sub base.

- No debe presentar cambios volumétricos perjudiciales (Mantener Estabilidad)

Los materiales con los que se construye son de mejor calidad que los de la sub base.

### 1.2.13.2 Características de materiales para subrasante, sub base y base

Las características de calidad que se buscan en los materiales para base, se muestran en la Tabla 31:

**Tabla 31.** Características de materiales para Base

<b>Características de materiales para Base de Pavimentos</b>	
Límite líquido máximo	25%
Índice plástico máximo	6%
Partículas alargadas	35%
Compactación	100%
Valor relativo de soporte estándar saturado	100 mín
Equivalente de arena	50 mín
Índice de durabilidad	40 mín

### 1.2.13.3 Estabilizador químico compuesto 100% por organosilanos

#### 1.2.13.3.1 Generalidades

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. (OPTIMASOIL, 2016).

#### **1.2.13.3.2 Distribución química de los organosilanos**

Los enlaces de carbono – silicio son más largos en comparación con los enlaces carbono – carbono (longitud de enlace de 180 a 154 del peso molecular) y son más débiles, con una energía de disociación del enlace de 451 kJ/mol frente a 607 kJ/mol. El enlace C- Si, está algo polarizado hacia el carbono debido a su mayor electronegatividad (C=2,55 va Si=1,90). Una manifestación de la polaridad de estos en los organosilanos se encuentra en la reacción de Sakurai, la misma que es la reacción química en donde se parte de un compuesto con un carbono electrofílico (comúnmente de una cetona) y se le hace reaccionar con alil silanos por catálisis con ácidos de Lewis fuertes (acepta un par de electrones al mismo tiempo, debe tener su octeto de electrones incompleto). (Butterwort, 1981).

Los Órgano – Silanos son solubles al agua, estables al calor, rayos UV y reaccionan con grupos de silanol propensos a humedecerse con el agua (hidrofílicos) como arena, limos, arcillas y agregados para convertirlos en uniones Alquil – Siloxano, que son altamente estables y que repelen el agua, formando una membrana transpirable in-situ. (BREM S.A.C. Environmental Solutions, 2016).

#### **1.2.13.3.3 Características físicas del Terrasil**

Forma	Líquida
Color	Rojizo pálido

Punto de inflamación	>90°C (recipiente cerrado)
Punto de ebullición	200°C
Propiedad Explosiva	No Explosivo
Densidad	1.04g/ml
Viscosidad (25°C)	100-500 cps

Nota: Las características son típicas, éstas pueden variar sin que se vea afectado el desempeño del producto.

#### **1.2.13.3.4 Beneficios del Terrasil en la estabilización de suelos**

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.

#### **1.2.13.3.5 Modo de acción, presentación y almacenamiento**

Terrasil es un aditivo modificador de suelos compuesto al 100% por órgano-silanos, soluble en agua, estable al calor y la radiación ultravioleta. Su principal acción, por tanto, consiste en la impermeabilización de suelos y subsuelos. (OPTIMASOIL, 2016).



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. (OPTIMASOIL, 2016).

La presentación de los productos se realiza en bidones de 20 kg. El producto es reactivo a la humedad. La exposición excesiva a la humedad puede conducir a un aumento de la viscosidad y gelificación.

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. No almacenar el producto después de la dilución en agua (OPTIMASOIL, 2016) .

#### **1.2.13.3.6 Dosificación recomendada de mezcla suelo – Terrasil**

Agua	Terrasil
Necesaria para alcanzar el Óptimo de compactación	0,2 – 2 kg/m <sup>3</sup>

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 realizadas a cada tipo de material, evaluando el costo - beneficio en cada proyecto.

**Tabla 32.** Dosificación Terrasil para ensayo CBR sugerida por fabricante

<b>Dosificación Terrasil para el ensayo CBR</b>					
Dosis Terrasil	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.75</b>	<b>1.0</b>	En lt/m3
Cantidad de material suelto	6000	6000	6000	6000	En Kg
Peso unitario suelto	2029	2029	2029	2029	En Kg/m3
Humedad natural	2.5	2.5	2.5	2.5	%
Humedad óptima de compactación	5.8	5.8	5.8	5.8	%
Agua necesaria	198	198	198	198	En gramos
Cantidad de Terrasil necesaria a adicionar al agua	<b>0.89</b>	<b>1.48</b>	<b>2.22</b>	<b>2.96</b>	Datos en gramos
Dosificación de Terrasil para riego de sellado	1/300	1/300	1/300	1/300	1 parte de Terrasil en 300 partes de agua
Riego de sellado con Terrasil	0.01	0.01	0.01	0.01	Dato en lt/m2, es decir 3 lt/m2 de la disolución 1/300

**Fuente:** BREM S.A.C. *Environmental Solutions. 2021*

#### 1.2.13.3.7 Protocolo de manipulación segura

##### **Manipulación segura**

Lavar exhaustivamente tras la manipulación. Evítese el contacto con los ojos y la piel.

Los recipientes que se abren deben volverse a cerrar cuidadosamente y mantener en posición vertical para evitar pérdidas (OPTIMAZOIL, 2016).

**Nota 1:** En caso de contacto por cualquier vía proporcionar atención médica. *Consulte la hoja de datos de seguridad.*

**Nota 2:** La información y sugerencias son hechas con

base en la experiencia e investigaciones realizadas, esta no implica una garantía ya que se recomienda que cada cliente realice las pruebas preliminares.

#### **1.2.13.3.8 Protocolo de ensayos de laboratorio con Terrasil**

Según la guía de laboratorio para ensayo CBR con Terrasil (BREM S.A.C. Environmental Solutions (2018), para la preparación de muestras con terrasil, seguir el siguiente procedimiento:

1. Preparación del agregado:
  - Secar el agregado
  - Calcular con el ensayo Proctor densidad y humedad óptima de compactación.
  
2. Preparación de la disolución
  - Verificación del estado de la muestra de Terrasil. Diluir 10ml de Terrasil en 100 ml de agua. Remover hasta su disolución. Un resultado transparente está OK; Un resultado turbio está MAL.
  - Cálculo de la dosificación. La proporción de empleo de Terrasil es de 0,5 – 1,0 kg/m<sup>3</sup> de material suelto a estabilizar. Si fuera necesario se puede añadir una cantidad de cemento entre 0,5 – 1,5%, dependiendo de las características del proyecto y los valores que se pretendan alcanzar en cada caso.
  - Preparación de la disolución. Diluir la cantidad previamente calculada de Terrasil en el agua necesaria para obtener el óptimo de

compactación.

### 3. Preparado de la probeta

- Mezclado del agua con Terrasil y el agregado. En una primera amasada se adiciona la solución en una cantidad de agua un poco más del 50% de la humedad óptima de compactación, sobre el suelo a tratar; y amasamos para que quede homogéneo. Luego adicionar la cantidad restante de solución, el 50% o un poco más de la disolución, para que el grado de humedad sea el óptimo en el momento de la compactación.
- Compactación de la probeta.
  
- Riegos de la probeta con dosificación de Terrasil 1:300. 3 litros/m<sup>2</sup> en dos fases. Sumergir la probeta terminada en la disolución 1:300 previamente preparada y sacar. Dejar secar completamente la superficie y volver a sumergir en una disolución 1:300 previamente preparada. Dejar secar completamente.

### 4. Curado de las muestras

- Curar las muestras al aire libre (a temperatura ambiente), durante siete días, Controlar la pérdida de humedad con pesado y luego sumergirlas por 4 días, (inmersión de las probetas), para cumplir el ensayo C.B.R.

### 5. Rotura y ensayo de las muestras

- Inmersión de las probetas y rotura conforme al protocolo de CBR

### **1.2.13.3.9 Impermeabilización de suelo existente con Terrasil**

#### **1. Dosificación de riegos**

Agua	Terrasil	Dosificación
300 litros	1 kg	0,01 kg/m <sup>2</sup>

Aplicar sobre la superficie compactada con 3 l/m<sup>2</sup> de la disolución en dos fases.

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

#### **2. Pasos a seguir en el proceso de impermeabilización**

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/m<sup>2</sup> 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

Las gotas de agua depositadas sobre suelos tratados con Terrasil, debido a la inexistencia de grupos polares en la superficie de estos suelos, dichas 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 (repelencia de la gota es total (OPTIMASOIL, 2016)).

### **3. Comprobación de la impermeabilización**

Antes de la aplicación, comprobar la permeabilidad en una zona mediante el Test de RILEM.

Después del secado realizar el Test de RILEM en la superficie tratada, y se observará reducción en la tasa de percolación frente a la primera prueba.

#### **Test de RILEM**

- Limpiar la superficie

- Fijar la arcilla alrededor del tubo RILEM, colocar en superficie de la carretera y presione la arcilla fuertemente.
- Llenar de agua el tubo RILEM con cuentagotas hasta el nivel. En el caso de aparición de burbujas de aire eliminar por gotero.
- Inicie el cronómetro y registrar el tiempo que tarda en bajar el agua por debajo del nivel a partir de los 4 ml.
- La duración del ensayo es de 20 minutos después del tratamiento aumentar la duración del ensayo RILEM 1 hora para simular condiciones de fuertes lluvias.

#### **1.2.14 Proceso de estabilización de base de pavimento con Terrasil**

##### **1.2.14.1 Escarificación y pulverización inicial**

La subrasante, la sub base o la capa base de la estructura del pavimento puede ser escarificada a la profundidad y ancho especificados y luego pulverizarse parcialmente. Es deseable remover los materiales que no sean suelos y que sean mayores que 3 pulgadas, como troncos, raíces, césped y piedras (Manual de Estabilización de Suelo tratado con Cal, 2004).

Una subrasante escarificada o pulverizada ofrece más área de contacto superficial de suelo para la aplicación de solución de terrasil como impermeabilizante o riego de curado.

##### **a. Equipo necesario para la escarificación**

Motoniveladora con escarificador o escarificador de discos; estabilizadora de suelos para pulverización

inicial.

#### **1.2.14.2 Aplicación del Terrasil**

Previamente a su aplicación - antes de comenzar - debe comprobarse la calidad del agua (TDS hasta 1000 ppm). Si no se cuenta con esta información, hacer una solución de 1ml de Terrasil y 10 ml de agua para formar una solución transparente. En caso de que la solución salga blanquesina no proceda a la aplicación y póngase en contacto con el representante de Zydex (Optimasoil, 2016).

##### **a. Equipo necesario para la aplicación**

Camión cisterna o equipo de agua para hacer la solución  
Cisterna de agua con pulverizador (la cisterna debe estar limpia).

Fuente de agua potable (TDS hasta 1000 ppm).

Equipo de seguridad (cascos, chaleco de seguridad...).

##### **b. Preparación de la solución**

Preparar una solución de agua con Terrasil.

Por ejemplo, para riegos de impermeabilización se mezclará en la proporción 1litro de Terrasil cada 300 litros de agua.

Se recomienda llenar el tanque o la cisterna con el agua necesaria y añadir posteriormente la cantidad de Terrasil previamente calculada.

Mezclar con movimiento previo a su aplicación



### c. Periodo de fraguado

La mezcla de suelo y Terrasil debería fraguar suficientemente para permitir la reacción química que cambia las propiedades del material. La duración de este período de fraguado debería basarse en el juicio de ingeniería y depende del tipo de suelo. El período de fraguado, comúnmente, es de 1 a 7 días. Después del fraguado, el suelo deberá ser mezclado, de nuevo, antes de la compactación. Para suelos con Índice de Plasticidad bajos, o cuando el objetivo es el secado o la modificación, por lo general, el fraguado no es necesario. (Manual de Estabilización de Suelo tratado con Cal, 2004).

### d. Mezcla final y pulverización

Para alcanzar la estabilización completa, es esencial una adecuada pulverización final de la fracción arcillosa y la completa distribución del Terrasil dentro del suelo.

Las verificaciones periódicas de los resultados se efectuarán según lo indica la Tabla 301.C-01 del Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” (EG – 2013) (MTC, 2013); y, deberán satisfacer las exigencias indicadas en la Subsección 301.C.02 referida a Suelos de la misma Norma (EG – 2013).

**Tabla 33.** Tabla 301.C -01, (Ensayos y Frecuencias para suelo estabilizado con productos químicos)

<b>Propiedades y características</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Frecuencia (1)</b>	<b>Lugar de muestreo</b>
Granulometría	MTC E 107	750 m3	Pista
Índice plástico	MTC E 111	750 m3	

Relación densidad - Humedad	MTC E 115	500 m3	
CBR	MTC E 132	500 m3	
Compactación	MTC E 117	Cada 250 m3	
Abrasión	MTC E 124	2000 m3	
Durabilidad (2)	MTC E 207	2000 m3	

**Fuente:** (MTC, 2013)

(1) O antes, si por su génesis, existe variación estratigráfica horizontal y vertical que originen cambios en las propiedades físico – mecánicas de los agregados. En caso de que los metrados del Proyecto no alcancen las frecuencias mínimas especificadas se exigirá como mínimo un ensayo de cada propiedad y/o características.

(2) Ensayo exigido para capas estructurales en zonas con altitud mayor a 3000msnm

## **1.2.15 Jerarquización vial y clasificación de carreteras en el Perú**

### **1.2.15.1 Jerarquización vial**

El artículo 16 de la Ley N° 27181, Ley General de Transporte y Tránsito Terrestre, establece que el Ministerio de Transportes y Comunicaciones es el órgano rector a nivel nacional en materia de transporte y tránsito terrestre, correspondiéndole dictar los reglamentos nacionales establecidos en la Ley. Por Decreto Supremo N° 017-2007-MTC, se aprobó el Reglamento de Jerarquización Vial, el cual tiene por objeto establecer los criterios de clasificación de vías destinados a orientar las decisiones de inversión y operación de éstas, así como los criterios para la declaración de áreas o vías de acceso

restringido; señalando que la Jerarquización Vial es el ordenamiento de las carreteras que conforman el Sistema Nacional de Carreteras (SINAC), en niveles de jerarquía, debidamente agrupados sobre la base de su funcionalidad e importancia. (Resolución Ministerial N° 997-2020-MTC/01.02, de 23 diciembre de 2020)

Los artículos 4 y 6 del Reglamento, establecen que el SINAC se jerarquiza en tres redes viales, que están a cargo de las autoridades competentes de los niveles de gobierno que corresponden a la organización del Estado, de forma que: (i) El Ministerio de Transportes y Comunicaciones, por el Gobierno Nacional, está a cargo de la Red Vial Nacional; (ii) Los Gobiernos Regionales a cargo de la Red Vial Departamental o Regional; y, (iii) Los Gobiernos Locales a cargo de la Red Vial Vecinal o Rural. (Resolución Ministerial N° 997-2020-MTC/01.02, de 23 diciembre de 2020).

El literal a) del artículo 8 del Reglamento de Jerarquización Vial, señala que son parte de la Red Vial Nacional, las carreteras que cumplan con cualesquiera de los siguientes criterios: (1) Interconectar al país longitudinalmente o transversalmente, permitiendo la vinculación con los países vecinos, (2) Interconectar las capitales de departamento, (3) Interconectar dos o más carreteras de la Red Vial nacional, (4) Soportar regularmente el tránsito de larga distancia nacional o internacional de personas y/o mercancías, facilitando el intercambio comercial interno o del comercio exterior, (5) Articular los puertos y/o aeropuertos de nivel nacional o internacional, así como las vías férreas nacionales, y (6) Interconectar los principales centros de producción con los principales centros de consumo. (Resolución Ministerial N° 997-2020-MTC/01.02, de 23 diciembre de 2020)

El artículo 15 del Reglamento, señala que el Clasificador de Rutas es el documento oficial del SINAC, a través del cual, las rutas se encuentran clasificadas en Red Vial Nacional, Red Vial departamental o regional y Red Vial Vecinal o Rural, incluye el Código de Ruta según los puntos o lugares principales que conecta (Resolución Ministerial N° 997-2020-MTC/01.02, de 23 diciembre de 2020).

### 1.2.15.2 Clasificación de carreteras

Las carreteras se clasifican según: su función, su demanda, su condición geográfica y según el tipo de superficie de rodadura.

**Tabla 34.** Clasificación de Carreteras según su Función

CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS SEGÚN SU FUNCIÓN	
TIPO DE RED	
RED	DESCRIPCIÓN
Red Vial Primaria	Se denomina en el Perú como Sistema Nacional, conformado por carreteras que unen las principales ciudades de la nación con puertos y fronteras.
Red Vial Secundaria	Se denomina en el Perú como Sistema Departamental, constituyen la red vial circunscrita principalmente a la zona de un departamento, división política de la nación, o en zonas de influencia económica; constituyen las carreteras troncales departamentales.
Red Vial Terciaria o local	Se denomina en el Perú como Sistema Vecinal compuesta por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caminos troncales vecinales: interconectando pequeñas poblaciones.</li> <li>• Caminos rurales alimentadores: interconectando aldeas y pequeños asentamientos poblacionales.</li> </ul>

**Fuente:** MTC. 2020.

**Tabla 35.** Clasificación de Carreteras según su Demanda

<b>CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS SEGÚN SU DEMANDA</b>	
	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Autopistas	Carretera de IMDA mayor de 4000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles, con control total de los accesos (ingresos y salidas) que proporciona flujo vehicular completamente continuo. Se le denominará con la sigla A.P.
Carreteras duales o multicarril.	De IMDA mayor de 4000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles; con control parcial de accesos. Se le denominará con la sigla MC (Multicarril).
Carreteras de 1ra. Clase	Son aquellas con un IMDA entre 4000-2001 veh/día de una calzada de dos carriles (DC).
Carreteras de 2da. Clase	Son aquellas de una calzada de dos carriles (DC) que soportan entre 2000-400 veh/día.
Carreteras de 3ra. Clase	Son aquellas de una calzada que soportan menos de 400 veh/día.
Trochas carrozables	Es la categoría más baja de camino transitable para vehículos automotores. Construido con un mínimo de movimiento de tierras, que permite el paso de un solo vehículo

**Fuente:** MTC. 2020.

**Tabla 36.** Clasificación de Carreteras según su Condición Geográfica

<b>CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS SEGÚN SU CONDICIÓN GEOGRÁFICA</b>	
	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Carreteras Tipo 1</b>	Permite a los vehículos pesados mantener, aproximadamente la misma velocidad que la de los vehículos ligeros. La inclinación transversal del terreno, normal al eje de la vía, es menor o igual a 10%.
<b>Carreteras Tipo 2</b>	Es la combinación de alineamiento horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a reducir sus velocidades significativamente por debajo de las de los vehículos de pasajeros, sin ocasionar el que aquellos

	operen a velocidades sostenidas en rampa por un intervalo de tiempo largo. La inclinación transversal del terreno, normal al eje de la vía, varía entre 10 y 50%.
<b>Carreteras Tipo 3</b>	Es la combinación de alineamiento horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a reducir a velocidad sostenida en rampa durante el recorrido de distancias considerables o a intervalos frecuentes. La inclinación transversal del terreno, normal al eje de la vía, varía entre 50 y 100%.
<b>Carreteras Tipo 4</b>	Es la combinación de alineamiento horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a operar a menores velocidades sostenidas en rampa que aquellas a las que operan en terreno montañoso, para distancias significativas o a intervalos muy frecuentes. La inclinación transversal del terreno, normal al eje de la vía, es mayor de 100%.

**Fuente:** MTC. 2020.

Según el tipo de **superficie de rodadura**, las carreteras pueden clasificarse en pavimentadas y no pavimentadas.

**Tabla 37.** Clasificación de Carreteras según su Tipo de Superficie de Rodadura

<b>CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS SEGÚN SU TIPO DE SUPERFICIE DE RODADURA</b>	
<b>CARRETERAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Pavimentadas	Vías que tienen una estructura formada por una o más capas de materiales seleccionados y eventualmente tratados (pavimento), que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de proveer una superficie de rodadura adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que soporta las solicitaciones que impone el tránsito.
No pavimentadas	Vías que tienen una capa delgada de asfalto o estabilizadas mediante aditivos, pero que no pasaron por un proceso de pavimentación. El manual de diseño para carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito,

	<p>ha considerado que básicamente se utilizarán los siguientes materiales y tipos de superficie de rodadura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras de tierra constituidas por suelo natural y mejorado con grava seleccionada por zarandeo.</li> <li>• Carreteras gravosas constituidas por una capa de revestimiento con material natural pétreo sin procesar, seleccionado manualmente o por zarandeo y de 75 mm de tamaño máximo.</li> <li>• Carreteras afirmadas constituidas por una capa de revestimiento de materiales de cantera, dosificados naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo 25mm.</li> <li>• Afirmados con gravas naturales o zarandeadas.</li> <li>• Afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado.</li> <li>• Carreteras con superficie de rodadura estabilizada con materiales industriales: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grava con superficie estabilizada con materiales como: cal, aditivos químicos y otros.</li> <li>• Suelos naturales estabilizados con: material granular y finos ligantes, cal, aditivos químicos y otros.</li> </ul> </li> </ul>
--	---

**Fuente:** MTC. 2020.

## **1.2.16 Gestión del sistema vial carretero peruano**

### **1.2.16.1 Red vial carretero**

La red vial en el Perú está compuesta por más de 78,000 km de carreteras, organizada en tres grandes grupos: las carreteras longitudinales, las carreteras de penetración y las carreteras de enlace. Estas rutas están a cargo de PROVIAS, organismo descentralizado del Ministerio de Transportes y

Comunicaciones, que tiene la función mantener y ampliar dichas vías. Por la calidad y el tipo de vehículos que las recorre podemos clasificarla en 3 categorías: autopistas, carreteras asfaltadas y caminos afirmados.

**Tabla 38.** Longitud de la red vial, según tipo de superficie de rodadura y sistema de carretera, periodo 2005-2008 (kilómetros).

<b>Tipo superficie de rodadura</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<b>Sistema de carretera</b>				
Total	1944.33	1944.33	1398.98	<b>1398.98</b>
<b>Nacional</b>	458.116	458.116	642.866	<b>642.866</b>
<b>Departamental</b>	257.87	257.87	124.62	<b>124.62</b>
<b>Vecinal</b>	1228.35	1228.35	631.5	<b>631.5</b>
Asfaltado				
<b>Nacional</b>	357.126	357.126	357.126	<b>357.126</b>
<b>Departamental</b>	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
<b>Vecinal</b>	50.7	50.7	66.6	<b>66.6</b>
Afirmado				
<b>Nacional</b>	0.00	0.00	51.5	<b>51.5</b>
<b>Departamental</b>	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
<b>Vecinal</b>	105.7	105.7	58.8	<b>58.8</b>
Sin afirmar				
<b>Nacional</b>	70.79	70.79	204.04	<b>204.04</b>
<b>Departamental</b>	257.865	257.865	124.615	<b>124.615</b>
<b>Vecinal</b>	66.90	66.90	66.90	<b>66.90</b>
Trocha				
<b>Nacional</b>	30.2	30.2	30.2	<b>30.2</b>
<b>Departamental</b>	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
<b>Vecinal</b>	<b>905.05</b>	<b>905.05</b>	<b>439.2</b>	<b>439.2</b>

**Fuente:** Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Dirección General de Caminos y Ferrocarriles

**Nota:**

(\*) Red Nacional, está conformada por las grandes rutas longitudinales (Panamericana, Carretera de la Sierra o Andina y Marginal de la



Selva) y las rutas transversales.

(\*\*) Red Departamental, está conformada por carreteras que constituyen la red vial circunscrita a la zona de un departamento, uniendo las principales capitales de provincia de ese departamento.

(\*\*\*) Red Vecinal, llamada también Camino Rural, está constituida por caminos que comunican pueblos o caseríos pequeños.

**Tabla 39.** Evolución de la Red Vial Peruana

<b>Año</b>	<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>
<b>Miles de Km</b>	69,94	69,94	69,94	69,94	69,94	69,94	69,94	69,94	69,94	73,44
<b>Año</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>
<b>Miles de Km</b>	73,77	75,73	78,11	78,13	78,21	78,25	78,32	78,40	78,40	78,51

*Fuente: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008.*

#### 1.2.16.2 Caminos de bajo volumen de tránsito

La Dirección General de Caminos y Ferrocarriles - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2006), define Los Caminos de Bajo Volumen de Tránsito como aquellos cuyo Índice Medio Diario (IMD) es menor a 400 vehículos por día.

Con la finalidad de regular en forma específica los rangos del tráfico de bajo volumen, las normas de caminos de bajo volumen de tránsito, considera la sub clasificación siguiente:

- a) T4: Tráfico de diseño con IMD entre 201 y 400 vehículos por día.
- b) T3: Tráfico de diseño con IMD entre 201 y 400 vehículos por día.
- c) T2: Tráfico de diseño con IMD entre 51 y 100 vehículos por día.

- d) T1: Tráfico de diseño con IMD entre 16 y 50 vehículos por día.
- e) T0: Tráfico de diseño con IMD menor a 15 vehículos por día.

Asimismo, está regulado que en la construcción y mantenimiento de estos caminos se debe priorizar el aprovechamiento de los recursos naturales de la región y privilegiar el uso de técnicas constructivas, métodos de conservación y mantenimiento con participación intensiva de mano de obra (MTC, 2006). Para el caso de proyectos de carreteras con un IMD menor a cincuenta vehículos por día, las exigencias del contenido de los estudios serán las mínimas requeridas para garantizar la seguridad del transporte, y proporcionales al volumen de la inversión de la obra.

### **1.2.16.3 Mantenimiento vial y clases de mantenimiento**

#### **1.2.16.3.1 Mantenimiento vial**

En forma general, se define el término «mantenimiento vial» como el “conjunto de actividades que se realizan para conservar en buen estado las condiciones físicas de los diferentes elementos que constituyen el camino y, de esta manera, garantizar que el transporte sea cómodo, seguro y económico. En la práctica lo que se busca es preservar el capital ya invertido en el camino y evitar su deterioro físico prematuro” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones: Manual técnico de mantenimiento rutinario para la red vial departamental no pavimentada).

#### **1.2.16.3.2 Clases de mantenimiento**

**Mantenimiento rutinario:** Es el conjunto de actividades que se ejecutan permanentemente a lo largo del camino y que se realizan en los diferentes tramos de la vía; estas actividades tienen como finalidad principal la preservación de todos los elementos del camino con la mínima cantidad de alteraciones o de daños y, en lo posible, conservando las condiciones que tenía después de la construcción o la rehabilitación. El mantenimiento rutinario es de carácter preventivo, por tal razón se incluyen como parte de éste; a las actividades de limpieza de las obras de drenaje, el corte de la vegetación y las reparaciones de los defectos puntuales de la plataforma, entre otras actividades. En síntesis, el mantenimiento rutinario como conjunto de actividades que se realizan en las vías con carácter permanente para conservar sus niveles de servicio, para lo cual se realizan actividades que pueden ser manuales o mecánicas -principalmente labores de limpieza, bacheo, perfilado, roce, eliminación de derrumbes de pequeña magnitud, etc. -; también incluye las actividades socio ambientales, de atención de emergencias viales menores y de cuidado y vigilancia de la vía (MTC, 2006).

**Mantenimiento periódico:** conjunto de actividades que se ejecutan en períodos, en general, de más de un año y que tienen el propósito de evitar la aparición o el agravamiento de defectos mayores, de preservar las características superficiales, de conservar la integridad estructural de la vía y de corregir algunos defectos puntuales mayores. Ejemplos de este mantenimiento son la reconfiguración de la plataforma existente y las reparaciones de los diferentes elementos físicos del camino. En otras palabras, el mantenimiento será periódico, cuando el conjunto de actividades programadas cada cierto período, se realizan en las vías para conservar sus

niveles de servicio; dichas actividades pueden ser manuales o mecánicas y están referidas principalmente a labores de desencalaminado, perfilado, nivelación, reposición de material granular, así como reparación o reconstrucción puntual de los puentes y obras de arte (MTC, 2006).

### **1.2.16.3.3 Mantenimiento de carreteras no pavimentadas**

En el Perú, las carreteras no pavimentadas, conforman el mayor porcentaje del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC), las cuales se caracterizan por tener una superficie de rodadura de material granular. Además, si se toma en consideración el Manual Técnico de Mantenimiento Rutinario para la Red Vial No Pavimentada se distingue dos tipos de trabajos en carreteras no pavimentadas.

La conservación de carreteras, se pueden efectuar a diferente nivel. En el primer nivel está la **conservación propiamente dicha**, en la cual las actuaciones no conducen a modificaciones sustanciales de los elementos de las carreteras. Dentro de esta conservación se realizan actuaciones periódicas que impiden la aparición de deterioros (conservación preventiva) o bien se actúa lo antes posible cuando estos deterioros ya aparecieron (conservación curativa). La conservación curativa puede dirigirse a la reparación de deterioros localizados (operaciones localizadas) o al tratamiento de tramos de una longitud apreciable (operaciones generales). Dado que la conservación vial involucra muchas actividades; una de las más importantes es capacitar técnicamente a quienes tienen la tarea de hacerlo y organizar su esfuerzo lo cual por su naturaleza es una tarea permanente; asimismo, iniciar oportunamente la ejecución misma de las obras de

conservación. MTC (2006), indica: como se señaló en las líneas precedentes, la conservación vial, está a cargo del Estado, en sus diversos niveles de gobierno; luego, para lograr proteger las carreteras, las autoridades y/o entidades competentes o responsables de la conservación de las obras viales - según el tipo de red vial-, son:

- Para Red Vial Nacional: El Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Para Red Vial Departamental o Regional: El Gobierno Regional a través de su unidad ejecutora de la Gestión Vial; y
- Para Red Vial Vecinal o Rural: Los gobiernos locales a través de sus unidades ejecutoras de gestión vial.

En un segundo nivel de la conservación de carreteras no pavimentadas se sitúan las rehabilitaciones. En general, se recurre a éstas, cuando el paso del tráfico y las acciones climáticas han provocado una disminución apreciable de las características iniciales o cuando se quiere hacer frente a nuevas solicitudes no contempladas con anterioridad. Las rehabilitaciones de una carretera no pavimentada incluyen actuaciones de carácter extraordinario —a menudo de aplicación general—, en un tramo de longitud apreciable y cuyo objetivo es un aumento significativo del índice de estado o de comportamiento de la carretera (MTC, 2006). Las rehabilitaciones pueden referirse a:

- Rehabilitaciones superficiales; cuando se trata de rehabilitaciones o renovaciones superficiales. Por ejemplo: Disminuir o eliminar el nivel de polvo que empieza a presenciarse luego de un tiempo después de haberse aplicado el estabilizador.
- Rehabilitaciones significativas. Por ejemplo: Cuando se

opta por cambiar el aditivo estabilizador por otro.

- Rehabilitaciones estructurales; las que se llevan a cabo habitualmente con el fin de producir un aumento significativo de la capacidad estructural de la carretera. Por ejemplo: Cuando se ensancha la carretera o se opta por la pavimentación.

### 1.3 Definición de términos básicos

**Arena:** Fracción que pasa el tamiz de 75mm (3 pulg) y es retenido en el tamiz N° 10 (2mm). Arena gruesa: 2mm – 0.2mm; arena fina: 0.2mm – 0.05mm.

**Arcilla:** Fracción que pasa el tamiz N° 200. Tamaño menor a 0.005mm.

**Limo:** Fracción que pasa el tamiz N° 200. Tamaño entre 0.05 – 0.005mm

**Límite líquido:** Contenido de humedad con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De esta forma, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte y según Atterberg es de 25 g/cm<sup>2</sup>.

**Límite plástico:** Contenido de humedad, expresado en tanto por ciento, con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico. El límite plástico se determina con el material sobrante del límite líquido y al cual se le evapora humedad por mezclado hasta obtener una mezcla plástica que sea moldeable. Se forma una pequeña bola que deberá rodillarse enseguida aplicando la suficiente presión a efecto de formar filamentos.

**Prueba Proctor:** Esta prueba determina el peso por unidad de volumen de un suelo que, ha sido compactado por el procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Se refiere a la Prueba Proctor estándar y Prueba Proctor modificado.

**Prueba Proctor estándar:** Esta prueba tiene como finalidad determinar el peso volumétrico seco máximo de compactación Proctor y la humedad óptima en los suelos con material mayor de 3/8" y los cuales no se les puede hacer la prueba Proctor. Esta prueba sirve también para determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.

**Prueba Proctor modificado:** Aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está más de acuerdo con las solicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo.

**Valor relativo de soporte:** Es un índice de resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y humedad de los suelos de subrasante y de las capas de subbase, base y afirmado de un pavimento.

**Subrasante:** Se define así al terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un relleno debidamente compactado.

**Estabilización de suelos:** proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que, podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

**Suelo arcilloso:** El suelo arcilloso es aquél en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños. La arcilla es un conjunto de partículas minerales muy pequeñas, de menos de 0,001 mm de diámetro, en contraposición a otras partículas más grandes como son el limo y la arena, por orden de tamaño, de menor a mayor. El término arcilloso (clayey) es aplicado cuando la fracción de finos tiene un índice de plasticidad de 11 o mayor.

**Suelo limoso:** El término limoso (silty) es aplicado cuando la fracción de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor.

**Suelos A-2-4 y A-2-5:** Mezclas mal proporcionadas de grava, arena, limo y arcilla. Tienen material fino (limo y arcilla) en exceso a los límites establecidos por los suelos A-1 y A-3.

Materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5, respectivamente, es decir mismos rangos en el límite líquido e índice de plasticidad. Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos (arena gruesa), que tengan un contenido de limo, o índices de grupo por encima de los indicados para el grupo A-1. Así mismo incluyen a las arenas finas con un contenido de limo no plástico por encima de las limitaciones del grupo A-3.

El material A-2-4 es adecuado como subrasantes cuando están adecuadamente drenados y compactados bajo un espesor moderado de pavimento (base y carpeta de rodadura) de un tipo adecuado para el tráfico que soportará, o que puede adecuarse por adiciones de pequeñas cantidades de ligantes naturales o



artificiales. En todos los casos se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz N° 200 (0.0075mm) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es solo el 15% cuando se ve afectado por IP mayor que 10; asimismo, se supone que el LL igual o mayor que 40% es crítico, así como que un IP igual o mayor que 10% es crítico.

**Compresibilidad:** La compresibilidad es una propiedad donde se observa el cambio de volumen de la estructura de un suelo debido a las condiciones naturales y artificiales que se presenten.

**Contaminación ambiental:** Se denomina así a la cantidad de partículas sólidas suspendidas en el aire, disueltas en el agua o incorporadas a los alimentos que ingerimos.

**Contaminante químico:** Es toda sustancia orgánica e inorgánica, natural o sintética que, durante la fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso, puede incorporarse al aire en forma de polvo, humo, gas o vapor, con efectos irritantes, corrosivos asfixiantes o tóxicos y en cantidades que tengan probabilidades de lesionar la salud de las personas que entran en contacto con ellas.

**Crioscópico:** sustancia capaz de bajar el punto de congelación

**Erosión:** Es la acción de desgaste, acarreo o transporte y depositación de material intemperizado.

**Estabilidad volumétrica:** Es la propiedad que tiene un suelo de mantener constante su volumen.

**Floculación:** Proceso por el cual una sustancia dispersa coloidalmente se separa en forma de partículas discretas, y no como masa continua, de líquido que la contiene.

**Higroscópico:** Propiedad de algunos cuerpos inorgánicos, y todo los orgánicos, de absorber y extraer la humedad según las circunstancias que los rodean.

**Grava:** Partículas cuyo tamaño se encuentran entre 75mm – 2mm.

**Intemperismo:** se trata de un material que ha sido sometido a procesos de meteorización y/o erosión, es decir, que ha sido afectado por el agua, el viento, el sol, el hombre, etc., es decir que ha sufrido algún cambio, sea físico o químico de cómo era originalmente.

**Permeabilidad:** La permeabilidad de los suelos está definida por el contenido de vacíos en su estructura, es decir, el espacio comprendido entre sus partículas provocando la circulación del agua a través de sus poros.

**Polvo:** Suspensión en el aire de partículas sólidas de tamaño pequeño procedentes de procesos físicos de disgregación. La gamma de tamaños de las partículas de polvo es amplia, si bien, estos, fundamentalmente oscilan entre 0.1

**Punto de inflamación:** Temperatura mínima en la cual los vapores de la sustancia produce un encendido momentáneo bajo ciertas condiciones.

**Silicosis:** La silicosis es una enfermedad englobada dentro de las denominadas neumoconiosis, que son aquellas que se producen por la acumulación de polvo en el tejido pulmonar, en el cual se provoca una reacción de tipo no tumoral.

**Punto de Solubilidad:** Es el punto en el que algún producto se puede disolver.

**Rehabilitación de carreteras:** Proceso para reponer las características técnicas iniciales de construcción de una carretera.

**Subrasante:** Superficie terminada de las explanaciones, sobre la que se construirá la estructura del pavimento, por lo que se dice que es el suelo preparado para la fundación de la estructura superior del pavimento.

**Tensión superficial:** Fuerza de atracción entre las moléculas de la superficie de un líquido y de las moléculas por debajo de ellas que permite que los líquidos presentan una gran tendencia a formar gotas.

**Transporte terrestre:** Desplazamiento en vías terrestres, de personas y mercancías sobre un medio motorizado, no motorizado o a pie.

**Tránsito:** Conjunto de desplazamientos de personas, vehículos y animales por las vías terrestres de uso público (Circulación).

**Trocha carrozable:** Camino por donde circulan vehículos automotores, contruidos con un mínimo de movimiento de tierras, con una sección transversal que permiten el paso de un solo vehículo.

**Velocidad directriz o de diseño:** Máxima velocidad que pueda mantener con seguridad sobre una sección determinada de la vía, cuando las circunstancias sean favorables para que prevalezcan las condiciones del diseño.



## **2. Planteamiento del problema**

### **2.1. Descripción del problema**

Con frecuencia el ingeniero debe enfrentarse al suelo, a la vez, material y estructura de soporte; y, cuyas características le obligan, según ingenieros, entre ellos Gárnica, P. et al (2002), Vásquez (2010), y muchísimos otros más, a tomar alguna de las siguientes posibles decisiones:

- Aceptar el material en las condiciones que se lo encuentra, pero teniendo en cuenta en el diseño las restricciones impuestas por su calidad.
- Eliminar el material insatisfactorio o abstenerse de usarlo, sustituyéndolo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades físicas y/o químicas del material para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados o, cuando menos, que la calidad obtenida sea adecuada. Esta última posibilidad es la que según Montejo (2008) conlleva a la estabilización de suelos.

La construcción de la infraestructura vial es muy importante para el desarrollo de los pueblos. Durante la ejecución de este tipo de obras, el ingeniero peruano se encuentra con el problema de la diversidad de tipos de suelos presentes en la sub rasante, así como de materiales escasos o inexistentes para conformación de las diferentes capas de la estructura del pavimento. Cada tipo de suelo presenta problemas particulares de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas, de resistencia y a su vez todas éstas varían dependiendo del clima del lugar (Ugaz, 2006). La inestabilidad de los suelos es uno de los principales problemas que presentan las carreteras no pavimentadas, las mismas que son de gran importancia en el desarrollo local, regional y nacional, por cuanto el

mayor porcentaje de la vialidad se encuentra en esta categoría; y, en la sierra y selva tienden a deteriorarse en forma acelerada debido principalmente a la presencia de lluvias. La consistencia de la capa de afirmado o base, no sólo es vulnerable a los factores climáticos sino también a la acción física de los vehículos; así, en estaciones secas las partículas de la superficie de rodadura llegan a pulverizarse bajo la acción abrasiva de los neumáticos, iniciándose el deterioro progresivo de la superficie y la emisión de polvo que afecta la salud de los pobladores que habitan cerca al eje de este tipo de carreteras; pero, en épocas de lluvia pierde la capacidad portante iniciándose fallas como ahuellamientos, surcos, baches, etc.; lo cual implican altos costos en el mantenimiento rutinario de la vía y afectaciones ambientales (Taípe y Pillaca, 2014).

La planeación, construcción y mantenimiento de las vías tienen costos muy altos cual fuese el nivel de su calidad y en ciertas ocasiones encarece, pues no en todos los lugares se encuentran materiales útiles para la construcción, haciéndose necesario transportar materiales desde lugares muy alejados, para cumplir las exigencias normativas. Por otra parte, el funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción vial depende de la calidad de los suelos subyacentes; éstos influyen en el comportamiento de la estructura, así los suelos inestables pueden crear problemas significativos en los pavimentos, por tal motivo desde hace algunas décadas se ha tratado de realizar el mejoramiento de estos suelos empleando diversas técnicas de estabilización y diversos materiales, como cal, cemento Portland, aditivos, emulsiones, enzimas, geomallas, etc (Martínez, 2012).

El comportamiento de los suelos influye en el comportamiento de la estructura del pavimento de las carreteras, entonces, resulta importante conocer si las propiedades y características de éste, son

apropiadas, de no ser así se recurren a métodos de mejoramiento de los materiales del terreno de fundación, subbase y base, denominados estabilización de suelos. Una de las formas de estabilización de suelos, es aquella que se realiza utilizando productos químicos no tóxicos que dotan a los suelos de las carreteras un mejor comportamiento en el servicio al incrementar de manera notoria su resistencia y capacidad de carga y disminuyendo su sensibilidad al agua y a los cambios volumétricos durante el ciclo de humedecimiento y secado; para tal efecto existen en el mercado, diversas empresas dedicadas a la comercialización de productos químicos estabilizadores tales como, enzimas orgánicas, aceites sulfonados, compuestos inorgánicos, cloruros, etc., cuya aplicación resulta favorable en otros países, pero al emplearlos en nuestro territorio, no siempre los resultados son óptimos, transformándose posteriormente en soluciones antieconómicas y a veces en desperdicio del dinero público (Ugaz, 2006), (Cristobal, 2015).

En este contexto, Vásquez (2010), señala que la estabilización significa entonces, no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, que implica la mejora de las propiedades de estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad y compresibilidad, sino también asegurar la permanencia de ese estado a través del tiempo, es decir, la durabilidad. Este último aspecto tiene fundamental importancia en el comportamiento de la vía, pues, de su existencia, depende la existencia del primero (Márquez, 2005), (Martínez, 2011).

En la actualidad, se viene desarrollando el uso y estabilización de suelos, alrededor de todo el mundo, con el fin de obtener una mayor durabilidad de los materiales que conforman la estructura del pavimento, además de tener capas de mayor capacidad de soporte y que de igual forma sean más resistentes a los agentes

atmosféricos; y, hace más de 30 años que las técnicas de modificación de los suelos se han convertido en una parte importante de la práctica de la ingeniería civil (Hausmann, 1990). El mejoramiento de las zonas con presencia de arcilla débil o compresible se hace comúnmente mediante la eliminación de los suelos arcillosos de baja capacidad de soporte y se reemplazan por otros más competentes, tales como la grava arenosa compactada, piedra triturada, o agregados livianos para aumentar la capacidad de carga (Kukko, 2000). Aunque esto, se considera una buena solución, por lo general tiene el inconveniente de alto costo debido al material de reemplazo; entonces, se considera una solución más rentable, el uso de aditivos derivados de la combustión de carbón, como cenizas volantes u otros procesos de **estabilización química** de mejora de las propiedades físicas y mecánicas tanto del suelo natural existente en las fundaciones, como de aquellos suelos de canteras de material de préstamo para las capas de sub base y base que conforman la estructura del pavimento.

No obstante la existencia de investigaciones y hasta algunos proyectos viales ejecutados con estabilización de suelos en Perú, se ha observado que cada caso presenta resultados particulares inherentes al tipo de suelo predominante en la región; para la Selva Baja Peruana, donde según Carrillo-Gil et al (1993) predominan los suelos residuales - suelos saprolíticos y lateríticos - no es posible todavía hacer generalizaciones que sean válidas universalmente por no existir suficiente conocimiento del suelo tropical, en especial con respecto a sus propiedades químicas y mineralógicas y a su comportamiento mecánico; y, por otro lado, los métodos de análisis de estabilidad aceptados por la comunidad geotécnica no conducen aún a resultados satisfactorios para estos materiales (Carrillo-Gil, 2016). Entonces, resulta importante conocer sí las propiedades y características del suelo son apropiadas, de no ser así plantear



alguno de los varios métodos de mejoramiento conocidos como los de estabilización de suelos, y de la existencia de una diversidad de productos químicos estabilizantes, no precisamente del tipo de los suelos residuales propios de nuestra Selva Baja, estimamos necesario realizar el estudio a nuestros suelos en estado natural y estabilizado con el producto químico Terrasil, aplicándose a los suelos existentes de la Cantera Milagritos III ubicada en los alrededores del caserío “Villa Milagritos”.

En el primer tramo del acceso al caserío Villa Milagritos, aproximadamente a 2.5 km del cruce de la carretera Iquitos – Nauta se encuentra la Clínica Oftalmológica Divino Niño Jesús, que presta servicios permanentemente a la población loreтана, sin embargo, su acceso es muy dificultoso, lo cual también constituye una justificación para el mejoramiento de esta vía de acceso, que está jerarquizada como ruta vecinal, y es de competencia Municipal. El terreno de fundación de la vía consta de tramos diferenciados de suelos arenosos y arcillosos con un ancho promedio de superficie de rodadura de 7.30m, el cual, como consecuencia de las constantes precipitaciones pluviales y tránsito vehicular y peatonal, así como el tiempo transcurrido de haberse rehabilitado y/o efectuado, no es transitable en forma permanente, requiriéndose trabajos de mantenimiento y mejoramiento (Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones – GORE Loreto, 2020).

Esta carretera tiene las siguientes características técnicas:

**Tabla 40.** Características técnicas de la vía de acceso “Villa Milagritos” (de 7.5 km aproximadamente)

Velocidad directriz	30 Km. /h.
Ancho promedio de plataforma	7.00 m.
Superficie de rodadura	Encalaminada.

Bermas laterales	Con maleza y arbustos.
Pendiente promedio	3 %
Alcantarillas	Obstruidas
Cunetas	Obstruidas
Longitud hasta Clínica de Ojo Divino Niño	2.50 km

**Fuente:** Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones – GORE Loreto, 2020.

Esta trocha carrozable actualmente se encuentra a nivel de subrasante y anualmente está sometido a mantenimiento rutinario, sufriendo erosión considerable por la pendiente natural que presenta y porque el agua de lluvia acumulada a ambos lados, escurren sobre ésta. Los suelos, según DRTC GORE Loreto (2020), en el primer tramo es arena blanquesina y en el segundo tramo es arena rojiza. Ante esta situación, es posible tomar la siguiente decisión: Mejorar el material areno limo arcilloso existente en un sector de Villa Milagritos denominado “Cantera Villa Milagritos III” para que sirva como material para conformar la capa base de la estructura de la plataforma; y, dada la cercanía de la cantera, considerarse estabilización de suelos in situ, para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Montejo (2008).

Por esta razón el presente trabajo se enfocará a evaluar los efectos del estabilizador químico: Terrasil, como estabilizante del material areno limo arcilloso de la cantera Villa Milagritos III para conformar la denominada capa base de la estructura de la plataforma de la carretera.

## **2.2. Formulación del problema**

Para contribuir en la solución de esta problemática existente, el problema queda formulado de la siguiente manera:

### **2.2.1. Problema general**

¿Cuáles son los efectos que produce la aplicación de estabilizantes químicos en el comportamiento de los suelos arena limo arcilloso en carreteras no pavimentadas en Selva Baja, y cómo realizar el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú 2021?

### **2.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son los efectos que producen los estabilizantes químicos en el comportamiento de suelos arena limo arcilloso en carreteras no pavimentadas en Selva Baja, a través de la aplicación alternativa de aditivo Terrasil en el suelo de la Cantera Milagritos III para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú 2021?
- ¿Cómo conocer el diseño óptimo para la dosificación del aditivo estabilizante Terrasil, para satisfacer el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo arena limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú 2021?
- ¿Cuáles son las ventajas técnicas, económicas y ambientales que ofrecen los proveedores del aditivo estabilizante Terrasil, para la estabilización química y mejoramiento del suelo arena limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021?

## **2.3. Objetivos**

### **2.3.1. Objetivo general**

Evaluar la realización de la estabilización química de suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja, mediante la aplicación del aditivo Terrasil en suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú, 2021.

### **2.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar los efectos de la aplicación de estabilizantes químicos en el comportamiento de suelos, a través de la aplicación del aditivo Terrasil, para estabilización del suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021.
- Probar varios diseños para conocer el diseño óptimo de dosificación del aditivo Terrasil, en la estabilización química del suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021.
- Describir las ventajas técnicas, económicas y ambientales que ofrecen los proveedores del aditivo Terrasil, para la estabilización química y mejoramiento del suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

“La aplicación del estabilizante químico Terrasil en el suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, mejora sus características físicas y Mecánicas convirtiéndolo en material apropiado para ser usado en la base de la vía de acceso “Villa Milagritos”.

## **2.5. Variables**

### **2.5.1. Identificación de variables**

**X1:** Base de suelos areno limo arcilloso en carreteras no pavimentadas en Selva Baja.

**Y1:** Estabilización química de suelos areno limo arcilloso de Cantera Milagritos III mediante aplicación del aditivo Terrasil.

### **2.5.2. Definición conceptual y operacional de las variables**

### **2.5.3. Operacionalización de las variables**

**Relación de Variables:**  $X1 \rightarrow Y1$

**Tabla 31.** Operacionalización de Variables

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Indices</b>	<b>Escala</b>
<p><b>Variable Independiente: X<sub>1</sub>:</b> Base de suelos areno limo arcilloso en carreteras no pavimentadas en Selva Baja. (Suelo areno limo arcilloso Convencional o patrón).</p>	<p>Físicas</p> <p>Mecánicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contenido de humedad.</li> <li>- Granulometría</li> <li>- Peso unitario</li> <li>- Peso específico</li> <li>- Próctor</li> <li>- California Bearing Ratio (CBR)</li> </ul>	<p>%</p> <p>%</p> <p>Kg/m<sup>3</sup></p> <p>Kg/m<sup>3</sup></p>	<p>Escala de calificación de intervalo</p>
<p><b>Variable Dependiente: Y<sub>1</sub>:</b> Estabilización química de suelos areno limo arcilloso de cantera Milagritos III mediante aplicación del aditivo Terrasil (Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas)</p>	<p>Aplicación en diferentes porcentajes de Terrasil</p> <p>Físicas</p> <p>Mecánicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porcentaje óptimo de aditivo estabilizante Terrasil.</li> <li>- Contenido de humedad.</li> <li>- Granulometría</li> <li>- Peso Unitario</li> <li>- Peso específico</li> <li>- Próctor</li> <li>- California Bearing Ratio (CBR)</li> </ul>	<p>%</p> <p>%</p> <p>%</p> <p>%</p> <p>%</p> <p>%</p>	<p>De razón</p>

### **3. Metodología**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

##### **3.1.1. Tipo de investigación**

El proyecto denominado “Estabilización química de suelos areno limo arcilloso en Selva Baja. Aplicación del aditivo Terrasil para mejoramiento de material de base en vía de acceso “Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021”, se desarrolló como un tipo de estudio explicativo, porque se centra en explicar lo que ocurre a la variable Independiente, después de aplicar en ella el aditivo Terrasil.

##### **3.1.2. Diseño de investigación**

###### **Experimental Transversal**

El grupo experimental estuvo conformado por los suelos areno limo arcilloso, de cinco (05) calicatas de hasta 1.50m de profundidad correspondientes a la Cantera Milagritos III.

La representación gráfica es la siguiente:

$$G_1: O_1 X O_2$$

Donde:

G1: Grupo Experimental

X: Estabilización del suelo areno limo arcilloso con Terrasil

O1: Test antes del experimento

O2: Test después del experimento

## 3.2. Población y muestra

### 3.2.1. Población

La población estará conformada por suelos areno limo arcilloso de Villa Milagritos del distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, región Loreto, los cuales serán sujetos a evaluación y análisis de sus propiedades físicas y mecánicas.

### 3.2.2. Muestra

Para la prueba de hipótesis, la cantidad de muestra se determinó a criterio no probabilístico, considerándose objeto de estudio cinco (05) calicatas de suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III con la cual se realizó ensayos adicionándolo porcentajes de Terrasil; así como porcentajes de terrasil y 0,5% de cemento portland, en la cantidad de muestras que se indica en las siguientes tablas.

**Tabla 41.** Cantidad de muestra por calicata

<b>Ensayo</b>	<b>Cantidad (Kg)</b>
<b>Contenido de humedad</b>	5.00 kg
<b>Límites de consistencia</b>	5.00 kg
<b>Granulometría</b>	10.00 kg
<b>Ensayo Próctor</b>	50.00 kg
<b>Ensayo CBR</b>	200.00 kg
<b>Total, por calicata</b>	270.00 kg



**Tabla 42.** Cantidad de muestras a ensayar

Variable/ Código	M1	M2	M3	M4	M5	Parcial
Especímenes Límite Líquido y Plástico	5	5	5	5	5	25
Especímenes densidad seca máxima	1	1	1	1	1	5
Especímenes CBR	2	2	2	2	2	10
Total de ensayos						40

### 3.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

#### 3.3.1. Técnicas de recolección de datos

**Tabla 43.** Fases de recopilación de datos

LA RECOPIACIÓN DE DATOS	
<b>Primera fase:</b> <b>Trabajo de campo</b>	Se tomaron las muestras de las calicatas de la Cantera Milagritos III en zonas aún no alteradas (muestras alteradas) y hasta a 1.50m de profundidad en un promedio de 270kg por calicata.
<b>Segunda fase:</b> <b>Trabajo de laboratorio</b>	Los ensayos a realizar son los conocidos como estándares y los denominados especiales.

**Tabla 44.** Coordenadas UTM de ubicación de Cantera

<b>Ubicación:</b> La cantera se encuentra ubicada a 8 km entrando a la derecha a partir de la altura del km 8.5 carretera Iquitos - Nauta					
COORDENADAS UTM. LADOS Y VÉRTICES					
Vértice	Norte (m)	Este (m)	Ángulo interno	Distancia	
				Lados	Longitud
1	9573230	683045		A-B	277.76 m
2	9573288	683311		B-C	225.60 m
3	9573098	683311		C-D	367.71 m
4	9572973	683087		D-A	267.04 m
			Suma ángulos internos del polígono:	Perímetro:	<b>1,138.11 m</b>

Área Explotable medida	76821m <sup>2</sup>
Situación actual	Sector aún no explotado
Propietario	Privada.
Profundidad de explotación (Potencia)	10.00 m
Volumen Explotable estimado	768210 m <sup>3</sup>

**Tabla 45.** Coordenadas de emplazamiento de calicatas

Coordenadas	Norte	Este
Calicata C-1	683363.42	9573121.92
Calicata C-2	683251.00	9573116.00
Calicata C-3	683220.94	9573207.93
Calicata C-4	683101.80	9573157.26

### 3.3.2. Instrumentos de recolección de datos

Los datos acerca de la efectividad del Terrasil como estabilizador químico, se determinará mediante ensayos realizados sobre probetas de suelos estabilizadas químicamente con este aditivo y sobre probetas del suelo natural de la Cantera Milagritos III; teniendo como criterio de efectividad, la mejora en una propiedad de desempeño de los resultados obtenidos de las probetas estabilizadas químicamente sobre las otras (Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Norma Técnica de estabilizadores químicos); pero también se recogerá información pertinente a través de la revisión bibliográfica de otras investigaciones relacionadas con aditivos químicos en la estabilización de carreteras no pavimentadas.

### 3.3.3. Laboratorios y Procedimientos a emplear

Las muestras representativas del suelo areno limo arciloso, y las mezclas de suelo cemento y suelo cemento adicionando Terrasil

serán sometidas a los ensayos, tanto estándares como especiales, siguientes:

**Tabla 46.** Ensayos a realizar en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de Materiales de Construcción de la UCP.

<b>Características</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Normas</b>
Físicas	Análisis Granulométrico por Tamizado	(MTC E 107-ASTM D 422)
	Humedad Natural	(MTC E 108-ASTM D2216)
	Límites de Atterberg - Límite Líquido	(MTC E 110-ASTM D4318)
	Límite Plástico	(MTC E 111-ASTM D4318)
	Índice de Plasticidad	(MTC E 111-ASTM D4318)
	Clasificación de Suelos método SUCS	(ASTM D2487)
	Clasificación de Suelos método AASHTO	(ASTM D3282)
Química	Determinación de pH del Suelo Natural	(ASTM D4972)
Mecánicas	Próctor Modificado	(MTC E 115-ASTMD1557)
	California Bearing Ratio	(MTC E 132-2000; ASTM D1883)

Los ensayos de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la Universidad Científica del Perú – UCP, de acuerdo a Normas ASTM; AASHTO y MTC, según el caso. Los resultados de estos ensayos se presentan en el Anexo correspondiente del Informe Final de la Tesis. Los análisis químicos pH y de materia orgánica en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana “UNAP”.

### 3.3.4. Materiales utilizados

**Tabla 47.** Materiales utilizados para desarrollar la tesis

Material	<b>Suelo areno limoso arcilloso de la cantera Milagritos III</b>
	Terrasil
	Agua potable

### 3.3.5. Equipos utilizados

**Tabla 48.** Equipos utilizados para desarrollar la tesis

Equipos	Descripción	
<b>Tamices</b>	Para análisis granulométrico mediante tamizado por lavado (ASTM 0421).	
<b>Balanzas electrónicas digitales.</b>	Estufa con control de temperatura. Taras de todos los tamaños.	Moldes de Proctor modificado. Martillo de 10 lb. Moldes para ensayo CBR. Equipo para ensayo CBR.

### 3.3.6. Descripción de Ensayos realizados: Para el suelo areno limo arcilloso con adición de Terrasil al 0 %

**Tabla 49.** Contenido de Humedad de suelo areno limo arcilloso cantera Milagritos III con adición Terrasil al 0 %

1	Determinación del contenido de humedad (W %): Norma ASTM D 2216-92; Norma MTC E 108-199; NTP 339-127.	
Material	Muestra alterada extraída de suelo de la cantera Milagritos III.	
Equipos	Los necesarios del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP	
Procedimiento	Según protocolos de ensayos del Laboratorio UCP	

**Tabla 50.** Análisis granulométrico de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%

2	Análisis Granulométrico mediante tamizado por lavado: Norma ASTM D 421.	
Material	Muestra seca aproximadamente 200 gr. (material arcilloso).	
Equipos	Los necesarios del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP	
Procedimiento	Según protocolos de ensayos del Laboratorio UCP	

**Tabla 51.** Análisis granulométrico con el hidrómetro de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%

3	Análisis Granulométrico con el hidrómetro: Norma ASTM D 422	
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muestra seca pulverizada 50 gr. (material arcilloso).</li> <li>- 125 cc de solución al 4% de exametafosfato de sodio (agente de floculante)</li> <li>- Agua destilada aprox. 1000 ml</li> </ul>	
Equipos	Los necesarios del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP	
Procedimiento	<p>Según protocolos de ensayos del Laboratorio UCP y/o:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se deja que el suelo se sature por lo menos 16 horas en el defloculante.</li> <li>- Después de este periodo de saturación se agrega agua destilada y la mezcla suelo-agente defloculante es agitada vigorosamente. La muestra se transfiere a una probeta de 1000 ml.</li> <li>- Se agrega más agua destilada a la probeta hasta la marca de 1000 ml y luego la mezcla se agita vigorosamente.</li> <li>- Colocar el hidrómetro dentro de la probeta para medir – generalmente durante un periodo de 24 horas – la densidad de solidos de la suspensión suelo- agua en la vecindad del su bulbo (Das, 2001)</li> </ul>	

**Tabla 52.** Análisis de Límite Líquido de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%

4	Límite Líquido 0 % de Terrasil: Norma ASTM D 4318; AASHTO T89; MTC E110-199; NTP 339-130.	
Material	Muestra seca que pasa tamiz N° 40.	

Equipos	Los necesarios del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP
Procedimiento	Según protocolos de ensayos del Laboratorio UCP

**Tabla 53.** Análisis de Límite Plástico de suelo areno limo arcilloso  
Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%

5	Límite Plástico 0 % de Terrasil: Norma ASTM D 4318; AASHTO T90; MTC E111-199.
Material	Muestra seca una porción.
Equipos	Los necesarios del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP
Procedimiento	Según protocolos de ensayos del Laboratorio UCP

**Tabla 54.** Compactación Proctor Modificado de suelo areno limo arcilloso  
Cantera Milagritos III con adición de Terrasil al 0%

6	Compactación Proctor Modificado 0 % de Terrasil: Norma ASTM D 1557; AASHTO T180; MTC E115-199.
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra alterada seca.</li> <li>• Papel filtro</li> </ul>
Equipos	Los necesarios del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP
Procedimiento	Según protocolos de ensayos del Laboratorio UCP

**Tabla 55.** Ensayo CBR de suelo areno limo arcilloso Cantera Milagritos  
III con adición de Terrasil al 0%

7	Ensayo CBR en laboratorio 0 % de Terrasil: Norma ASTM D 1883; ASTM D 4429-93; AASHTO T190.
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra alterada seca.</li> <li>• Papel filtro</li> </ul>
Equipos	<p>Equipo CBR (3 moldes cilíndricos con placa de base y collar de extensión; 3 discos espaciadores; 3 placas de expansión; sobrecarga cada una de 4.5 kg. de peso y 3 trípodes).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pisón Proctor modificado.</li> <li>• Balanza con aproximación de 1 gr</li> <li>• Estufa con control de temperatura.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula.</li> <li>• Probeta de 1000 ml.</li> <li>• Recipiente de 6 kg. de capacidad.</li> <li>• Taras identificadas.</li> </ul>
Procedimiento	Consta de 3 fases: ensayo de compactación CBR, ensayo de hinchamiento y ensayo carga- penetración. Ver Anexo

### **3.3.7. Ensayos para el suelo arena limo arcilloso con adición en diversos porcentajes de Terrasil**

Los procedimientos fueron los mismos indicados a realizar en el acápite Descripción de Ensayos con la diferencia que las muestras fueron alteradas con la adición de Terrasil en sus diversos tratamientos. La mezcla de los diferentes porcentajes de cemento se realizó manualmente y los porcentajes de Terrasil estan referidos en porcentaje del peso de la muestra seca.

Los cálculos de los ensayos para los diferentes tratamientos se presentan en la sección de anexos del Informe Final de Tesis.

### **3.4. Procesamiento y análisis de datos**

Para el procesamiento de datos se utilizó la Estadística Descriptiva y para el tratamiento de la información se aplicó el Análisis de Varianza.

En el proceso de la contrastación de la hipótesis se efectuó la prueba de normalidad por el método de Shapiro Wilk, y al verificarse que los resultados proceden de una distribución normal, se aplicó luego el análisis de varianza por el método de ANOVA.

## 4. Resultados y discusión de resultados

### 4.1. Resultados

El material natural a mejorar su estabilidad, es un suelo areno limo arcilloso de color anaranjado, húmeda, con porcentaje reducido de partículas finas, clasificada como SM según SUCS y según AASHTO como A-2-4 (0); contiene 18,48% de material fino que pasa la malla N° 200 y 9,23% de humedad natural y 5,94 de pH, en promedio. Los ensayos de límites de consistencia de este suelo indican que tiene: LL=36.90, LP=26.97, IP=9.93

	<b>UNAP</b> Universidad Nacional de la Amazonia Peruana Facultad de Ingeniería Química-FIQ					
"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"						
<b>CERTIFICADO DE ANALISIS</b>						
MUESTRA SOLICITADO	:	Material Arena Limo Arcilloso de cantera Sharon Julissa Manyama Solsol Andrew Miguel Najjar Tangoa				
ANALISIS SOLICITADO	:	Químico				
FECHA DE ENSAYO	:	23 de marzo de 2022				
<b>RESULTADO</b>						
<table border="1"><thead><tr><th>PARAMETRO</th><th>RESULTADO</th></tr></thead><tbody><tr><td>pH</td><td>5,94</td></tr></tbody></table>			PARAMETRO	RESULTADO	pH	5,94
PARAMETRO	RESULTADO					
pH	5,94					
Iquitos, 24 de marzo de 2022						
 ..... ROSA ISABEL SOUZA NAJAR DOCENTE ADSCRITO FIQ-UNAP	 ..... Dr. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFEN Decano FIQ-UNAP					



**Tabla 56.** Límite de Consistencia del material natural

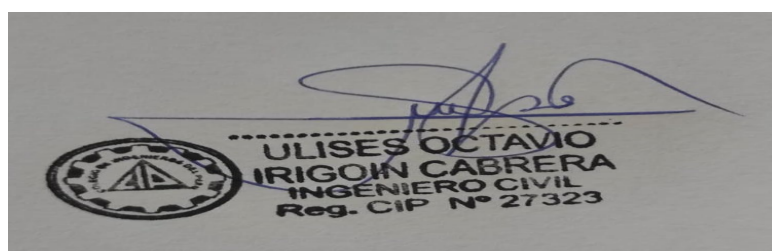
Resultados	
Límite Líquido	36.90
Límite Plástico	26.97
Índice Plástico	9.93
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)

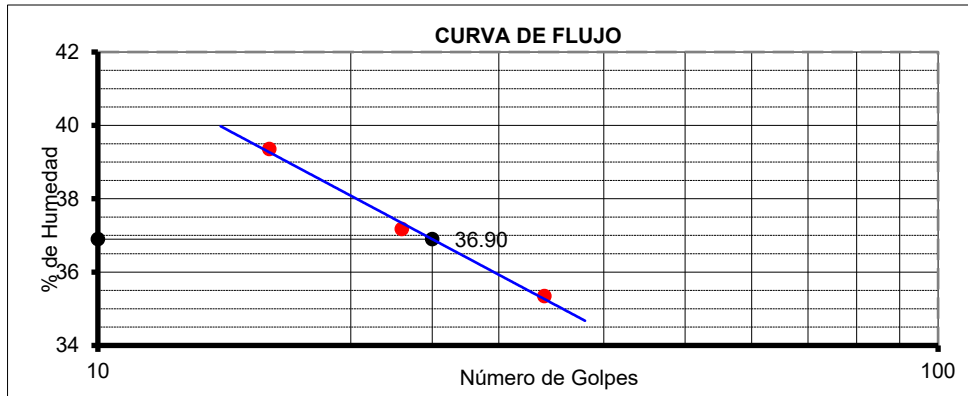
**Tabla 57.** Límite Líquido ASTM D 4318 - T 89

ENSAYO N°	1	2	3
N° de Golpes	16	23	34
R + Suelo Húmedo	47.34	56.57	59.09
R + Suelo Seco	44.66	54.44	56.63
Peso de la Tara	37.85	48.71	49.67
Peso de agua	2.68	2.13	2.46
Peso de S. Seco	6.81	5.73	6.96
% de Humedad	39.35	37.17	35.34

**Tabla 58.** Límite Plástico ASTM D 4318 - T 90

ENSAYO N°	1	2	3
R + Suelo Húmedo	54.17	46.13	48.36
R + Suelo Seco	52.72	44.74	46.31
Peso de la Tara	47.46	39.47	38.63
Peso de agua	1.45	1.39	2.05
Peso de S. Seco	5.26	5.27	7.68
% de Humedad	27.57	26.38	26.69

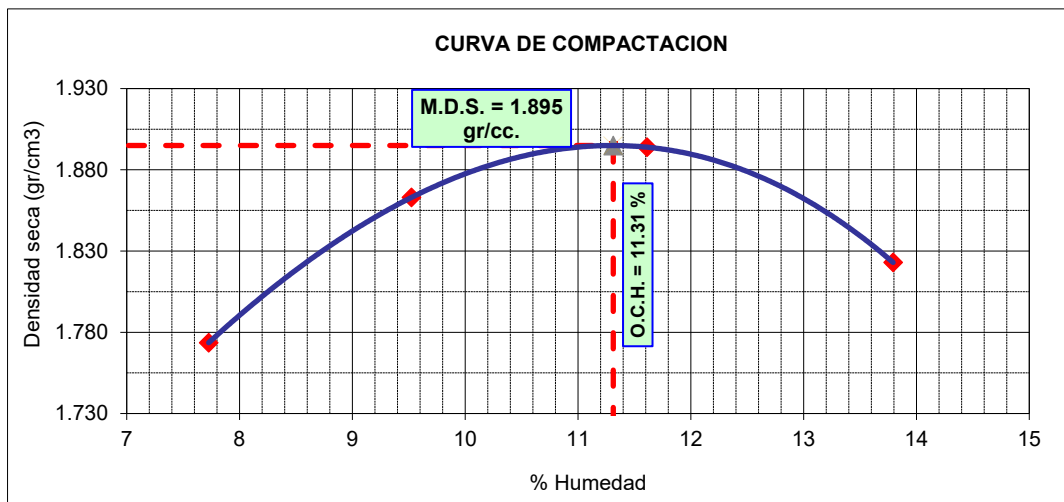




**Figura 6.** Curva de flujo

**Tabla 59.** Ensayo de Proctor Modificado del suelo natural. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
MSD (máxima densidad seca)	1,895 gr/cm <sup>3</sup>
OCH (óptimo contenido de humedad)	11,31 %
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)

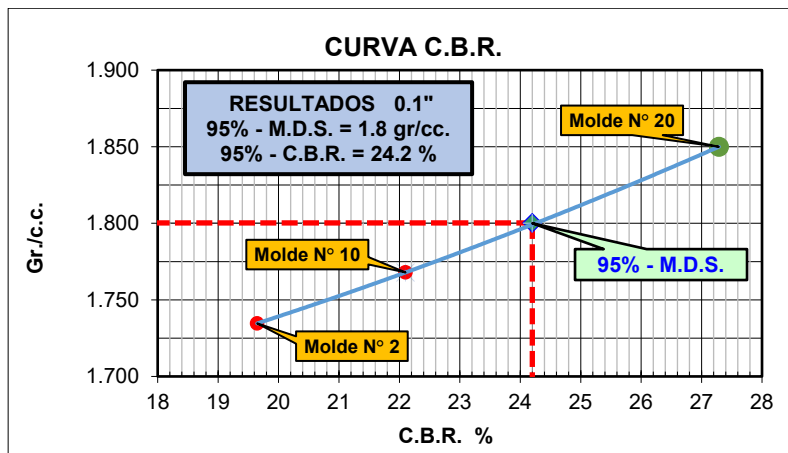


**Figura 7.** Curva de compactación

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,31 %

**Tabla 60.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883 suelo natural

Resultados		
Condición de la muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10,00 Lbs
Hinchamiento promedio		No expansivo
CBR	100% MDS	95% MDS
0,1 "	27,29	24,20
0,2 "		



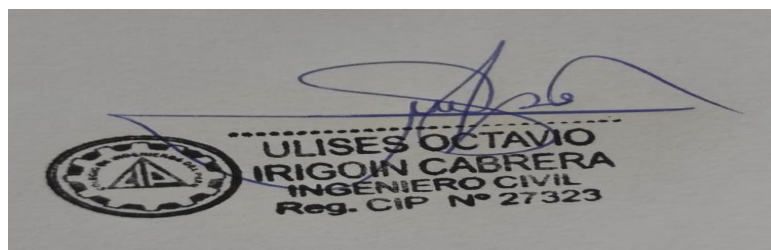
**Figura 8.** Curva C.B.R.

**A. Primer proceso de estabilización del material**

**Material natural + 0,3% Terrasil**

**Tabla 61.** Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

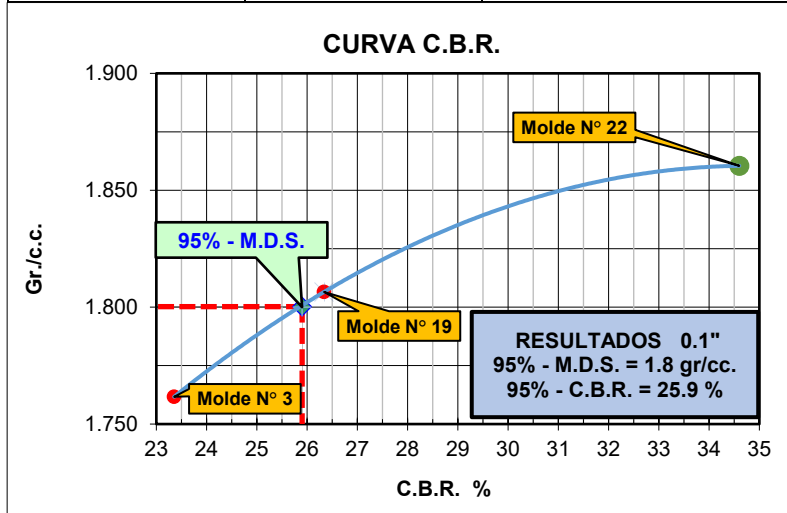
Resultados	
MSD	1,895 gr/cm <sup>3</sup>
OCH	11,31 %
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)



El material natural + 0,3% Terrasil alcanzó una máxima densidad seca de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,31 %

**Tabla 62.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Resultados		
Condición de la muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10,00 Lbs
Hinchamiento promedio		No expansivo
CBR	100% MDS	95% MDS
0,1 "	34,60	25,90
0,2 "		



**Figura 9.** Curva C.B.R.

**Material natural + 0,5% Terrasil**

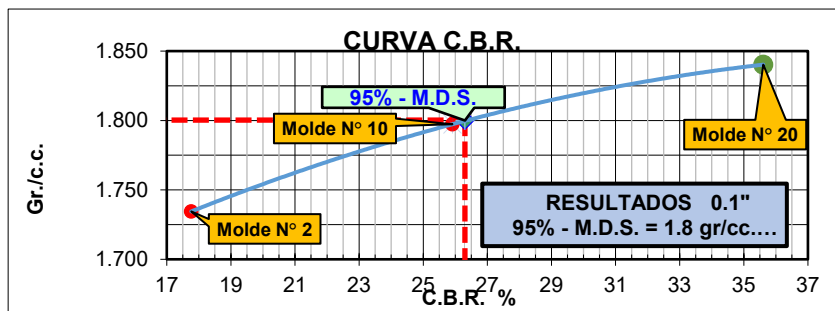
**Tabla 63.** Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
MSD	1,895 gr/cm <sup>3</sup>
OCH	11,31 %
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,31 %

**Tabla 64.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Resultados		
Condición de la muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10,00 Lbs
Hinchamiento promedio		No expansivo
CBR	100% MDS	95% MDS
0,1 "	35.61	26,30
0,2 "		

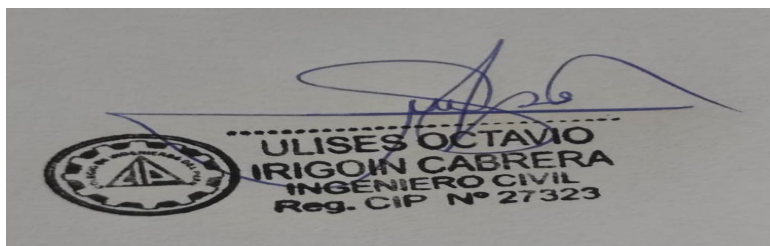


**Figura 10.** Curva C.B.R.  
material natural + 0,75% Terrasil

**Tabla 65.** Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

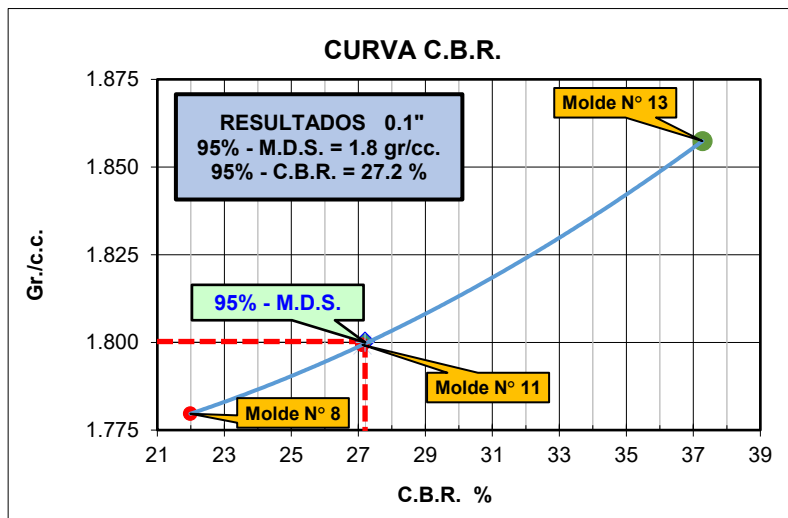
Resultados	
MSD	1,895 gr/cm <sup>3</sup>
OCH	11,31 %
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,31 %



**Tabla 66.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Resultados		
Condición de la muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10,00 Lbs
Hincharamiento promedio		No expansivo
CBR	100% MDS	95% MDS
0,1 "	37,27	27,20
0,2 "		



**Figura 11.** Curva C.B.R.

**material natural + 1,00% Terrasil**

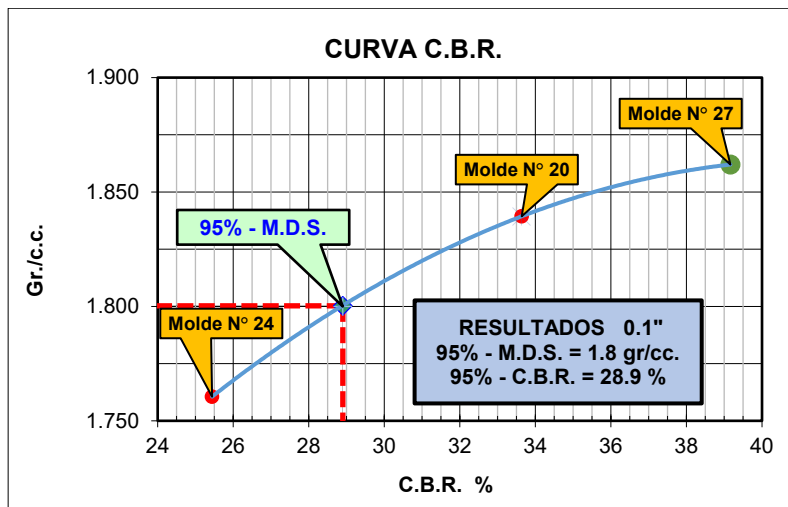
**Tabla 67.** Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
MSD	1,895 gr/cm <sup>3</sup>
OCH	11,31 %
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,31 %

**Tabla 68.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

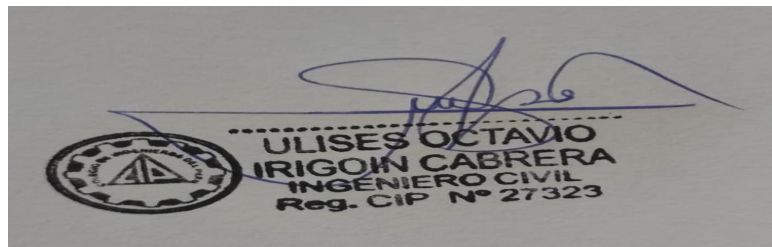
Resultados		
Condición de la muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10,00 Lbs
Hinchamiento promedio		No expansivo
CBR	100% MDS	95% MDS
0,1 "	39,16	28,90
0,2 "		



**Figura 12.** Curva C.B.R.

**Resultado concluyente del primer proceso de estabilización:**

En todos los casos el CBR al 100% y 95% del suelo natural + 1% de Terrasil alcanzó el 39,16% y 28,90 %, respectivamente.



## B. Segundo proceso de estabilización del material

Al no haberse alcanzado valores de CBR del suelo natural en presencia de porcentajes de Terrasil recomendados por el fabricante, se tomó en cuenta la naturaleza granular del suelo, su IP y valores de pH, optándose por añadir un 0,5% de cemento portland al suelo y estudiar su mejora, para luego en un tercer proceso determinar la estabilización de dicho suelo añadiendo Terrasil en presencia de ese porcentaje de cemento portland.

### Material natural + 0,5% cemento portland

El material a mejorar su estabilidad (Suelo natural), por aplicación de un 0,5% de cemento portland es una arena limosa arcillosa de color anaranjado, húmeda, con porcentaje reducido de partículas finas, clasificada como SM según SUCS y según AASHTO como A-2-4 (0); contiene 18,48% de material fino que pasa la malla N° 200 y 9,23% de humedad natural, en promedio; LL=36.90, LP=26.97, IP=9.93

**Tabla 69.** Analisis granulométrico por tamizado

#### ASTM D - 422 / NTP 339.128

##### Datos de campo:

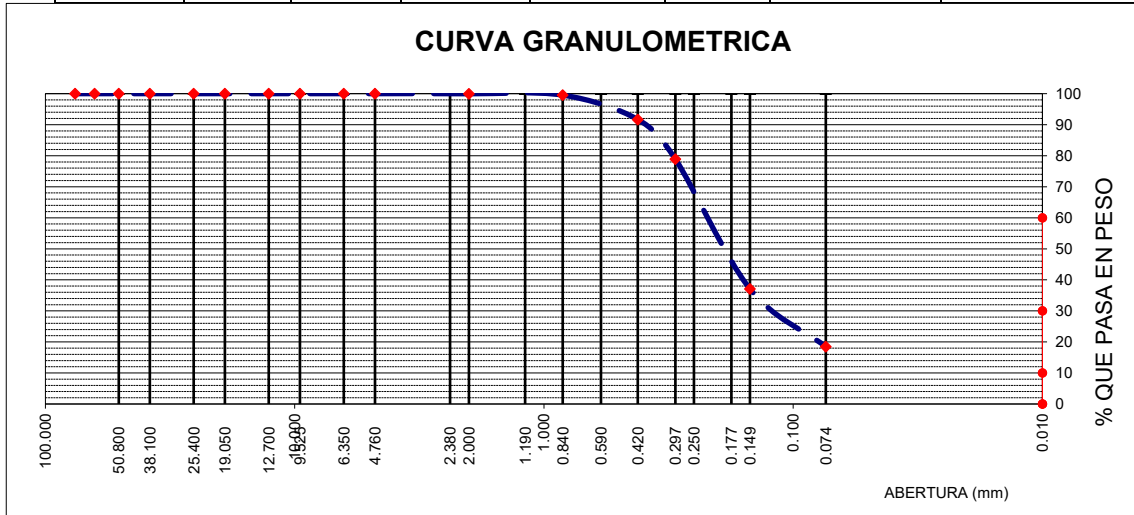
**Peso de muestra seca** : 275.65

**Peso de muestra lavada** : 230.80

Tamices ASTM	Abertura en mm.	Peso Retenido	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	% que Pasa	Especific.	Observaciones
2 1/2"	63.500						L. Líquido : 36.9
2"	50.600						L. Plástico : 26.97
1 1/2"	38.100						Ind. Plástico : 9.93
1"	25.400						Clas. SUCS : SM
3/4"	19.050						Clas. AASHTO : A-2-4 (0)
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
1/4"	6.350				100.00		
N°4	4.760	0.09	0.03	0.03	99.97		



N°10	2.000	0.15	0.05	0.09	99.91	
N°20	0.840	1.25	0.45	0.54	99.46	
N°40	0.420	12.36	4.48	5.02	94.98	
N°50	0.297	38.36	13.92	18.94	81.06	
N°100	0.149	78.36	28.43	47.37	52.63	
N°200	0.074	100.23	36.36	83.73	16.27	
Pasa N°200		44.85	16.27			

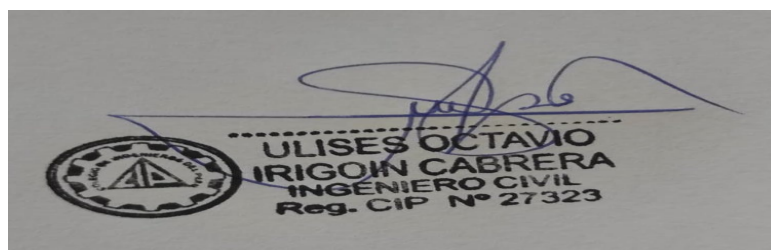


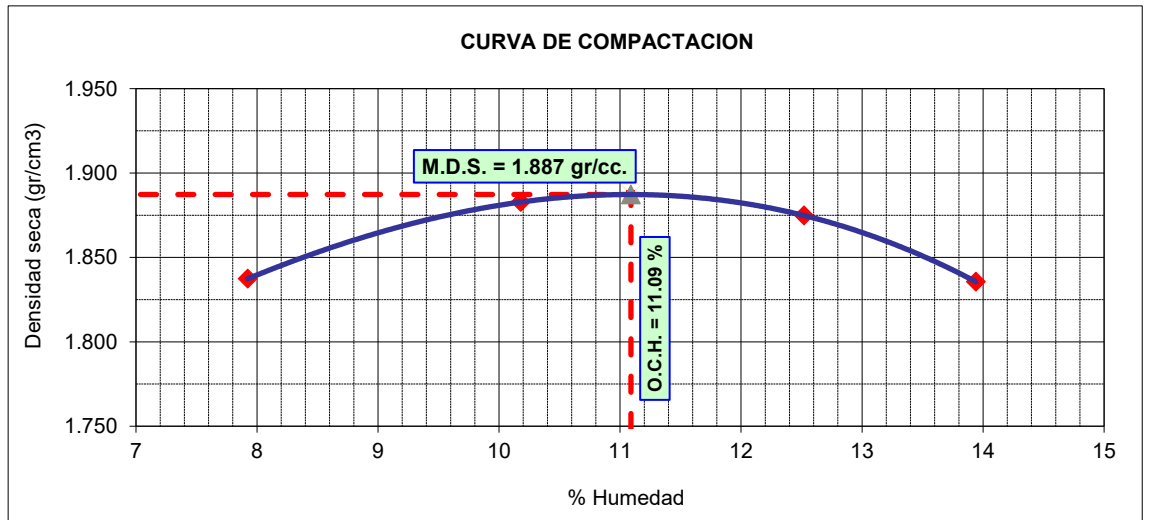
**Figura 13.** Curva granulométrica

**Tabla 70.** Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

<b>Resultados</b>	
MDS	1,887 gr/cm <sup>3</sup>
OCH	11,09 %
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)

El material natural + el 0,5% de cemento portland alcanzó una máxima densidad seca de 1,887 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,09 %

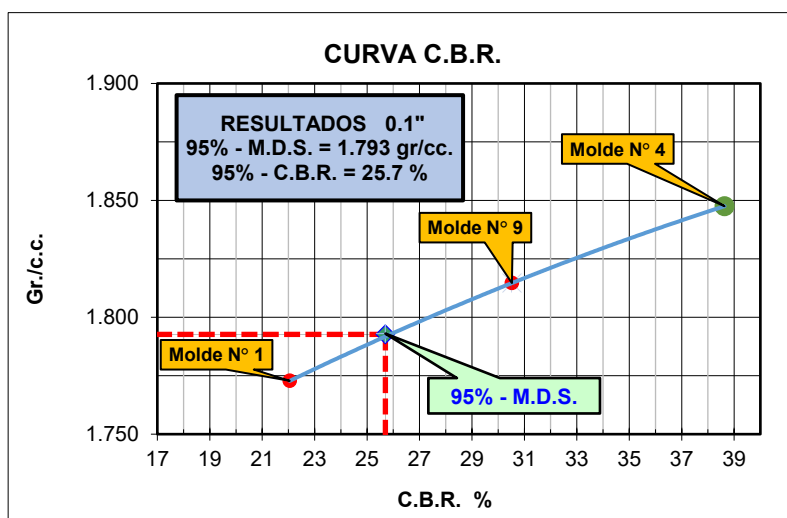




**Figura 14.** Curva de compactación

**Tabla 71.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Resultados		
Condición de la muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10,00 Lbs
Hincharamiento promedio		No expansivo
CBR	100% MDS	95% MDS
0,1 "	38,63	25,70
0,2 "		



**Figura 15.** Curva C.B.R.

**Resultado concluyente:** El material natural + 0,5% de cemento portland incrementó la Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 38,63% y 25,70%, respectivamente.

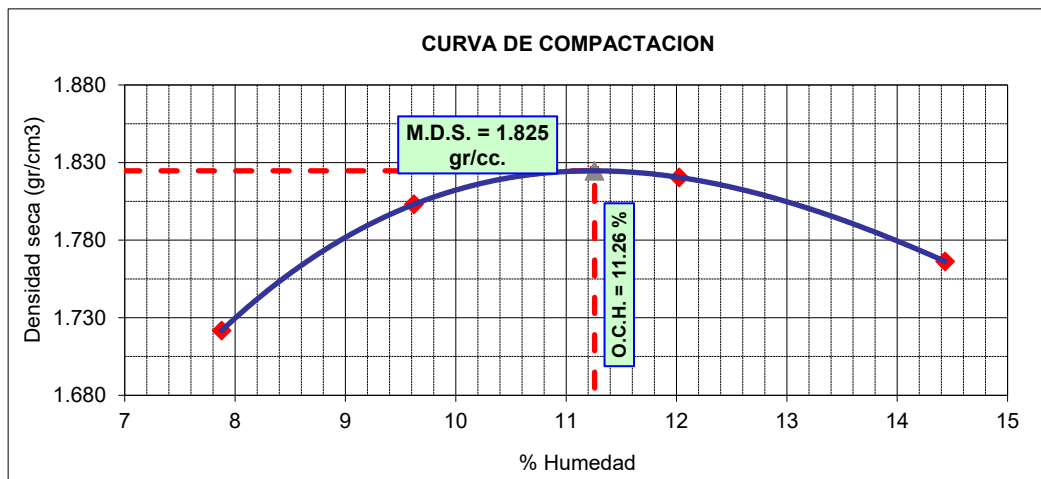
**C. Tercer proceso de estabilización del material:** suelo natural + cemento portland + Terrasil

**Material natural + 0,5% cemento + 0,3% Terrasil**

**Tabla 72.** Ensayo de Próctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
M. D. S.	1.825 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.26 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

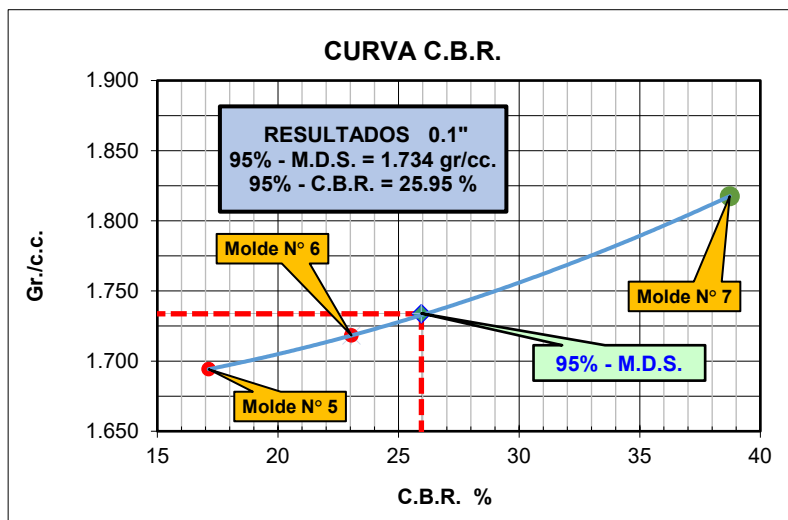
El material natural + 0,5% de cemento portland + 0,3% de Terrasil alcanzó una máxima densidad seca de 1,825 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,26 %



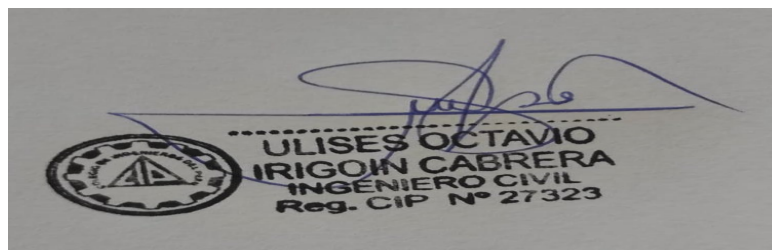
**Figura 16.** Curva de compactación

**Tabla 73.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	38.73	25.95	
0.2"			



**Figura 17.** Curva C.B.R.



**Material natural + 0,5% cemento + 0,5% Terrasil**

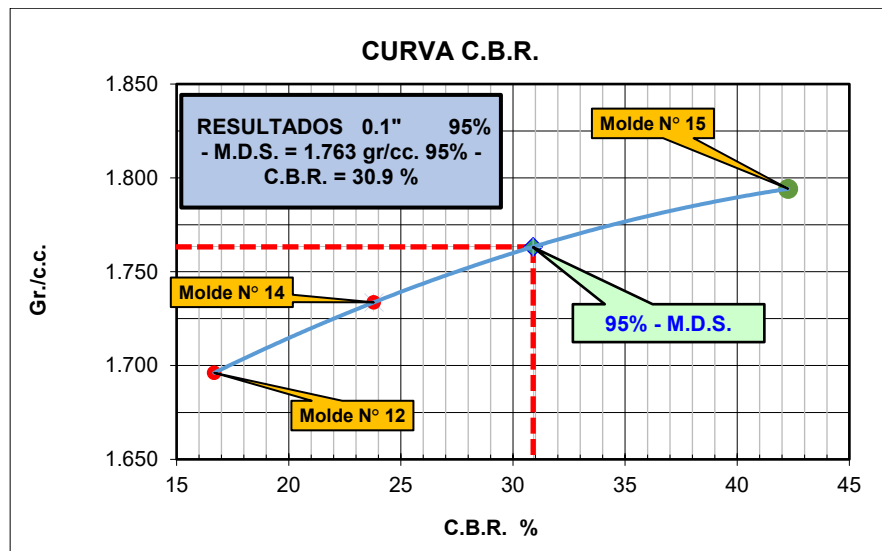
**Tabla 74.** Ensayo de Proctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
M. D. S.	1.856 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.28 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

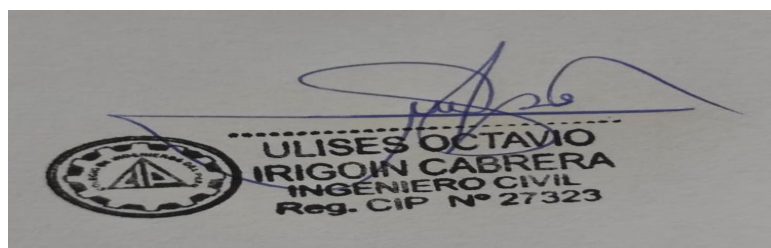
El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,856 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,28 %

**Tabla 75.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	42.27	30.90	
0.2"			



**Figura 18.** Curva C.B.R.



**Material a estabilizar natural + 0,5% cemento + 0,75% Terrasil**

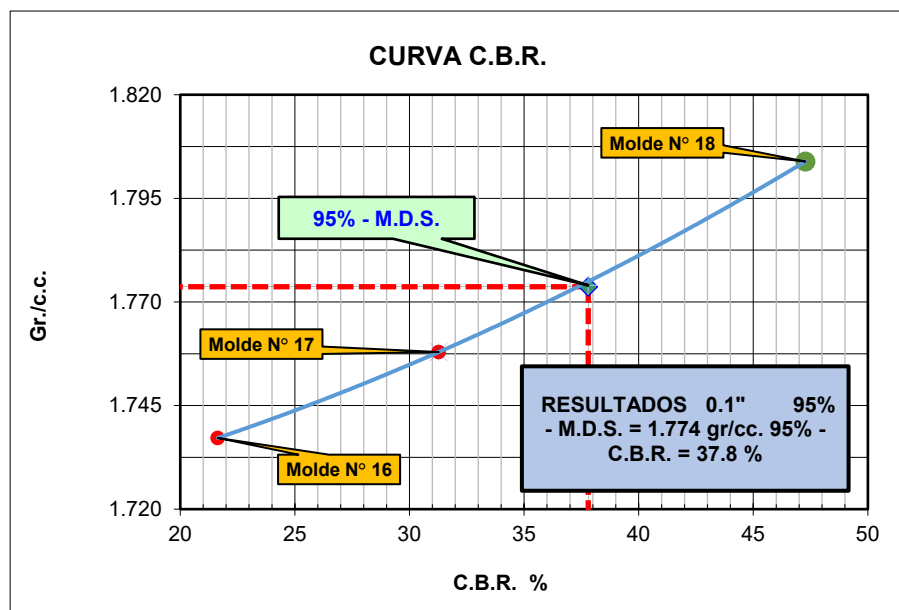
**Tabla 76.** Ensayo de Próctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
M. D. S.	1.867 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.69 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,867 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,69 %

**Tabla 77.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883		
Condición de la Muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10.00 lbs.
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO
C.B.R.	100% MDS	95% MDS
0.1"	47.27	37.80
0.2"		



**Figura 19.** Curva C.B.R.

**Material a estabilizar natural + 0,50% cemento + 1,00% Terrasil**

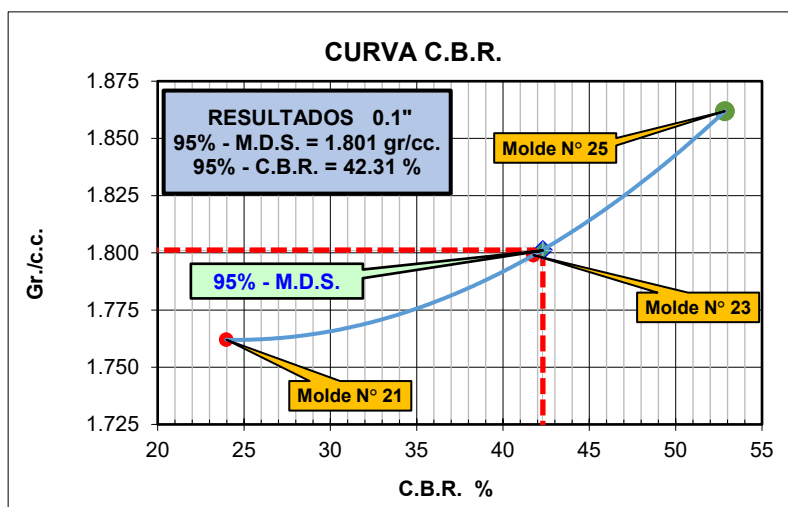
**Tabla 78.** Ensayo de Próctor Modificado. Método A (ASTM D1557)

Resultados	
M. D. S.	1.896 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.76 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,896 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,76 %

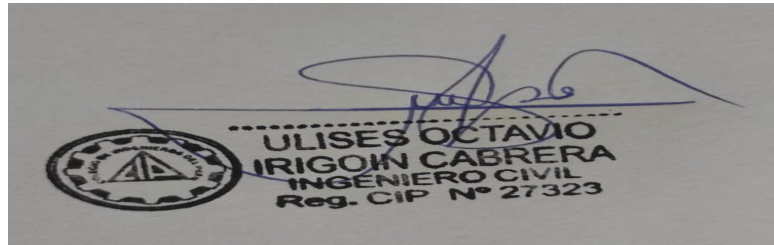
**Tabla 79.** Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	52.85	42.31	
0.2"			



**Figura 20.** Curva C.B.R.

**Resultado concluyente:** El material natural + 1.00% de terrasil + 0,5% de cemento portland incrementó la Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 52.85% y 42.31%, respectivamente.





## 4.2. Discusión

El material a mejorar su estabilidad (Suelo natural), es una arena limosa arcillosa de color anaranjado, húmeda, con porcentaje reducido de partículas finas, clasificada como SM según SUCS y según AASHTO como A-2-4 (0); contiene 18,48% de material fino que pasa la malla N° 200 y 9,23% de humedad natural, en promedio. Los ensayos de límites de consistencia de este suelo indican que tiene: LL=36,90, LP=26,97, IP=9,93.

El material natural alcanzó una máxima densidad seca de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,31 %; y, un valor de Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de 27,29% y 24,20%, respectivamente. Por su parte en el proyecto de pavimentación de la carretera Contamana – Aguas Calientes, materia de la Tesis de Vásquez (2010), el suelo de la cantera seleccionada, según SUCS y AASHTO correspondió al tipo SM o A-2-4(0), respectivamente; sin embargo, tenía una MDS de 1,771 gr/cm<sup>3</sup>, OCH de 17,0 % y un Valor de Soporte California CBR de 18,12%. Asimismo, en la pavimentación de la carretera Puno – Tiquillaca –Mañazo, materia de Tesis de Salas (2017), el material de cantera correspondió al tipo SW o A-3 P, tenía un IP promedio de 10,26%, una MDS de 1,65 gr/cm<sup>3</sup>, CBR al 100% de 39,58%, proponiéndose mejorar estas características con adición de cemento portland y aditivo Terrasil.

El material natural + 0,3% **Terrasil** alcanzó una MDS de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 11,31 %; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS de 34,60% y 25,90%, respectivamente.

El material natural + 0,5% **Terrasil** alcanzó una MDS de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 11,31 %; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS de 35,61% y 26,30%, respectivamente.

El material natural + 0,75% **Terrasil** alcanzó una MDS de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 11,31 %; y, un valor CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS de 37,27% y 27,20%, respectivamente.

El material natural + 1,0% **Terrasil** alcanzó una MDS de 1,895 gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 11,31 %; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS de 39,16% y 28,90%, respectivamente.

Frente a estos valores Salas (2017), al utilizar 5gr de Terrasil por kg de suelo alcanzó una MDS de 1,87gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 8,23%; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de MDS de 54,47% y 46,17%, respectivamente. Cuando utilizó 10gr de Terrasil por kg de suelo alcanzó una MDS de 1,99gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 7,97%; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de MDS de 61,37% y 47,63%, respectivamente. Y el IP promedio de 10,26% del suelo sin aditivo, bajó a 7,67% y a 6,74% cuando usó 5gr de Terrasil por kg de suelo, y 10gr de Terrasil por kg de suelo, respectivamente.

El material natural + 0,5% de **cemento portland** alcanzó una MDS de 1,887 gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 11,09 %; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 38,63% y 25,70%, respectivamente.

Frente a estos valores Salas (2017), al utilizar 2% de cemento referido al peso del suelo alcanzó una MDS de 1,94gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 8,07%; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al

95% de MDS de 44,17% y 40,47%, respectivamente. Cuando utilizó 4% de cemento alcanzó una MDS de 2,09gr/cm<sup>3</sup>, para un OCH de 8,00%; y, un valor de CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de MDS de 65,87% y 46,53%, respectivamente. Y el IP promedio de 10,26% del suelo sin aditivo, bajó a 7,75% y a 6,19% cuando usó 2% y 4% de cemento referido al peso de suelo, respectivamente. Sin embargo, el MTC sugiere para este caso de Puno, una MDS superior a 1,90 gr/cm<sup>3</sup>, un valor de CBR al 100% superior a 50, y un IP menor de 7%.

El material natural + 0,5% de **cemento portland** + 0,3% de Terrasil alcanzó una máxima densidad seca de 1,825 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,26 %; asimismo incrementó la Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 38,73 y 25,95, respectivamente.

El material natural + 0,5% de **cemento portland** + 0,5% de **Terrasil** alcanzó una máxima densidad seca de 1,856 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,28 %; asimismo incrementó la Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 42,27 y 30,90, respectivamente.

El material natural + 0,5% de **cemento portland** + 0,75% de **Terrasil** alcanzó una máxima densidad seca de 1,867 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,69 %; asimismo incrementó la Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 47,27 y 37,80, respectivamente

El material natural + 0,5% de **cemento portland** + 1,00% de **Terrasil** alcanzó una máxima densidad seca de 1,889 gr/cm<sup>3</sup>, para un óptimo contenido de humedad de 11,63 %; asimismo incrementó la Razón de Soporte California CBR medido a 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 52,85 y 41,31, respectivamente.

Entonces, para Salas (2010), los suelos de la Cantera “Lumpoorcco” si fueron posibles estabilizarlo al obtener resultados con adición del 4% de cemento para el índice de plasticidad (IP) de 6.19%, densidad seca (DS) en 2.09% y CBR al 100% en 64.87%; y con la adición de Terrasil con 10 gr por kilo de suelo se logró un IP de 6.74%, DS de 1.99 gr/cm<sup>3</sup> y CBR al 100% de 61.37%, alcanzando mejoras como lo sugiere el MTC.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1. Conclusiones**

- La aplicación del estabilizante químico Terrasil en el suelo arenoso limoso de la Cantera Milagritos III, mejora sus características físicas y mecánicas convirtiéndolo en material apropiado para ser usado en la base de la vía de acceso “Villa Milagritos”, con lo cual ha quedado aceptada y confirmada la hipótesis.
- La aplicación del aditivo químico Terrasil para estabilizar el suelo arenoso limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la sub base y base de la estructura de la vía de acceso Villa Milagritos, distrito San Juan Bautista, tiene efectos positivos, solamente en presencia del 0.5% de cemento, mejorando la Razón de Soporte California CBR.
- La aplicación del aditivo Terrasil, para estabilización del suelo arenoso limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la sub base y base de la estructura de la carretera vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, permitió alcanzar un CBR al 100% y 95% de suelo natural + 1% de Terrasil de 39,16% y 28,90 %, respectivamente.
- El diseño óptimo de dosificación del aditivo Terrasil, en la estabilización química del suelo arenoso limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base y sub base de la estructura de la carretera vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, en presencia del 0.5% de cemento – es el que correspondió a la adición de 1% de terrasil habiéndose alcanzado una MDS de 1,886 gr/cm<sup>3</sup> para un OCH de 11,76%; asimismo incrementó la Razón de Soporte California CBR

medido al 0,1% al 100% y al 95% de la MDS a 52,85% y 42,31%, respectivamente.

- Las ventajas técnicas que ofrecen los proveedores del aditivo Terrasil frente a otros aditivos, para la estabilización química y el mejoramiento del suelo areno limo arcilloso de la Cantera Milagritos III, radica en su fácil aplicabilidad durante la construcción de subrasante, sub base y base de la estructura del pavimento de la vía de bajo tránsito no pavimentada de acceso Villa Milagritos, manteniendo estabilidad y durabilidad en carreteras de bajo tránsito no pavimentadas. El proceso de aplicación de Terrasil reduce la permeabilidad y plasticidad en suelos que contengan algún porcentaje de arcilla, pues elimina el agua e incrementa los límites de solidez entre las partículas cohesivas. Este incremento de límites reduce el daño y la deformación resultante de las condiciones húmedas de los suelos propiciando su estabilización. Terrasil es también un catalizador eficaz que permite acelerar y fortalecer la unión del material de la base del camino, convirtiéndola en más densa, cohesiva y estable, cuya resistencia a la compresión aumenta con el tiempo.
- Las ventajas económicas del aditivo Terrasil frente a otros aditivos resulta más económica que otros aditivos químicos, no solo como costo de este agente estabilizante, asimismo, por su alto rendimiento, sino también su fácil aplicabilidad garantiza mayor rendimiento; asimismo, el riego de la superficie de la calzada no pavimentada garantiza mayor durabilidad, con lo cual las actividades de mantenimiento se aplazarían más.
- Las ventajas ambientales del aditivo Terrasil frente a otros aditivos resulta en ser más amigable con el ambiente; y, es una alternativa eficaz para la estabilización de carreteras cuya

formulación líquida enzimática natural, no tóxica y biodegradable mejora la calidad de las obras de ingeniería. Terrasil cataliza la degradación de los materiales orgánicos en el suelo alterando favorablemente sus atributos físicos y químicos, resultando una mejor unión química de partículas cohesivas de suelo y una estructura de suelos más estable y duradera.

## **5.2. Recomendaciones**

A la luz de los resultados se recomienda:

- Determinar las características físicas y mecánicas de los suelos de canteras de materiales A-2-4 (0) existentes en las proximidades de la carretera Iquitos – Nauta y estudiar la mejora de su comportamiento añadiendo sin y con presencia de cemento portland, proporciones superiores a 1,0% de Terrasil por kg de suelo a estabilizar; y recomendar la factibilidad de su uso en carreteras vecinales de bajo volumen de tránsito.
- Determinar los efectos en otras propiedades físicas y mecánicas de la aplicación del aditivo Terrasil, para estabilización de suelos arena limo arcilloso de otras canteras, para su uso en la base de la estructura del pavimento de vías urbanas en la ciudad metropolitana de Iquitos.
- Proseguir con las investigaciones en esta línea, pues el suelo natural de esta cantera tiene un pH de 5,94 %; y, según la literatura nuestros suelos son ideales para ser tratados con Terrasil, al tener un LL menor de 30%, IP entre 5% a 18% y un pH entre 4,5 a 9,5.

## Referencias Bibliográficas

1. Angulo Roldán, D. y Rojas Escajadillo, H.F. (2016). Ensayo de fiabilidad con aditivo PROES para la estabilización del suelo en el A.A.H.H El Milagro, 2016. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad Científica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Iquitos – Perú. 98 pp.
2. Atarama Mondragón, E. (2015). Evaluación de la transitabilidad para caminos de bajo tránsito estabilizados con aditivo PROES. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería Civil.
3. Carrillo-Gill, A. (1978). Características de los Suelos Tropicales del Perú. Revista Latinoamericana de Geotecnia, Vol. IV, N ° 4 pp.207-216, Caracas-Venezuela.
4. Carrillo-Gill, A., Carrillo, E., Cárdenas, J., Flores, J. (1993). Alternativas de estabilización de suelos tropicales húmedos para pavimentos, memoria del VI Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima-Perú.
5. Carrillo-Gill, A. (2016). Diseño geotécnico en los suelos de la selva. Conferencia Especial. Disponible en:  
<https://es.scribd.com/document/338810077/Diseño-Geotecnico-en-Suelos-de-La-Selva>.
6. CONINFRA. (Congreso de Infraestructura de Transporte). (Tercer Congreso de Infraestructura de Transportes) 2009. Estabilización de suelos con cemento Portland y cal hidratada en pavimentos de la región amazónica del Perú. Sao Paulo, Brasil. ANDIT (Asociación Nacional de Infraestructura de Transporte). 27 p.



7. KRAEMER, C. (2009). Ingeniería de Carreteras (volumen I) 2da. Edición. Editorial S.A. MCGRAW-HILL, Interamericana de España.
8. MTC. METG. (2010). Manual de Especificaciones Técnicas Generales, para la Construcción de Caminos de Bajo Volumen de Transito; Suelos Estabilizados con Cal. MTC., de la República del Perú.
9. Crespo Villalaz, C. (2007), Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Sexta Edición. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores.
10. Cristóbal Calderón, Miguel Angel. (2015). Estabilización Iónica de Suelos con Terrasil en los contratos de mantenimiento y conservación Vial. Informe de Suficiencia para optar el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería- Lima, Perú. 76 p.
11. Das Braja, M. 2001. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México D.F. Thomson Learning. 587 p.
12. Díaz J. y Mejía J. 2004. Estabilización de Suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. 362p.
13. Elizondo Arrieta, I., & Sibaja Obando, I. (2008). Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas. Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José. San Pedro de Montes de Oca: Laboratorio Nacional de

## Materiales y Modelos Estructurales.

14. Fernández Loaiza, C. 1991. Mejoramiento y estabilización de suelos. Editorial Limusa. México.
15. Gárnica A. Paul et al. 2002. Mecánica de materiales para pavimentos. Publicación técnica N° 197. Instituto Mexicano del Transporte. SCT. Sanfandila, Querétano. México.
16. Gárnica A. Paul et al. 2002. Estabilización de Suelos con Cloruro de Sodio para su uso en las vías terrestres. Publicación Técnica N° 201. Instituto Mexicano del Transporte. Ciudad de México. México
17. Gutierrez Montes, Carlos Alberto. 2010. Estabilización Química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas comparativas del cloruro de magnesio (Bischofita) frente al cloruro de calcio. Tesis, para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Universidad Ricardo Palma. Perú. 161p.
18. Hidalgo Reátegui Fredy Roland y Hidalgo Reategui José. 2020. “Estabilización química de subrasantes de suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja. Aplicación de aditivos Terrasil y Proes en vía de acceso “Moralillos”, Loreto, 2018”. Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil. Universidad Científica Del Perú, Programa Académico de Ingeniería Civil. 131 p.
19. Holtz, R.; Kovacs, W. & Sheahan, T. 2011. “An Introduction to Geotechnical Engineering”. Second Edition. Prentice Hall. New Jersey, USA.
20. IECA (Instituto Español del cemento y sus aplicaciones); ANCADE

(Asociación Nacional de Fabricantes y Derivados de España); ANTER (Asociación Nacional Técnica de Estabilización de Suelos y Reciclado de Firmes). 2003. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Madrid, España. Instituto español del cemento y sus aplicaciones. 205 p.

21. Jara Anyaypoma, Robinson. 2014. Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso. Tesis, para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Cajamarca. Perú. 110 p.
22. Juárez Badillo, E; Rico Rodriguez, A. 2005. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo I. México, Limusa. 629 p.
23. Kukko, H. 2000. "Stabilization of clay with inorganic by – products". "Journal Of materials in Civil Engineering 2000".
24. Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995. Mecánica de Suelos. Editorial Limusa S.A de C.V. Grupo Noriega Editores. 582 p.
25. Liu, T. 1967. "A Review of Engineering Soil Classification Systems", Highway Research Record. USA
26. Martínez Navarro, Georgina G. 2011. Correlación de las fallas en pavimentos con respecto a la estabilización de suelos en las capas de base y sub base. Tesis. Veracruz, México
27. Martinez Santos, J. 2012. Evaluación del mejoramiento de suelos arcillosos empleando materiales cementantes. Tesis para optar el grado de Ingeniero Civil. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Civil - Región Xalapa. México. 122 p.

28. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). 2004. Estabilización química de suelos- Caracterización del estabilizador y evaluación de propiedades de comportamiento del suelo mejorado. Norma técnica de Estabilizadores Químicos. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles DGC y F- Perú, Lima.
29. MTC, M. d. (2005). Manual para El Diseño de Caminos No Pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito. (P. e.-P. Rural, Ed.) Lima: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
30. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). 2006. Manual Técnico de Mantenimiento rutinario para la red vial departamental no pavimentada. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles DGC y F- Perú, Lima.
31. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). 2008. Normas conceptuales, de cantidad y de ejecución. Manual para la conservación de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Volumen I. Lima. Pág 29.
32. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). 2008. Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo tránsito. Aprobado por la Resolución Ministerial N° 303-2008-MTC/02 del 04 de abril del año 2008.
33. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). 2008. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Lima, 2008.
34. MTC. METG. (2010). Manual de Especificaciones Técnicas

Generales, para la Construcción de Caminos de Bajo Volumen de Transito; Suelos Estabilizados con Cal. MTC., de la República del Perú.

35. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). 2013. Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Lima, Perú. 346 p.
36. Márquez Santiago. 2005. Estabilización de Suelos. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Comodoro Rivadavia, Argentina.
37. Montejo Fonseca, A. 2006. Ingeniería de Pavimentos, Edición 3, Editorial Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2006.
38. Motta L.M.G. 1991. Método de Dimensionamiento de pavimentos Fléxiveis; criterio de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Brasil.
39. Muelas Rodriguez, A. s.f. Manual de mecánica del suelo y Cimentaciones: Mecánica de suelos y cimentaciones. Capítulo 1. 119 p.
40. National Lime Association. 2004. Manual de estabilización de Suelos tratado con cal. Estabilización y Modificación con Cal. Publicación de la Nacional LIME Association, Boletín 326, México. p 42.
41. Nuñez Rojas, D. 2011. Elección y Dosificación del Conglomerante en estabilización de Suelos. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Instituto Tecnológico de Sonora. México. 61 p.

42. Ñaupari Aparicio Jordan Matheus. 2021. Propuesta de estabilización de una arena arcillosa de mediana plasticidad analizado el CBR, óptimo contenido de humedad y densidad máxima seca utilizando cal al 2%, 4% y 6% y aceite sulfonado al 1%, 2% y 3%. Universidad Privada Del Norte. Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil. Lima Norte 2021.
43. Palli Apaza E. 2015. Guía Básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en la provincia de San Román. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura. Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Universidad Nacional del Altiplano- Puno. 184 p.
44. Perez Collantes, R. 2012. Estabilización de Suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o Sub base de pavimentos. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Geotécnica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú. 89 p.
45. Rico, A; Castillo H. 2005. La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas. México. Limusa. V.2, 645 p.
46. Rozas, P. y Sánchez, R. 2004. Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual. CEPAL, Serie Recursos Naturales. Publicación de Naciones Unidas. Santiago, Chile, octubre.
47. Salas Mercado Dante. 2017. Estabilización de suelos con adición de cemento y aditivo Terrasil para el mejoramiento de la base del Km 11+000 al Km 9+000 de la carretera Puno – Tiquilla – Mañazo. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería y

Ciencias Puras – Escuela profesional de Ingeniería Civil. Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” – Juliaca, Puno – Perú. 279 p.

48. Sampedro Rodriguez A. 1997. Tratamiento de Suelos con cal. Madrid. Editorial Ancada.
49. Taipe Gutierrez, W. y Pillaca Yancce, B. 2014. Propuesta técnica y económica del uso de aditivo sika 21 y T- Pro-500 para el mejoramiento de las propiedades físicas – mecánicas de la superficie de rodadura en las carreteras no pavimentadas. Tesis, para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería de Minas – Civil, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica - Perú. 156 p.
50. Ugaz Palomino R. M. (2006). Estabilización de Suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante. Tesis, para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 383 p.
51. Vásquez Concha, M. D. 2010. Pavimentos No Tradicionales para carreteras de Selva Baja con bajo volumen de tránsito, aplicación: Carretera Contamana – Aguas Calientes, Loreto. Tesis, para optar el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú. 271 p.
52. GUEVARA, G. 2016. “Procedimientos Para Mejorar las Características Resistentes de Suelos, Adicionando Residuos Industriales para la Construcción de Vías de la Ciudad de Juliaca”. Tesis para optar título profesional. Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez”.
53. CAPEDO, J. 2008. “Estabilizacion de Suelo Arcilloso con Cal Hidratada,

para ser Utilizada como Capa Subrasante de Pavimentos en la Carretera Lima - Huacho”. Tesis para optar título profesional. Universidad Privada Atenor Orrego de Chiclayo.

54. HUEZO MALDONADO HEBER MANRIQUE y ORELLANA MARTÍNEZ ALBER CRISTIAN. 2009. “Guía Básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador”. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil. San Salvador, El Salvador. Febrero 2009. 261 pg.



## Anexos

### ANEXO 01: PANEL FOTOGRÁFICO



Km 7 - Carretera Iquitos – Nauta/ Trocha de penetración cantera Villa Milagritos



Trocha carrozable de penetración Villa Milagritos - tramo intermedio



Villa Milagritos - Entrada principal de la cantera



Calicata 01



Recolección de muestra arena limosa



Calicata 02



Pesado de material areno limoso arcilloso para ensayos Proctor  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Cubrimiento de las muestras como prevención de absorción de humedad  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Control de peso del agua para aplicar a material en los ensayos de Proctor  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Muestra de suelo natural para realizar los ensayos Proctor  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Mezclado del agua con el material natural para realización del ensayo Proctor  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Compactación correspondiente de muestra suelo natural para los ensayos Proctor

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Inmersión de las muestras en poza de agua

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Muestras sumergidas en pozas de agua

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Pesado de suelo natural para la realización de ensayo Proctor  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Pesado de cemento de mezclado con el suelo natural para los ensayos Proctor  
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP





Pesado de suelo natural mezclado con 0.5% de cemento portland y 0.3% Terrasil para los ensayos Proctor

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Agregado de 0.5% de cemento portland al suelo natural para los ensayos Proctor

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Agregado de 1.00% de Terrasil a la mezcla de suelo natural + 0.5% de cemento portland para el ensayo Próctor

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Toma de los 3 ensayos de Proctor: Suelo natural; Suelo natural + 0.5% de cemento portland; y, suelo natural + 0.5% cemento portland + Terrasil

## Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP



Prueba de resistencia del ensayo Proctor de los diferentes tipos de material: Suelo natural; suelo natural + 0.5% cemento portland; y, suelo natural + 1.00% cemento portland + Terrasil

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de materiales UCP

## ANEXO 2



**UNAP**  
Universidad Nacional de la Amazonia Peruana  
Facultad de Ingeniería Química-FIQ



"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

### CERTIFICADO DE ANALISIS

MUESTRA : Material Arena Lino Arcilloso de cantera  
SOLICITADO : Sharon Julissa Mamayama Solsol  
Andrew Miguel Najjar Tangoa  
ANALISIS SOLICITADO : Químico  
FECHA DE ENSAYO : 23 de marzo de 2022

### RESULTADO

PARAMETRO	RESULTADO
p.H	5,94

Iquitos, 24 de marzo de 2022

ROSA ISABEL SOLZA NAJAR  
DOCENTE ADSCRITO FIQ-UNAP

Dr. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFEN  
Decano FIQ - UNAP



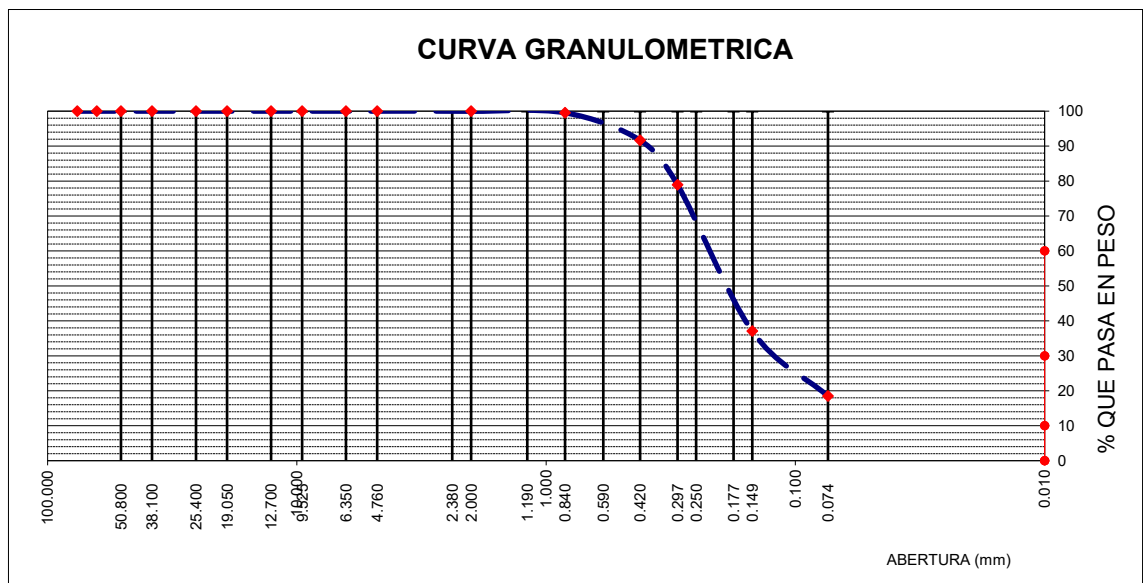
**Material de cantera areno-limo-arcilloso en estado natural**

**ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO  
ASTM D - 422 / NTP 339.128**

**Datos de campo:**

Cantera : Villa Milagritos – San Juan Bautista  
 Ubicación : Carretera Iquitos-Nauta Km 9  
 Peso de muestra seca : 207.18  
 Peso de muestra lavada : 168.89

Tamices ASTM	Abertura en mm.	Peso Retenido	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	% que Pasa	Especific.	Observaciones
2 1/2"	63.500						L. Líquido : 36.90
2"	50.600						L. Plástico : 26.97
1 1/2"	38.100						Ind. Plástico : 9.93
1"	25.400						Clas. SUCS : SM
3/4"	19.050						Clas. AASHTO : A-2-4 (0)
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
1/4"	6.350						
Nº4	4.760				100.00		
Nº10	2.000	0.06	0.03	0.03	99.97		
Nº20	0.840	0.91	0.44	0.47	99.53		
Nº40	0.420	16.29	7.86	8.33	91.67		
Nº50	0.297	26.41	12.75	21.08	78.92		
Nº100	0.149	86.71	41.85	62.93	37.07		
Nº200	0.074	38.51	18.59	81.52	18.48		
Pasa Nº200		38.29	18.48				



**ESPECIFICACIONES:** El Análisis Granulométrico por tamizado se realizó según ASTM D-422, Norma Técnica NTP 339.128, clasificación SUCS del suelo según ASTM D-2487 y los tamices cumplen con los requisitos de la Norma NTP 350.001

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Arena limosa, de color anaranjado, húmeda; porcentaje reducido de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (SM) A-2-4 (0). El porcentaje que pasa la malla N° 200 es de 18.48 %

**CONSTENIDO DE HUMEDAD  
ASTM D-2216 / NTP 339.127**

ENSAYO	1	2	3
PESO DE SUELO HUMEDO + TARA (gr.)	245.74	215.96	229.83
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr.)	229.86	201.99	213.05
PESO DE LA TARA	51.86	50.20	37.78
PESO DEL AGUA	15.88	13.97	16.78
PESO DE SUELO SECO	178.00	151.79	175.27
% DE HUMEDAD	8.92	9.20	9.57
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	<b>9.23</b>		

**ESPECIFICACIONES** : El contenido de humedad del suelo se realizó según las Normas ASTM D-2216 y NTP 339.127

**OBSERVACIONES** : La muestra corresponde a un suelo alterado, fue muestreada e identificada por el solicitante.

**RESULTADOS** : El promedio del porcentaje de Humedad del Suelo es 9.23 %

**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO  
METODO "A" (ASTM D1557)**

**Datos de campo:**

Cantera : Villa Milagritos – San Juan Bautista

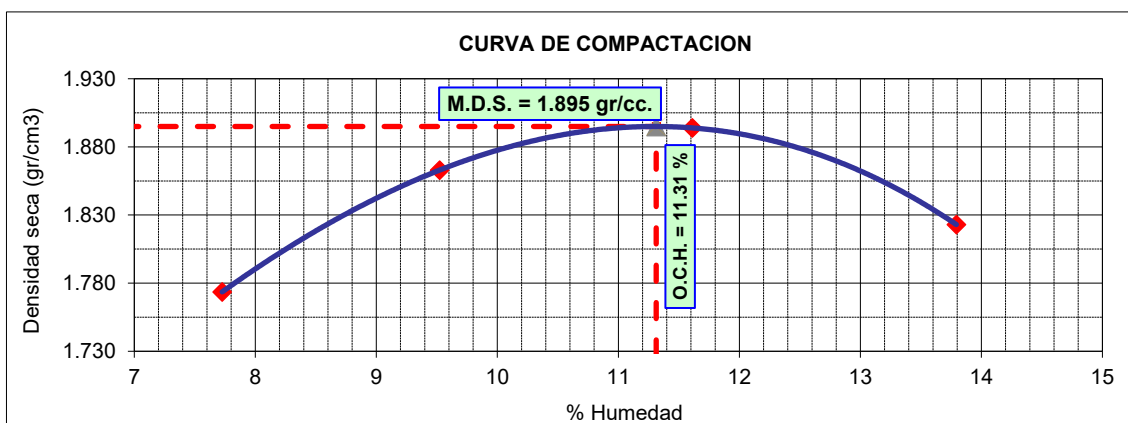
Ubicación : Carretera Iquitos-Nauta Km 9

Fecha de ensayo : 04/03/2022

Resultados	
M. D. S.	1.895 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.31 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

1.- Compactación				
Prueba N°	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	25	25	25	25
Peso suelo + molde (gr.)	5955	6077	6146	6109
Peso molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	940	940	940	940
Peso suelo compactado (gr.)	1796	1918	1987	1950
Densidad humeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.911	2.040	2.114	2.074

2.- Humedad (%)								
N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + suelo húmedo (gr.)	117.44	119.23	107.73	97.02	112.33	129.05	119.52	104.27
Recipiente + suelo seco (gr.)	112.48	114.32	102.69	92.04	105.19	120.57	111.11	96.41
Peso de recipiente (gr.)	48.98	50.07	50.50	39.01	44.19	46.94	50.10	39.46
Peso de agua (gr.)	4.96	4.91	5.04	4.98	7.14	8.48	8.41	7.86
Peso de suelo seco (gr.)	63.50	64.25	52.19	53.03	61.00	73.63	61.01	56.95
Humedad (%)	7.81	7.64	9.66	9.39	11.70	11.52	13.78	13.80
Promedio Humedad (%)	7.73		9.52		11.61		13.79	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.774</b>		<b>1.863</b>		<b>1.894</b>		<b>1.823</b>	



**ESPECIFICACIONES:** El Proctor Modificado se realizó según las Normas Técnicas ASTM D1557, por el método "A".

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Conforme al ensayo realizado, el material de muestreo alcanzó una Máxima Densidad Seca 1.895 gr/cm<sup>3</sup>, para un Óptimo contenido de Humedad de 11.31 %.

Según el valor de la humedad óptima obtenida, se recomienda determinar el contenido de materia orgánica de la muestra.

### ENSAYO DE PENETRACION C.B.R.

(ASTM D-1883)

**Datos de campo:**

Cantera : Villa Milagritos – San Juan Bautista

Ubicación : Carretera Iquitos-Nauta Km 9

Fecha de ensayo : 07/03/2022

<b>M. D. S.</b>	1.895 gr/cm <sup>3</sup>
<b>O. C. H.</b>	11.31 %
<b>Clas. SUCS</b>	SM
<b>Clas. AASHTO</b>	A-2-4 (0)

Molde	Nº	2		10		20	
Capas	Nº	5		5		5	
Golpes por capa	Nº	12		25		56	
Condición de muestra		<b>Hum. Optima</b>	<b>Saturado</b>	<b>Hum. Optima</b>	<b>Saturado</b>	<b>Hum. Optima</b>	<b>Saturado</b>
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12613	12747	12916	13030	12849	12898
Peso del molde	Gr.	8497	8497	8720	8720	8470	8470
Volumen del suelo	c.c.	2134	2134	2135	2135	2130	2130
Peso del suelo húmedo	Gr.	4116	4250	4196	4310	4379	4428
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.929</b>	<b>1.992</b>	<b>1.965</b>	<b>2.018</b>	<b>2.056</b>	<b>2.079</b>

### HUMEDAD

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	126.23	146.94	107.25	127.82	115.30	140.43
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	119.08	135.35	100.48	118.70	108.70	128.61
Peso de la Recipiente	Gr.	55.34	50.10	39.76	50.19	49.47	39.01
Peso del agua	Gr.	7.15	11.59	6.77	9.12	6.60	11.82
Peso del suelo seco	Gr.	63.74	85.25	60.72	68.51	59.23	89.60
Humedad	%	11.22	13.60	11.15	13.31	11.14	13.19
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.735</b>	<b>1.754</b>	<b>1.768</b>	<b>1.781</b>	<b>1.850</b>	<b>1.837</b>



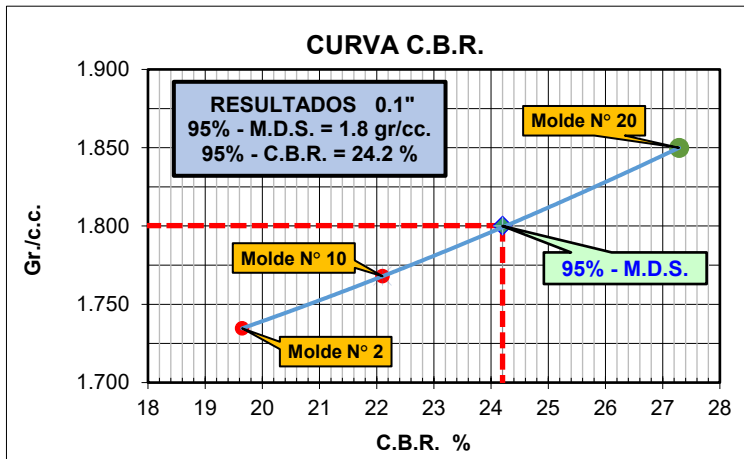
## PENETRACION

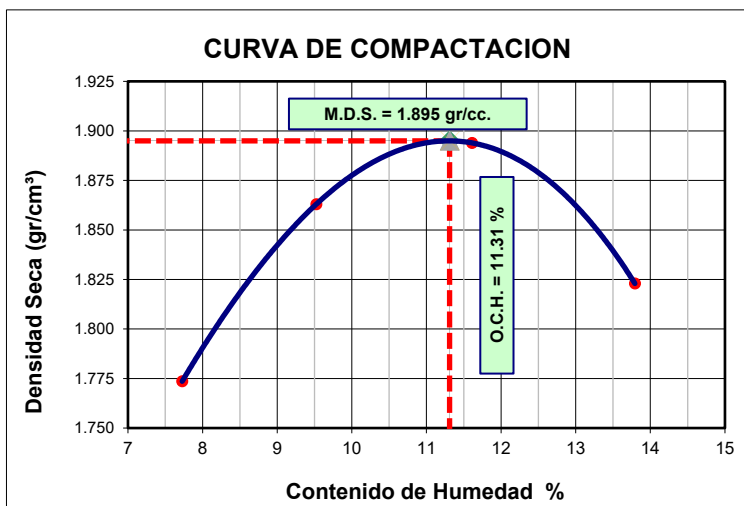
Penetración Pulgadas	Penetracion m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	38.4	1.96	48.7	2.48	24.6	1.25
0.050	1.27	102.7	5.23	111.7	5.69	81.3	4.14
0.075	1.90	179.7	9.15	195.5	9.95	196.2	9.99
0.100	2.54	271.3	13.81	305.2	15.54	376.8	19.19
0.150	3.81	462.9	23.57	553.5	28.18	823.4	41.92
0.200	5.08	613.7	31.25	806.4	41.06	1242.7	63.27
0.250	6.35	729.2	37.13	1050.8	53.50	1576.5	80.27
0.300	7.62	789.1	40.18	1260.7	64.19	1665.2	84.79

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm2</b>
---------------	------------------	-------------------	----------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883		
Condición de la Muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10.00 lbs.
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO
C.B.R.	100% MDS	95% MDS
0.1"	27.29	24.20





**Material de cantera areno-limo-arcilloso + terrasil**

➤ **Material natural + Terrasil 0.3%**

**ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

**M. D. S.** : 1.895 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.31 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	3	19	22			
Capas	Nº	5	5	5			
Golpes por capa	Nº	12	25	56			
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12775	12913	12927	13024	12989	13048
Peso del molde	Gr.	8610	8610	8641	8641	8619	8619
Volúmen del suelo	c.c.	2127	2127	2133	2133	2111	2111
Peso del suelo húmedo	Gr.	4165	4303	4286	4383	4370	4429
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.958</b>	<b>2.023</b>	<b>2.009</b>	<b>2.054</b>	<b>2.070</b>	<b>2.098</b>

**HUMEDAD**

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	106.89	127.34	126.06	140.45	118.76	123.22
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	100.64	116.70	118.04	129.71	111.77	113.52
Peso de la Recipiente	Gr.	44.61	37.23	46.49	47.47	49.68	39.77
Peso del agua	Gr.	6.25	10.64	8.02	10.74	6.99	9.70
Peso del suelo seco	Gr.	56.03	79.47	71.55	82.24	62.09	73.75
Humedad	%	11.15	13.39	11.21	13.06	11.26	13.15
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.762</b>	<b>1.784</b>	<b>1.807</b>	<b>1.817</b>	<b>1.860</b>	<b>1.854</b>

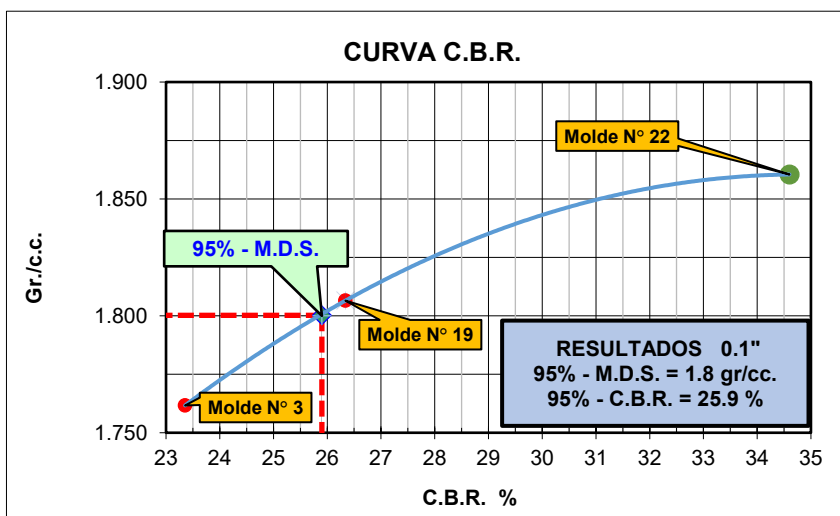
## PENETRACION

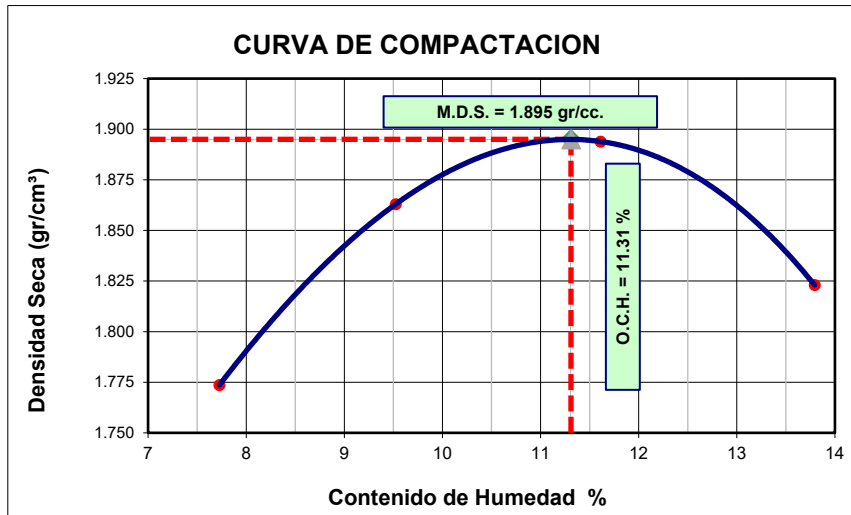
Penetración Pulgadas	Penetracion m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	34.3	1.75	68.1	3.47	37.8	1.92
0.050	1.27	95.8	4.88	165.3	8.42	110.3	5.62
0.075	1.90	198.3	10.10	304.8	15.52	213.8	10.89
0.100	2.54	322.5	16.42	477.8	24.33	363.7	18.52
0.150	3.81	585.3	29.80	879.6	44.79	863.5	43.97
0.200	5.08	800.8	40.77	1315.7	66.99	1420.8	72.34
0.250	6.35	930.7	47.39	1630.9	83.04	1719.8	87.57
0.300	7.62	960.5	48.91	1729.3	88.05	1849.2	94.15

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm<sup>2</sup></b>
---------------	------------------	-------------------	---------------------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	34.60	25.90	
0.2"			





➤ **Material natural + Terrasil 0.5%**

**ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

**M. D. S.** : 1.895 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.31 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

	Nº	10		20			
		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado		
Molde	Nº	2		20			
Capas	Nº	5		5			
Golpes por capa	Nº	12		25			
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12628	12836	12990	13096	12825	12870
Peso del molde	Gr.	8497	8497	8720	8720	8470	8470
Volúmen del suelo	c.c.	2134	2134	2135	2135	2130	2130
Peso del suelo húmedo	Gr.	4131	4339	4270	4376	4355	4400
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.936</b>	<b>2.034</b>	<b>2.000</b>	<b>2.049</b>	<b>2.045</b>	<b>2.066</b>

**HUMEDAD**

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	137.63	122.82	145.50	100.67	99.71	109.75
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	129.43	114.53	135.64	93.33	93.30	102.14
Peso de la Recipiente	Gr.	55.51	50.50	49.46	39.84	35.64	44.13
Peso del agua	Gr.	8.20	8.29	9.86	7.34	6.41	7.61
Peso del suelo seco	Gr.	73.92	64.03	86.18	53.49	57.66	58.01
Humedad	%	11.09	12.95	11.44	13.73	11.12	13.12

Densidad seca	Gr/c.c.	1.743	1.801	1.794	1.802	1.840	1.826
---------------	---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

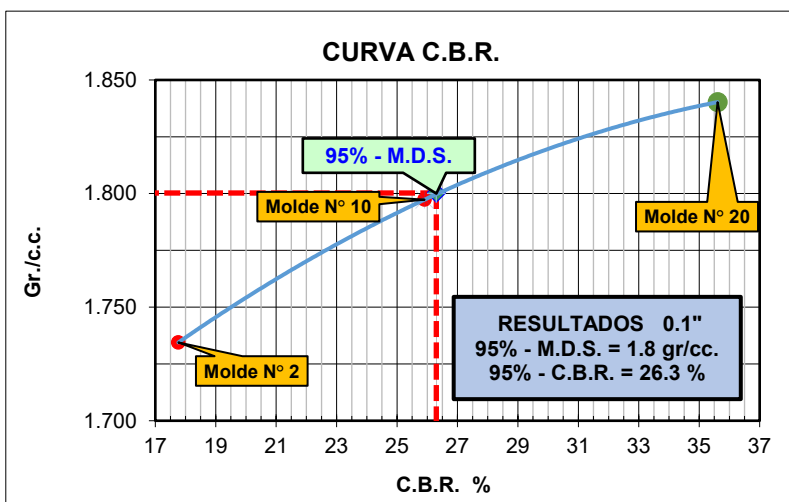
### PENETRACION

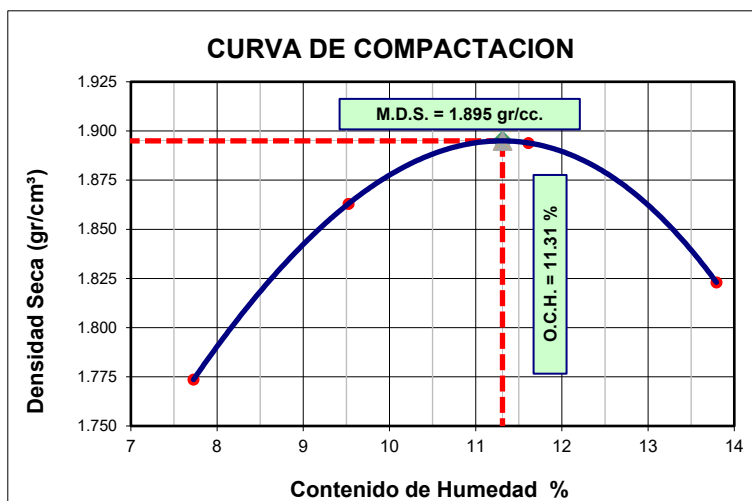
Penetración Pulgadas	Penetración m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	28.7	1.46	37.3	1.90	29.8	1.52
0.050	1.27	76.3	3.88	97.8	4.98	88.3	4.50
0.075	1.90	148.9	7.58	193.3	9.84	203.8	10.38
0.100	2.54	245.3	12.49	347.8	17.71	361.7	18.42
0.150	3.81	489.2	24.91	726.7	37.00	774.2	39.42
0.200	5.08	709.5	36.13	1084.6	55.22	1253.7	63.83
0.250	6.35	864.8	44.03	1340.1	68.23	1669.5	85.01
0.300	7.62	914.3	46.55	1390.6	70.80	1851.8	94.29

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm2</b>
---------------	------------------	-------------------	----------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	35.61	26.30	
0.2"			





➤ **Material natural + Terrasil 0.75%**

**ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

**M. D. S.** : 1.895 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.31 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	8		11		13	
Capas	Nº	5		5		5	
Golpes por capa	Nº	12		25		56	
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12823	12956	12715	12765	13027	13143
Peso del molde	Gr.	8596	8596	8492	8492	8633	8633
Volúmen del suelo	c.c.	2134	2134	2110	2110	2127	2127
Peso del suelo húmedo	Gr.	4227	4360	4223	4273	4394	4510
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.980</b>	<b>2.043</b>	<b>2.001</b>	<b>2.025</b>	<b>2.066</b>	<b>2.121</b>

**HUMEDAD**

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	115.99	115.05	119.02	124.90	109.56	132.01
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	108.28	107.21	111.80	116.56	103.30	121.67
Peso de la Recipiente	Gr.	39.94	43.85	47.45	48.70	47.55	37.78
Peso del agua	Gr.	7.71	7.84	7.22	8.34	6.26	10.34
Peso del suelo seco	Gr.	68.34	63.36	64.35	67.86	55.75	83.89
Humedad	%	11.28	12.37	11.22	12.29	11.23	12.33
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.780</b>	<b>1.818</b>	<b>1.799</b>	<b>1.803</b>	<b>1.857</b>	<b>1.888</b>

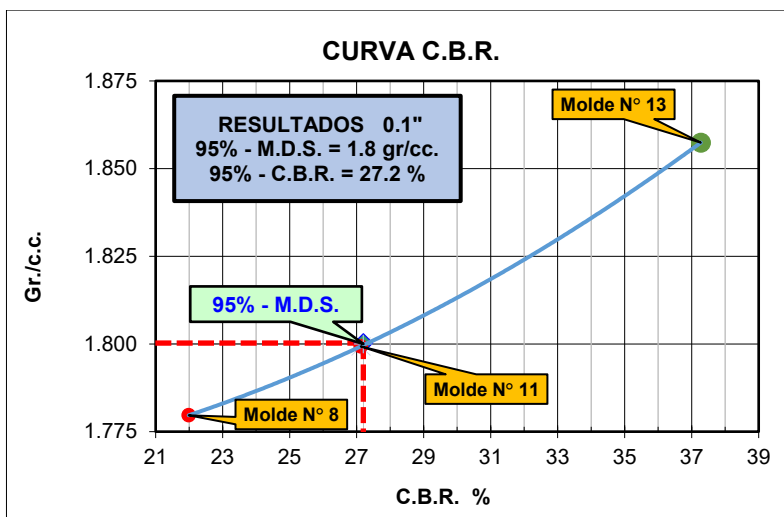
## PENETRACION

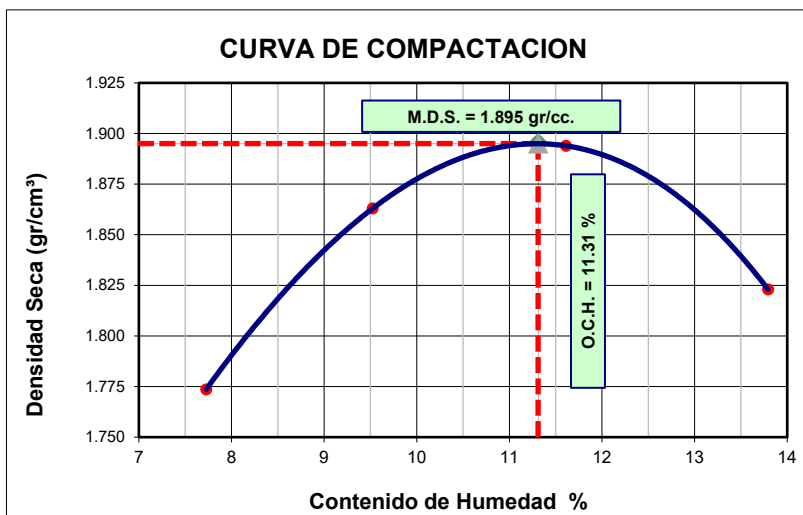
Penetración Pulgadas	Penetración m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	65.8	3.35	123.8	6.30	125.6	6.40
0.050	1.27	152.3	7.75	206.8	10.53	228.3	11.62
0.075	1.90	234.8	11.96	298.9	15.22	381.8	19.44
0.100	2.54	303.6	15.46	374.5	19.07	514.7	26.21
0.150	3.81	473.7	24.12	548.3	27.92	711.8	36.24
0.200	5.08	638.9	32.53	742.5	37.81	899.3	45.79
0.250	6.35	782.8	39.86	938.3	47.77	1140.4	58.07
0.300	7.62	889.3	45.28	1171.2	59.63	1296.3	66.00

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm2</b>
---------------	------------------	-------------------	----------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	37.27	27.20	
0.2"			





➤ **Material natural + Terrasil 1%**

**ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

**M. D. S.** : 1.895 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.31 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	24	20	27			
Capas	Nº	5	5	5			
Golpes por capa	Nº	12	25	56			
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12828	12952	12839	12917	13054	13139
Peso del molde	Gr.	8643	8643	8470	8470	8629	8629
Volúmen del suelo	c.c.	2136	2136	2132	2132	2134	2134
Peso del suelo húmedo	Gr.	4185	4309	4369	4447	4425	4510
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.959</b>	<b>2.017</b>	<b>2.050</b>	<b>2.086</b>	<b>2.073</b>	<b>2.113</b>

**HUMEDAD**

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	126.56	113.66	113.60	130.93	100.13	134.29
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	118.67	106.67	106.03	122.05	94.14	125.04
Peso de la Recipiente	Gr.	48.70	50.50	39.81	48.50	41.33	49.07
Peso del agua	Gr.	7.89	6.99	7.57	8.88	5.99	9.25
Peso del suelo seco	Gr.	69.97	56.17	66.22	73.55	52.81	75.97
Humedad	%	11.28	12.44	11.43	12.07	11.34	12.18
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.761</b>	<b>1.794</b>	<b>1.839</b>	<b>1.862</b>	<b>1.862</b>	<b>1.884</b>



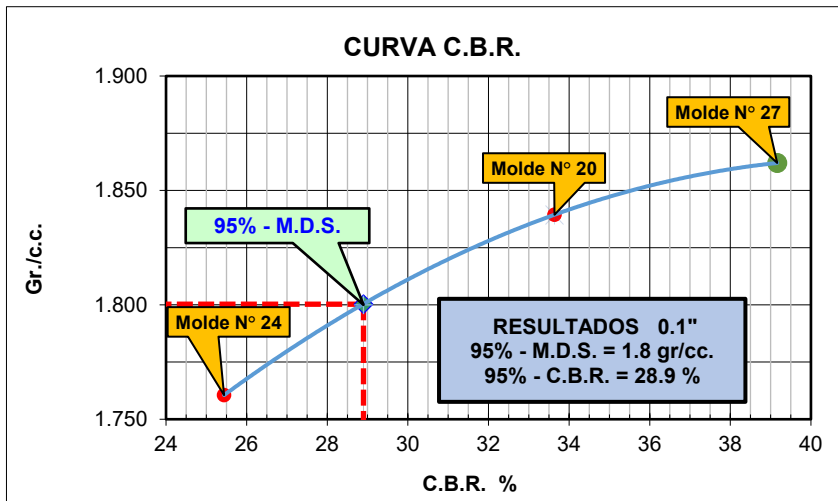
## PENETRACION

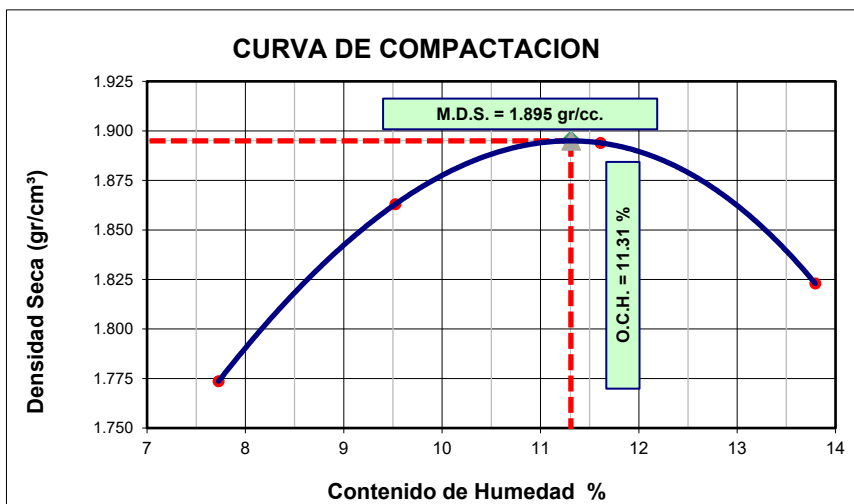
Penetración Pulgadas	Penetración m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	49.3	2.51	42.8	2.18	48.9	2.49
0.050	1.27	100.3	5.11	83.4	4.25	104.6	5.33
0.075	1.90	165.3	8.42	168.1	8.56	178.3	9.08
0.100	2.54	251.3	12.80	264.5	13.47	270.8	13.79
0.150	3.81	411.5	20.95	450.8	22.95	481.3	24.51
0.200	5.08	564.6	28.75	631.7	32.16	690.7	35.17
0.250	6.35	682.7	34.76	789.3	40.19	870.3	44.31
0.300	7.62	783.6	39.90	859.3	43.75	1073.8	54.67

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K =</b>	<b>19.64 cm2</b>
---------------	------------------	-------------------	------------	------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hincharamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	39.16	28.90	
0.2"			



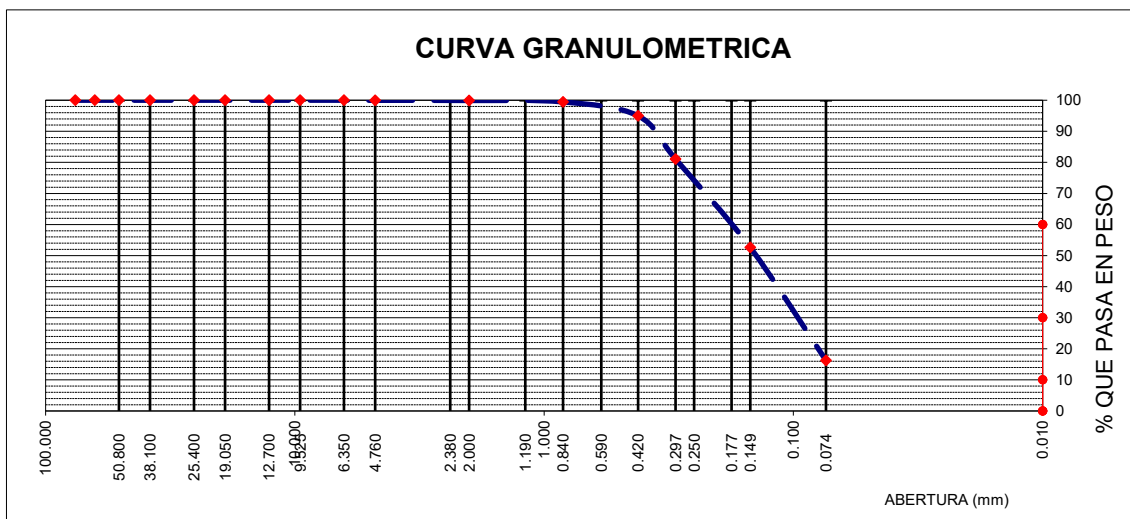


**Material de cantera areno-limo-arcilloso + 0.5% de Cemento**

**Datos de campo:**

**Peso de muestra seca** : 275.65  
**Peso de muestra lavada** : 230.80

Tamices ASTM	Abertura en mm.	Peso Retenido	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	% que Pasa	Especific.	Observaciones
2 1/2"	63.500						L. Líquido : 36.9
2"	50.600						L. Plástico : 26.97
1 1/2"	38.100						Ind. Plástico : 9.93
1"	25.400						Clas. SUCS : SM
3/4"	19.050						Clas. AASHTO : A-2-4 (0)
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
1/4"	6.350				100.00		
Nº4	4.760	0.09	0.03	0.03	99.97		
Nº10	2.000	0.15	0.05	0.09	99.91		
Nº20	0.840	1.25	0.45	0.54	99.46		
Nº40	0.420	12.36	4.48	5.02	94.98		
Nº50	0.297	38.36	13.92	18.94	81.06		
Nº100	0.149	78.36	28.43	47.37	52.63		
Nº200	0.074	100.23	36.36	83.73	16.27		
Pasa Nº200		44.85	16.27				



**ESPECIFICACIONES:** El Análisis Granulométrico por tamizado se realizó según ASTM D-422, Norma Técnica NTP 339.128, clasificación SUCS del suelo según ASTM D-2487 y los tamices cumplen con los requisitos de la Norma NTP 350.001

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a un suelo alterado, fue muestreada e identificada por el solicitante.

**RESULTADOS:** Arena limosa, de color anaranjado, húmeda; porcentaje reducido de partículas finas, clasificada como (SM) A-2-4 (0).

El porcentaje que pasa la malla N° 200 es de 16.27 %

### ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO METODO "A" (ASTM D1557)

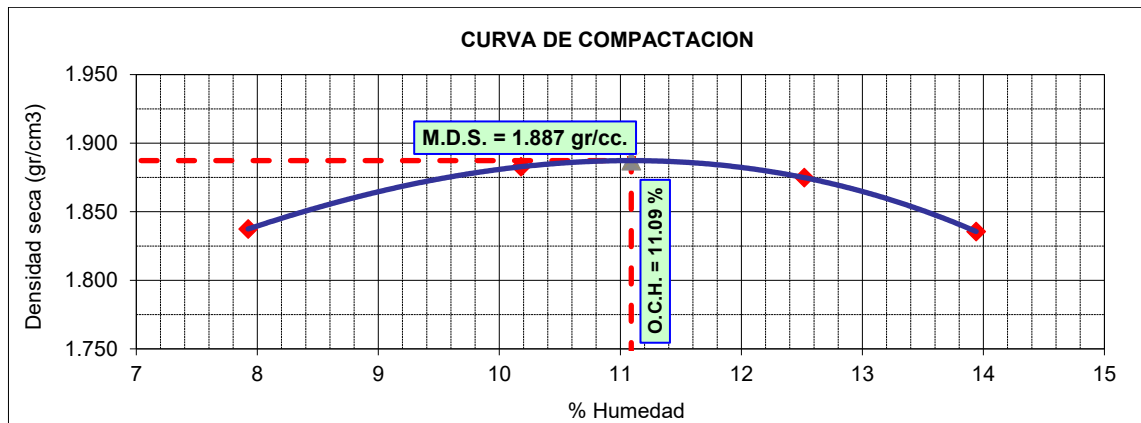
Resultados	
M. D. S.	1.887 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.09 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

#### 1.- Compactación

Prueba N°	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	25	25	25	25
Peso suelo + molde (gr.)	6023	6109	6142	6125
Peso molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	940	940	940	940
Peso suelo compactado (gr.)	1864	1950	1983	1966
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.983	2.074	2.110	2.091

## 2.- Humedad (%)

N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + suelo húmedo (gr.)	93.81	111.75	113.36	104.69	116.42	130.38	131.84	152.73
Recipiente + suelo seco (gr.)	90.51	107.02	107.14	98.64	109.67	120.43	120.73	138.96
Peso de recipiente (gr.)	48.71	47.55	47.55	37.66	50.48	47.46	41.32	39.82
Peso de agua (gr.)	3.30	4.73	6.22	6.05	6.75	9.95	11.11	13.77
Peso de suelo seco (gr.)	41.80	59.47	59.59	60.98	59.19	72.97	79.41	99.14
Humedad (%)	7.89	7.95	10.44	9.92	11.40	13.64	13.99	13.89
Promedio Humedad (%)	7.92		10.18		12.52		13.94	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.837</b>		<b>1.883</b>		<b>1.875</b>		<b>1.836</b>	



**ESPECIFICACIONES:** El Proctor Modificado se realizó según las Normas Técnicas ASTM D1557, por el método "A".

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Conforme al ensayo realizado, el material de muestreo alcanzó una Máxima Densidad Seca 1.887 gr/cm<sup>3</sup>, para un Óptimo contenido de Humedad de 11.09 %.

Según el valor de la humedad óptima obtenida, se recomienda determinar el contenido de materia orgánica de la muestra.

## ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

**M. D. S.** : 1.887 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.09 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	1		9		4	
Capas	Nº	5		5		5	
Golpes por capa	Nº	12		25		56	
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12750	12866	12836	12918	12860	12918
Peso del molde	Gr.	8535	8535	8528	8528	8492	8492
Volúmen del suelo	c.c.	2142	2142	2139	2139	2131	2131
Peso del suelo húmedo	Gr.	4215	4331	4308	4390	4368	4426
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.968</b>	<b>2.022</b>	<b>2.014</b>	<b>2.052</b>	<b>2.050</b>	<b>2.077</b>

### HUMEDAD

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	126.65	127.60	116.25	101.78	105.25	123.71
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	119.20	118.31	109.55	95.02	98.59	115.72
Peso de la Recipiente	Gr.	51.52	45.82	48.57	37.87	37.86	48.43
Peso del agua	Gr.	7.45	9.29	6.70	6.76	6.66	7.99
Peso del suelo seco	Gr.	67.68	72.49	60.98	57.15	60.73	67.29
Humedad	%	11.01	12.82	10.99	11.83	10.97	11.87
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.773</b>	<b>1.792</b>	<b>1.815</b>	<b>1.835</b>	<b>1.848</b>	<b>1.857</b>

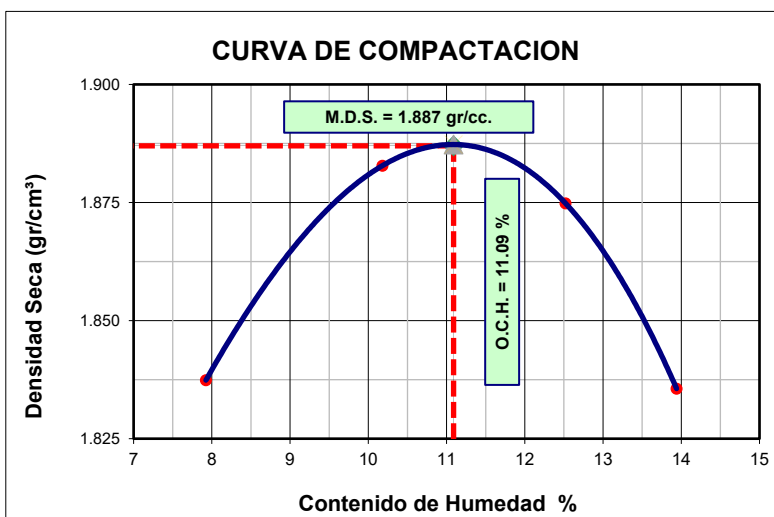
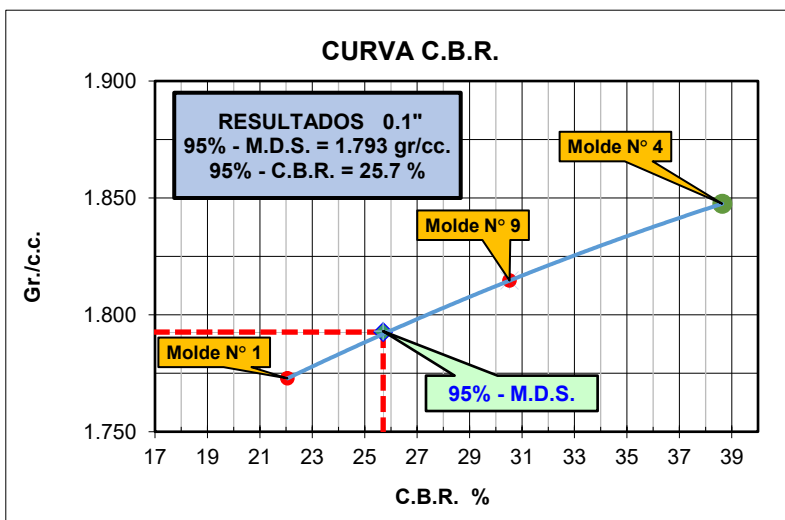
### PENETRACION

Penetración Pulgadas	Penetracion m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm <sup>2</sup>	Kg	kg/cm <sup>2</sup>	Kg	kg/cm <sup>2</sup>
0.025	0.63	81.7	4.16	126.3	6.43	159.3	8.11
0.050	1.27	129.4	6.59	235.8	12.01	280.8	14.30
0.075	1.90	198.9	10.13	284.7	14.50	407.3	20.74
0.100	2.54	304.5	15.50	421.5	21.46	533.5	27.16
0.150	3.81	546.8	27.84	667.1	33.97	759.1	38.65
0.200	5.08	736.5	37.50	892.3	45.43	990.3	50.42
0.250	6.35	936.5	47.68	1129.3	57.50	1263.5	64.33
0.300	7.62	1045.7	53.24	1406.5	71.61	1509.1	76.84

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm<sup>2</sup></b>
---------------	------------------	-------------------	---------------------------------

**DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883		
Condición de la Muestra		4 días de saturación
Sobrecarga		10.00 lbs.
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO
C.B.R.	100% MDS	95% MDS
0.1"	38.63	25.70
0.2"		



**Material de cantera areno-limo-arcilloso + Terrasil + Cemento**

- **Material natural + Terrasil 0.3% + 0.5% Cemento**

## ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

### METODO "A" (ASTM D1557)

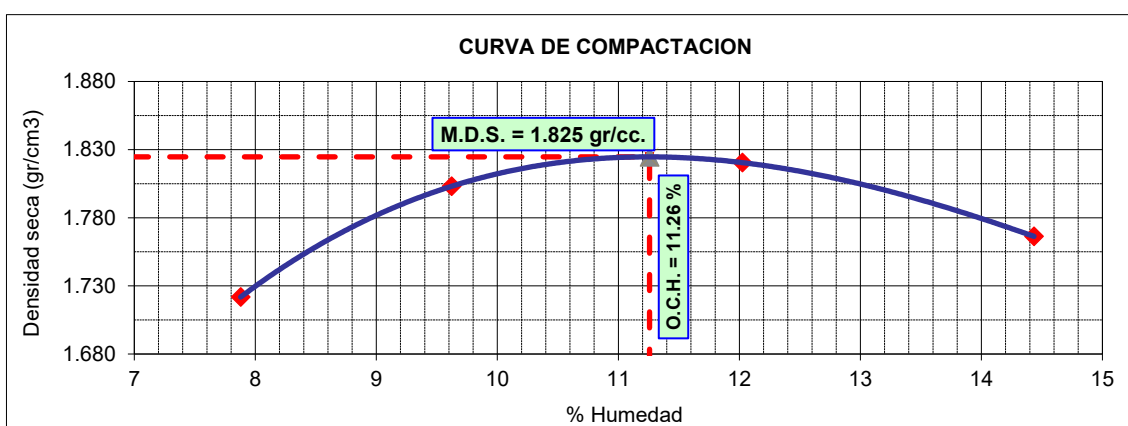
Resultados	
M. D. S.	1.825 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.26 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

#### 1.- Compactación

Prueba N°	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	25	25	25	25
Peso suelo + molde (gr.)	5905	6017	6076	6059
Peso molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	940	940	940	940
Peso suelo compactado (gr.)	1746	1858	1917	1900
Densidad humeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.857	1.977	2.039	2.021

#### 2.- Humedad (%)

N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + suelo húmedo (gr.)	125.66	122.57	131.65	128.47	117.85	119.69	154.68	145.36
Recipiente + suelo seco (gr.)	119.93	117.15	124.63	120.55	109.39	111.77	141.96	132.49
Peso de recipiente (gr.)	46.98	48.57	51.27	38.69	39.28	45.68	53.69	43.48
Peso de agua (gr.)	5.73	5.42	7.02	7.92	8.46	7.92	12.72	12.87
Peso de suelo seco (gr.)	72.95	68.58	73.36	81.86	70.11	66.09	88.27	89.01
Humedad (%)	7.85	7.90	9.57	9.68	12.07	11.98	14.41	14.46
Promedio Humedad (%)	7.88		9.62		12.03		14.43	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.722</b>		<b>1.803</b>		<b>1.820</b>		<b>1.766</b>	



**ESPECIFICACIONES:** El Proctor Modificado se realizó según las Normas Técnicas ASTM D1557, por el método "A".

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Conforme al ensayo realizado, el material de muestreo alcanzó una Máxima Densidad Seca 1.825 gr/cm<sup>3</sup>, para un Óptimo contenido de Humedad de 11.26 %.

### ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

**M. D. S.** : 1.825 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.26 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	5		6		7	
Capas	Nº	5		5		5	
Golpes por capa	Nº	12		25		56	
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12520	12639	12670	12753	13066	13133
Peso del molde	Gr.	8501	8501	8595	8595	8788	8788
Volúmen del suelo	c.c.	2129	2129	2129	2129	2115	2115
Peso del suelo húmedo	Gr.	4019	4138	4075	4158	4278	4345
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.888</b>	<b>1.944</b>	<b>1.914</b>	<b>1.953</b>	<b>2.023</b>	<b>2.055</b>

### HUMEDAD

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	141.70	148.47	155.22	147.56	129.06	143.70
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	131.85	136.69	144.25	137.11	120.53	134.09
Peso de la Recipiente	Gr.	45.71	40.70	48.05	50.07	45.00	53.82
Peso del agua	Gr.	9.85	11.78	10.97	10.45	8.53	9.61
Peso del suelo seco	Gr.	86.14	95.99	96.20	87.04	75.53	80.27
Humedad	%	11.43	12.27	11.40	12.01	11.29	11.97
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.694</b>	<b>1.731</b>	<b>1.718</b>	<b>1.744</b>	<b>1.818</b>	<b>1.835</b>

### PENETRACION

Penetración Pulgadas	Penetracion m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm <sup>2</sup>	Kg	kg/cm <sup>2</sup>	Kg	kg/cm <sup>2</sup>
0.025	0.63	29.8	1.52	65.1	3.31	74.8	3.81
0.050	1.27	75.5	3.84	125.6	6.40	207.9	10.59
0.075	1.90	144.8	7.37	205.8	10.48	370.5	18.86
0.100	2.54	236.5	12.04	307.3	15.65	534.8	27.23
0.150	3.81	469.3	23.90	561.5	28.59	835.5	42.54
0.200	5.08	737.9	37.57	836.3	42.58	1085.8	55.29

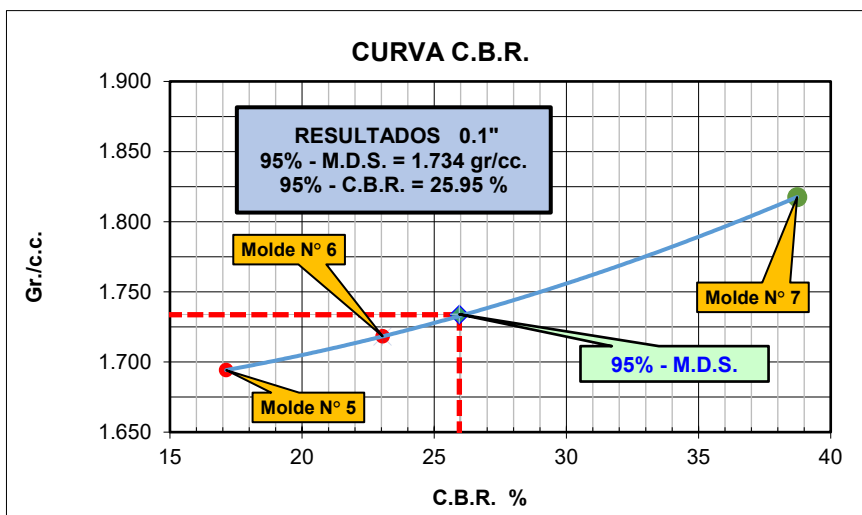


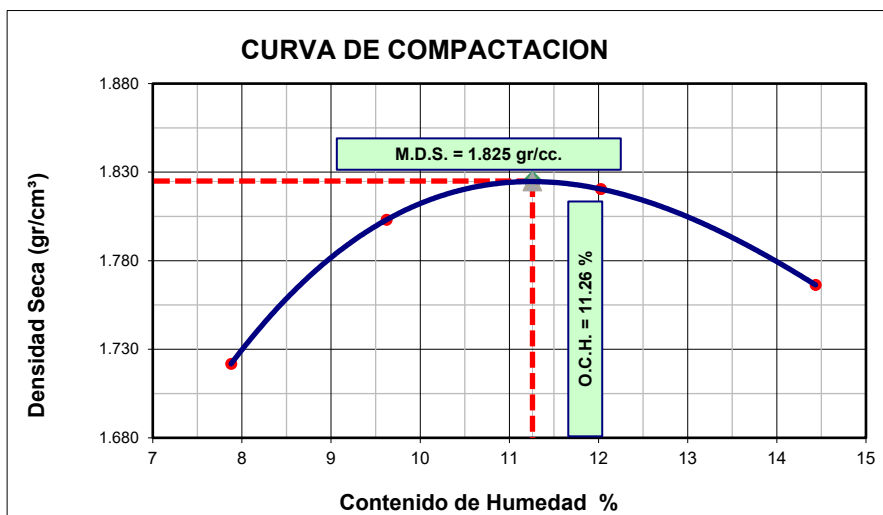
0.250	6.35	896.3	45.64	1053.5	53.64	1266.3	64.48
0.300	7.62	998.6	50.85	1283.9	65.37	1375.5	70.04

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K =</b>	<b>19.64 cm<sup>2</sup></b>
---------------	------------------	-------------------	------------	-----------------------------

**DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	38.73	25.95	
0.2"			





➤ **Material natural + Terrasil 0.5% + 0.5% Cemento**

**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO  
METODO "A" (ASTM D1557)**

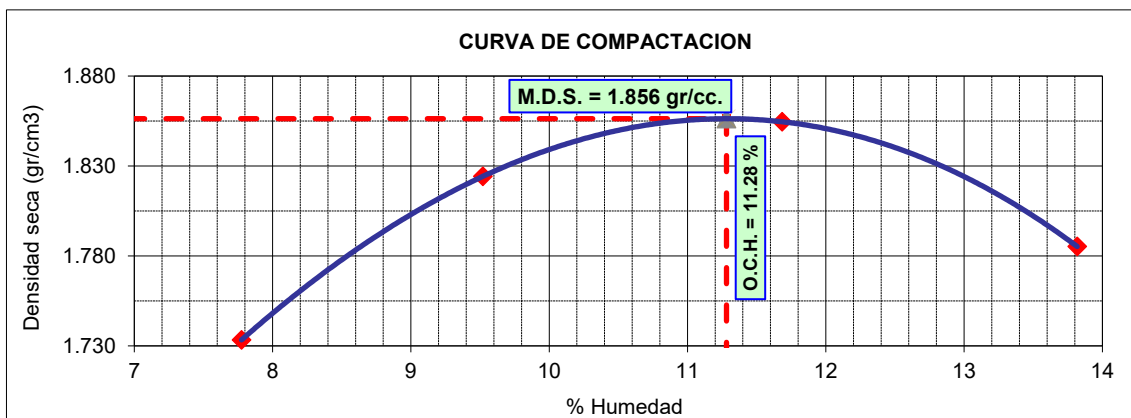
Resultados	
M. D. S.	1.856 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.28 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

**1.-Compactación**

Prueba N°	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	25	25	25	25
Peso suelo + molde (gr.)	5915	6037	6106	6069
Peso molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	940	940	940	940
Peso suelo compactado (gr.)	1756	1878	1947	1910
Densidad humeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.868	1.998	2.071	2.032

**2.- Humedad (%)**

N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + suelo húmedo (gr.)	128.36	127.45	136.47	108.95	118.70	103.69	125.87	117.59
Recipiente + suelo seco (gr.)	122.36	121.82	128.43	102.94	111.05	96.97	116.31	108.21
Peso de recipiente (gr.)	46.39	48.25	43.69	40.02	43.69	41.02	48.75	38.65
Peso de agua (gr.)	6.00	5.63	8.04	6.01	7.65	6.72	9.56	9.38
Peso de suelo seco (gr.)	75.97	73.57	84.74	62.92	67.36	55.95	67.56	69.56
Humedad (%)	7.90	7.65	9.49	9.55	11.36	12.01	14.15	13.48
Promedio Humedad (%)	7.78		9.52		11.68		13.82	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>1.733</b>		<b>1.824</b>		<b>1.855</b>		<b>1.785</b>	



**ESPECIFICACIONES:** El Proctor Modificado se realizó según las Normas Técnicas ASTM D1557, por el método "A"

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Conforme al ensayo realizado, el material de muestreo alcanzó una Máxima Densidad Seca 1.856 gr/cm<sup>3</sup>, para un Óptimo contenido de Humedad de 11.28 %.

Según el valor de la humedad óptima obtenida, se recomienda determinar el contenido de materia orgánica de la muestra.

### ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

**M. D. S.** : 1.856 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.28 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

	Nº	12		14		15	
		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Molde	Nº	5		5		5	
Capas	Nº	12		25		56	
Golpes por capa	Nº	12		25		56	
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12533	12690	12679	128794	12884	13048
Peso del molde	Gr.	8501	8501	8571	8571	8599	8599
Volúmen del suelo	c.c.	2139	2139	2132	2132	2144	2144
Peso del suelo húmedo	Gr.	4032	4189	4108	120223	4285	4449
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.885</b>	<b>1.958</b>	<b>1.927</b>	<b>56.401</b>	<b>1.999</b>	<b>2.075</b>

### HUMEDAD

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	155.40	114.71	129.33	139.59	160.00	146.07
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	144.25	106.17	120.93	130.40	147.44	135.47
Peso de la Recipiente	Gr.	44.11	37.87	48.49	48.58	37.38	39.50

Peso del agua	Gr.	11.15	8.54	8.40	9.19	12.56	10.60
Peso del suelo seco	Gr.	100.14	68.30	72.44	81.82	110.06	95.97
Humedad	%	11.13	12.50	11.60	11.23	11.41	11.05
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.696</b>	<b>1.741</b>	<b>1.727</b>	<b>50.706</b>	<b>1.794</b>	<b>1.869</b>

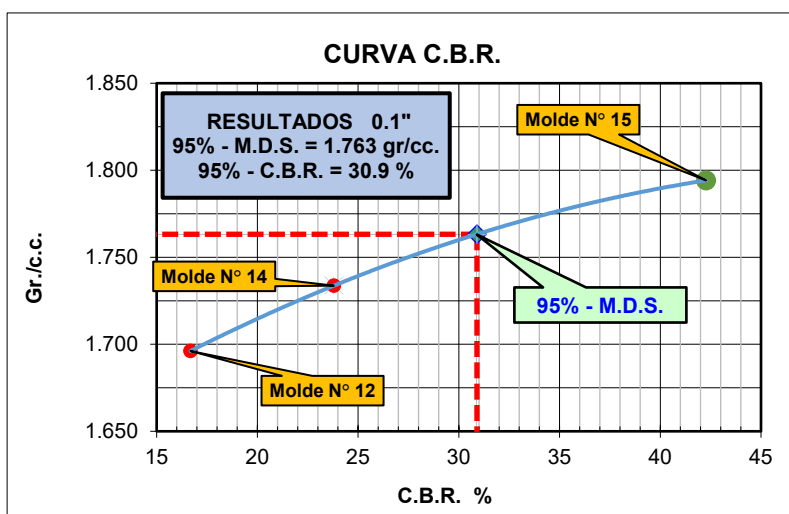
### PENETRACION

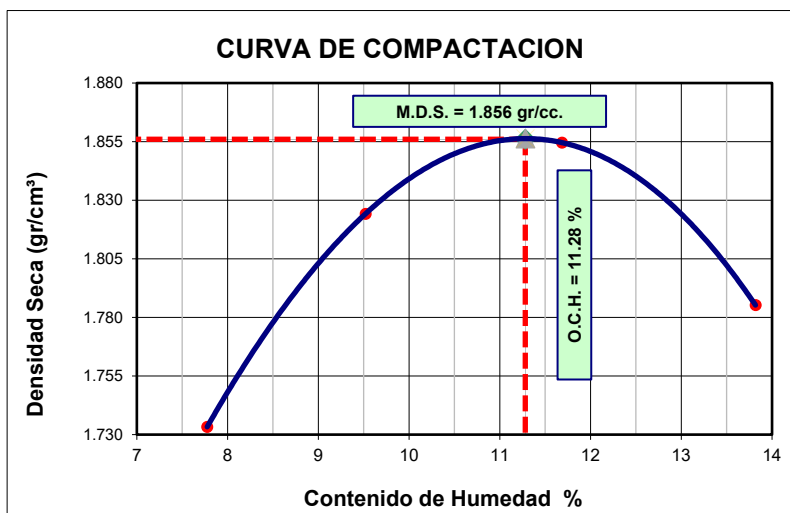
Penetración Pulgadas	Penetración m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	32.2	1.64	55.3	2.82	101.3	5.16
0.050	1.27	67.3	3.43	130.5	6.64	238.8	12.16
0.075	1.90	133.4	6.79	197.8	10.07	376.1	19.15
0.100	2.54	230.3	11.73	328.6	16.73	503.7	25.65
0.150	3.81	500.8	25.50	604.8	30.79	865.3	44.06
0.200	5.08	820.1	41.76	896.8	45.66	1183.5	60.26
0.250	6.35	1134.3	57.75	1204.3	61.32	1593.8	81.15
0.300	7.62	1449.7	73.81	1569.4	79.91	1926.7	98.10

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K =</b>	<b>19.64 cm2</b>
---------------	------------------	-------------------	------------	------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	42.27	30.90	
0.2"			





➤ **Material natural + Terrasil 0.75% + 0.5% Cemento**

### ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO METODO "A" (ASTM D1557)

Resultados	
M. D. S.	1.867 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.69 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

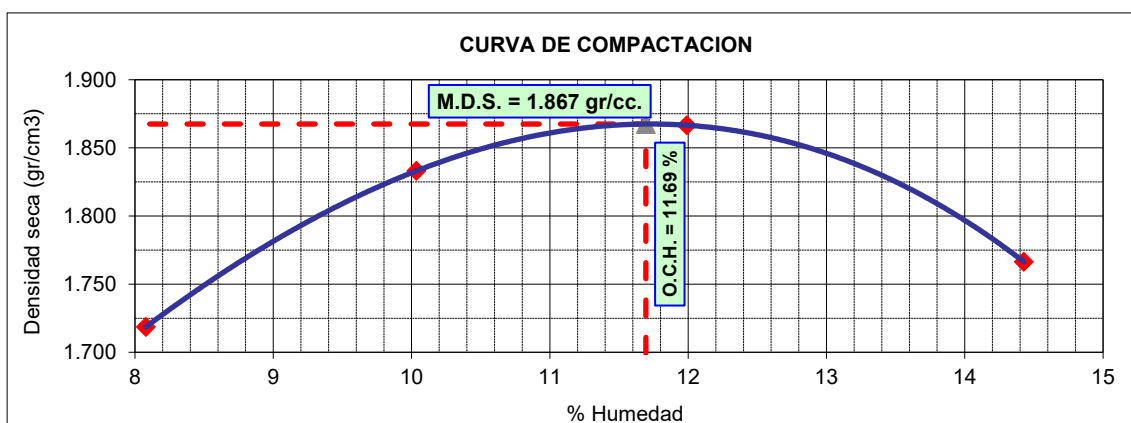
#### 1.- Compactación

Prueba N°	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	25	25	25	25
Peso suelo + molde (gr.)	5905	6055	6124	6059
Peso molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	940	940	940	940
Peso suelo compactado (gr.)	1746	1896	1965	1900
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.857	2.017	2.090	2.021

#### 2.- Humedad (%)

N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + suelo húmedo (gr.)	125.63	136.95	111.36	145.24	136.52	145.24	132.54	114.52
Recipiente + suelo seco (gr.)	119.73	129.96	105.36	135.46	126.49	134.95	121.65	104.96
Peso de recipiente (gr.)	46.52	43.65	45.85	37.52	42.34	49.63	46.24	38.63
Peso de agua (gr.)	5.90	6.99	6.00	9.78	10.03	10.29	10.89	9.56
Peso de suelo seco (gr.)	73.21	86.31	59.51	97.94	84.15	85.32	75.41	66.33
Humedad (%)	8.06	8.10	10.08	9.99	11.92	12.06	14.44	14.41
Promedio Humedad (%)	8.08		10.03		11.99		14.43	

Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.719	1.833	1.867	1.766
-------------------------------------	-------	-------	-------	-------



**ESPECIFICACIONES:** El Proctor Modificado se realizó según las Normas Técnicas ASTM D1557, por el método "A".

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Conforme al ensayo realizado, el material de muestreo alcanzó una Máxima Densidad Seca 1.867 gr/cm<sup>3</sup>, para un Óptimo contenido de Humedad de 11.69 %.

Según el valor de la humedad óptima obtenida, se recomienda determinar el contenido de materia orgánica de la muestra.

### ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

**M. D. S.** : 1.867 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.69 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	16	17	18			
Capas	Nº	5	5	5			
Golpes por capa	Nº	12	25	56			
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12682	12789	12748	12835	12955	13045
Peso del molde	Gr.	8584	8584	8559	8559	8653	8653
Volúmen del suelo	c.c.	2114	2114	2133	2133	2138	2138

Peso del suelo húmedo	Gr.	4098	4205	4189	4276	4302	4392
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.939</b>	<b>1.989</b>	<b>1.964</b>	<b>2.005</b>	<b>2.012</b>	<b>2.054</b>

### **HUMEDAD**

N° de Recipiente	N°	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	142.45	140.62	134.60	132.51	147.36	162.47
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	133.29	131.42	124.80	123.52	137.58	151.28
Peso de la Recipiente	Gr.	54.30	49.67	41.30	46.97	52.86	47.65
Peso del agua	Gr.	9.16	9.20	9.80	8.99	9.78	11.19
Peso del suelo seco	Gr.	78.99	81.75	83.50	76.55	84.72	103.63
Humedad	%	11.60	11.25	11.74	11.74	11.54	10.80
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.737</b>	<b>1.788</b>	<b>1.758</b>	<b>1.794</b>	<b>1.804</b>	<b>1.854</b>

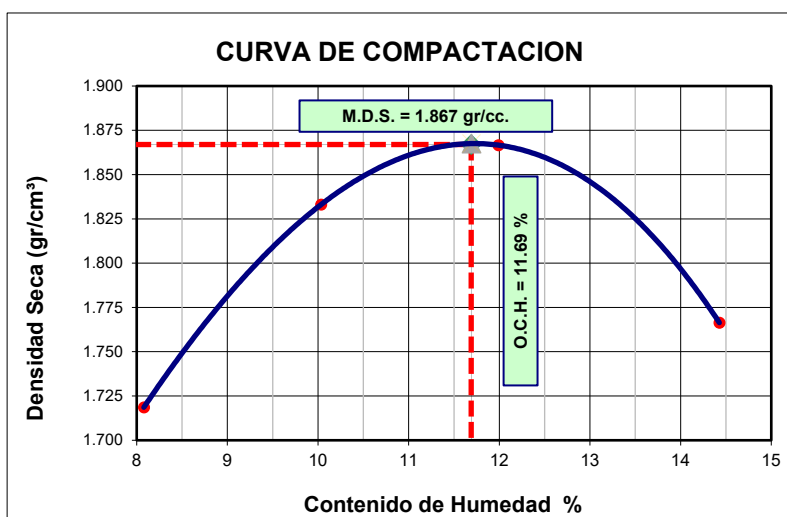
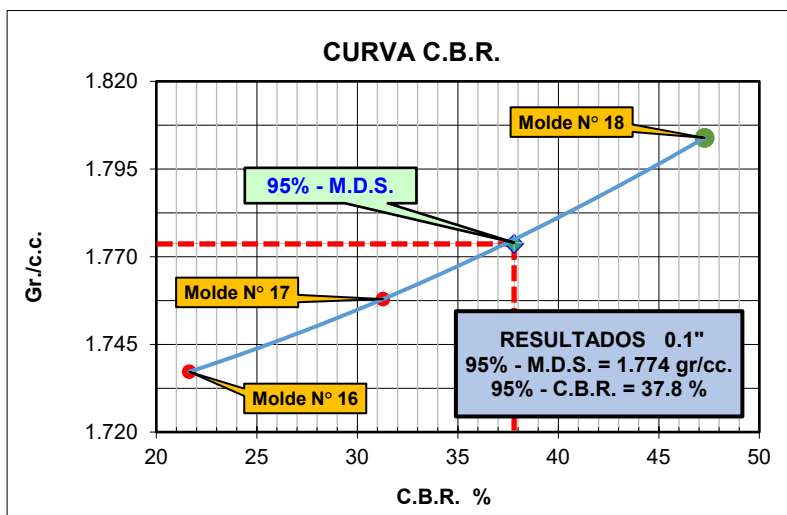
### **PENETRACION**

Penetración Pulgadas	Penetracion m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2	Kg	kg/cm2
0.025	0.63	25.4	1.29	59.7	3.04	71.2	3.63
0.050	1.27	65.8	3.35	191.3	9.74	218.3	11.12
0.075	1.90	169.3	8.62	290.8	14.81	419.7	21.37
0.100	2.54	298.8	15.21	431.9	21.99	652.8	33.24
0.150	3.81	629.7	32.06	686.8	34.97	1133.5	57.71
0.200	5.08	1026.5	52.27	913.9	46.53	1568.9	79.88
0.250	6.35	1285.2	65.44	1196.3	60.91	1905.2	97.01
0.300	7.62	1365.9	69.55	1578.3	80.36	2089.5	106.39

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm2</b>
---------------	------------------	-------------------	----------------------

### **DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)**

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883			
Condición de la Muestra		4 días de saturación	
Sobrecarga		10.00 lbs.	
Hincharamiento promedio		NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS	
0.1"	47.27	37.80	
0.2"			



➤ **Material natural + Terrasil 1 % + 0.5% Cemento**

**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO  
METODO "A" (ASTM D1557)**

<b>Resultados</b>	
M. D. S.	1.896 gr/cm <sup>3</sup>
O. C. H.	11.76 %
Clas. SUCS	SM
Clas. AASHTO	A-2-4 (0)

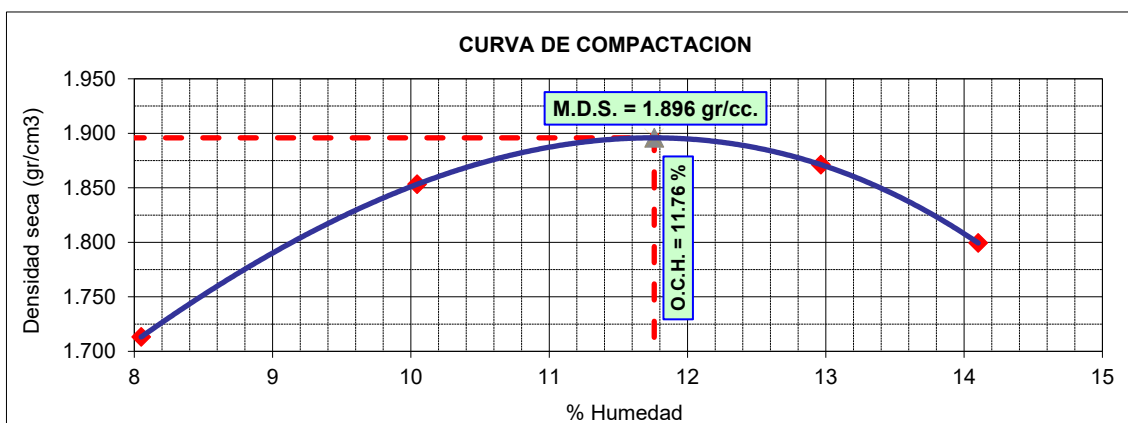
Molde	N°	21	23	25
Capas	N°	5	5	5
Golpes por capa	N°	12	25	56



Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12815	12950	12919	12995	13172	13222
Peso del molde	Gr.	8636	8636	8652	8652	8743	8743
Volúmen del suelo	c.c.	2134	2134	2133	2133	2140	2140
Peso del suelo húmedo	Gr.	4179	4314	4267	4343	4429	4479
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.958</b>	<b>2.021</b>	<b>2.000</b>	<b>2.036</b>	<b>2.070</b>	<b>2.093</b>

### HUMEDAD

N° de Recipiente	N°	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	163.27	167.77	146.44	182.94	133.15	140.86
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	152.14	154.56	136.65	169.27	123.52	131.61
Peso de la Recipiente	Gr.	52.06	51.58	49.07	51.75	37.21	49.39
Peso del agua	Gr.	11.13	13.21	9.79	13.67	9.63	9.25
Peso del suelo seco	Gr.	100.08	102.98	87.58	117.52	86.31	82.22
Humedad	%	11.12	12.83	11.18	11.63	11.16	11.25
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.762</b>	<b>1.791</b>	<b>1.799</b>	<b>1.824</b>	<b>1.862</b>	<b>1.881</b>



**ESPECIFICACIONES:** El Proctor Modificado se realizó según las Normas Técnicas ASTM D1557, por el método "A".

**OBSERVACIONES:** La muestra corresponde a suelo alterado, fueron muestreadas por el solicitante y trasladadas al laboratorio.

**RESULTADOS:** Conforme al ensayo realizado, el material de muestreo alcanzó una Máxima Densidad Seca 1.896 gr/cm<sup>3</sup>, para un Óptimo contenido de Humedad de 11.76 %.

Según el valor de la humedad óptima obtenida, se recomienda determinar el contenido de materia orgánica de la muestra.

### ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

**M. D. S.** : 1.896 gr/cm<sup>3</sup>  
**O. C. H.** : 11.76 %  
**Clas. SUCS** : SM  
**Clas. AASHTO** : A-2-4 (0)

Molde	Nº	21	23	25			
Capas	Nº	5	5	5			
Golpes por capa	Nº	12	25	56			
Condición de muestra		Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado	Hum. Optima	Saturado
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12815	12950	12919	12995	13172	13222
Peso del molde	Gr.	8636	8636	8652	8652	8743	8743
Volúmen del suelo	c.c.	2134	2134	2133	2133	2140	2140
Peso del suelo húmedo	Gr.	4179	4314	4267	4343	4429	4479
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.958</b>	<b>2.021</b>	<b>2.000</b>	<b>2.036</b>	<b>2.070</b>	<b>2.093</b>

#### HUMEDAD

Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	163.27	167.77	146.44	182.94	133.15	140.86
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	152.14	154.56	136.65	169.27	123.52	131.61
Peso de la Recipiente	Gr.	52.06	51.58	49.07	51.75	37.21	49.39
Peso del agua	Gr.	11.13	13.21	9.79	13.67	9.63	9.25
Peso del suelo seco	Gr.	100.08	102.98	87.58	117.52	86.31	82.22
Humedad	%	11.12	12.83	11.18	11.63	11.16	11.25
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.762</b>	<b>1.791</b>	<b>1.799</b>	<b>1.824</b>	<b>1.862</b>	<b>1.881</b>

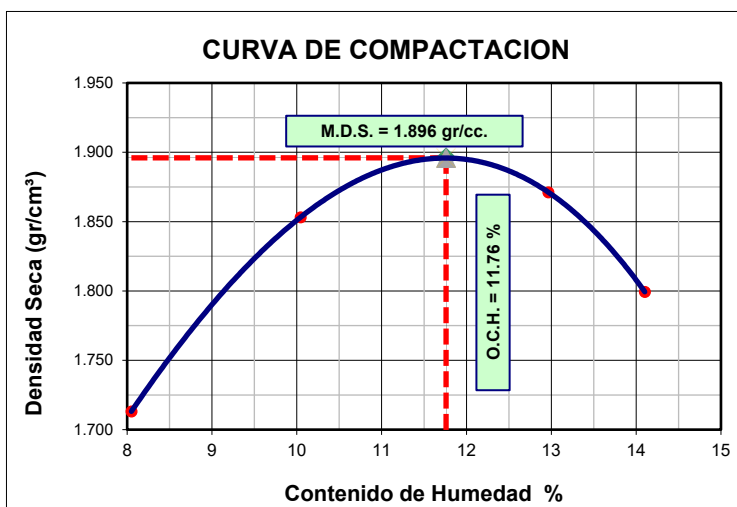
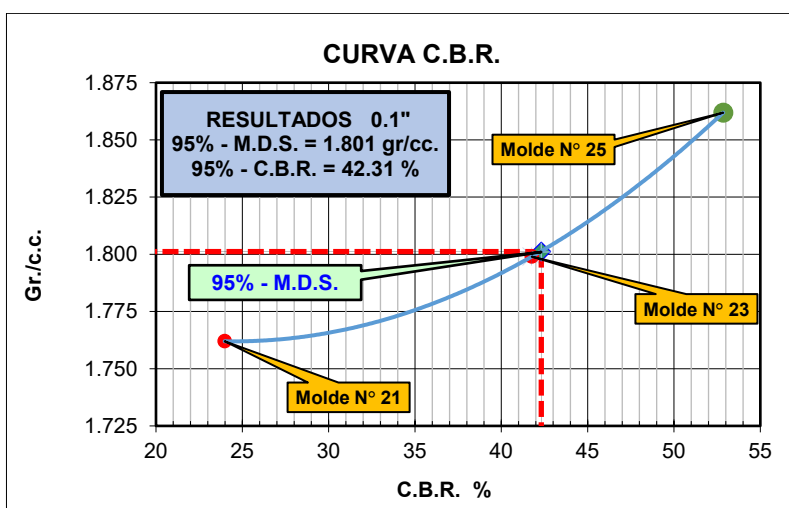
#### PENETRACION

Penetración Pulgadas	Penetracion m.m	Carga		Carga		Carga	
		Kg	kg/cm <sup>2</sup>	Kg	kg/cm <sup>2</sup>	Kg	kg/cm <sup>2</sup>
0.025	0.63	50.4	2.57	110.8	5.64	148.5	7.56
0.050	1.27	108.8	5.54	261.7	13.32	296.9	15.12
0.075	1.90	190.7	9.71	394.8	20.10	469.5	23.91
0.100	2.54	331.1	16.86	576.7	29.36	729.8	37.16
0.150	3.81	681.2	34.68	926.3	47.16	1156.3	58.87
0.200	5.08	1056.8	53.81	1226.5	62.45	1547.8	78.81
0.250	6.35	1322.3	67.33	1485.3	75.63	1801.1	91.71
0.300	7.62	1474.7	75.09	1624.5	82.71	1874.2	95.43

<b>ANILLO</b>	<b>CAPACIDAD</b>	<b>SOBRECARGA</b>	<b>K = 19.64 cm<sup>2</sup></b>
---------------	------------------	-------------------	---------------------------------

### DETERMINACION DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE ENSAYO DE PENETRACION C.B.R. (ASTM D-1883)

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1883		
Condición de la Muestra	4 días de saturación	
Sobrecarga	10.00 lbs.	
Hinchamiento promedio	NO EXPANSIVO	
C.B.R.	100% MDS	95% MDS
0.1"	52.85	42.31
0.2"		



### Anexo N° 1. Matriz de consistencia

<b>TÍTULO: “Estabilización química de suelos arcillosos en Selva Baja. Aplicación de aditivo Terrasil para mejoramiento de material de base en vía de acceso Vella Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021”.</b>					
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables</b>	<b>Indicadores (x)</b>	<b>Índices</b>
¿Cuáles son los efectos que produce la aplicación de estabilizantes químicos en el comportamiento de los suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja, y cómo realizar el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú 2021?	Evaluar la realización de la estabilización química de suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja, mediante la aplicación del aditivo Terrasil en suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú, 2021.	“La aplicación del estabilizante químico Terrasil en el suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, mejora sus características físicas y Mecánicas convirtiéndolo en material apropiado para ser usado en la base de la vía de acceso “Villa Milagritos”.	<b>Variable independiente X<sub>1</sub>:</b>  Base de suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja.	-Contenido de humedad. -Granulometría  - Peso unitario  - Peso específico.  - pH suelo  - Próctor  -California Bearing Ratio (CBR)	Valores numéricos con su unidad de medida para todos los indicadores
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>		<b>Variables</b>	<b>Indicadores (y)</b>	<b>Índices</b>
<b>1. ¿Cuáles son los efectos que producen los estabilizantes químicos en el comportamiento de suelos arcillosos en carreteras no pavimentadas en Selva Baja, a través de la aplicación alternativa de aditivo Terrasil en el suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III para su uso en la base de la estructura del pavimento de</b>	1. Determinar los efectos de la aplicación de estabilizantes químicos en el comportamiento de suelos, a través de la aplicación del aditivo Terrasil, para estabilización del suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del		<b>Variable dependiente Y<sub>1</sub>:</b>  Estabilización química de suelos de Cantera Milagritos III mediante aplicación de aditivo Terrasil.	- Porcentaje óptimo de aditivo estabilizante Terrasil.	Valores numéricos con su unidad de medida para todos los indicadores

<p>la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú 2021?</p> <p>2. ¿Cómo conocer el diseño óptimo para la dosificación del aditivo estabilizante Terrasil, para satisfacer el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú 2021?</p> <p>3. ¿Cuáles son las ventajas técnicas, económicas y ambientales que ofrecen los proveedores del aditivo estabilizante Terrasil, para la estabilización química y mejoramiento del suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021?</p>	<p>pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021.</p> <p>2. Probar varios diseños para conocer el diseño óptimo de dosificación del aditivo Terrasil, en la estabilización química del suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021.</p> <p>3. Describir las ventajas técnicas, económicas y ambientales que ofrecen los proveedores del aditivo Terrasil, para la estabilización química y mejoramiento del suelo arcilloso de la Cantera Milagritos III, para su uso en la base de la estructura del pavimento de la vía de acceso Villa Milagritos – San Juan Bautista, Perú, 2021.</p>			<p>-Contenido de humedad.</p> <p>-Granulometría</p> <p>-Peso unitario</p> <p>-Peso específico.</p> <p>- pH suelo estabilizado</p> <p>-Próctor</p> <p>-California Bearing Ratio (CBR)</p>	
--	---	--	--	--	--