



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

TÍTULO PROFESIONAL
TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
(Proyecto Profesional)

ESTUDIO EXPLORATORIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND DE
SUBRASANTE DE SUELO ARENO-ARCILLOSO EN CARRETERA NO
PAVIMENTADA “EL PAUJIL”, LORETO. IQUITOS, 2019

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL

AUTORES: Bach. ALATA MESTANZA, JHANK PIER
 Bach. VÁSQUEZ JO, ROQUE CÉSAR

ASESOR: Ing. IRIGOIN CABRERA, ULISES OCTAVIO

San Juan Bautista – Loreto – Maynas –Perú
2019

DEDICATORIA

A MIS QUERIDOS PADRES

MARCIAL Y RICARDINA,

*Por sus esfuerzos del día a día
para brindarme el apoyo, la
educación y la enseñanza
necesaria para lograr mis
objetivos y metas trazadas.*

A MIS HERMANAS

LANAEL, BRITNY y LIZ,

*Por las enseñanzas y ser parte
de mi vida, para que vean en
mí el camino que deban seguir
y aspirar en sus estudios para
ser el orgullo de la familia.*

A MI AMADA

MAMITA MARIA

*Por demostrarme el bello camino
hacia el éxito por medios de sus
motivaciones y consejos.*

Jhank Pier, Alata Mestanza.

*A mis amados padres **Roque Vásquez y Edith Jo**, para que a través de este informe vean coronados sus esfuerzos para mi logro profesional y así cada día crecer como persona.*

*A mi esposa **Nora Saboya Torrejón** para que sepa que sus palabras y consejos me impulsaron a la consecuencia de este informe.*

*A mis queridos hermanos **Jessy, Eidan, Jamil y Daniela**, para que vean en mi trabajo la continuidad de sus propias aspiraciones y sigan el ejemplo de estudio y trabajo que nuestros padres nos enseñaron con amor y dedicación.*

*Por último y no menos importante a mi abuela **Edi Pastor**, que siempre estará orgullosa de mis logros.*

Roque César, Vásquez Jo.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por permitirme lograr mis objetivos.

Al **Programa Nacional de Becas y Créditos (PRONABEC)**, por brindarme la oportunidad de ser parte de este grupo de estudiantes que buscan superarse el día a día y contar con una educación superior.

Al Asesor del Proyecto de Investigación: **MSc. Ulises Octavio Irigoín Cabrera**, por su apoyo y orientación durante el desarrollo del presente proyecto.

Al **laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP**, por facilitarnos sus instalaciones, materiales y equipos para hacer posible la ejecución de este proyecto profesional.

A mis familiares por el apoyo indiscutible e incondicional, en especial a mis **Padres, hermanas y madre abuela**.

A mis **amigos** por su constante motivación para mis logros.

Alata Mestanza, Jhank Pier.

A los **funcionarios, profesionales y trabajadores del Proyecto Especial Binacional Desarrollo Integral de la Cuenca del río Putumayo – PEBDICP** y en especial a **William Pablo Soria Ruiz y Javier Shupingahua Tangoa**, quienes no escatimaron su tiempo y depositaron su confianza para la ejecución de mi informe.

A los **docentes que laboran dentro de la Facultad de Ciencias e Ingeniería – UCP** por sus valiosas enseñanzas.

La vida es hermosa, y una de las principales características de esta hermosura es que la podemos compartir y disfrutar con quienes amamos, podemos ayudar y guiar a muchas personas si ellas lo permiten, pero también podemos ser ayudados y guiados durante nuestras vidas; por esto mismo, quiero exaltar la labor de **Asteria Marín Alvis** y **Pedro Javier Porras Sasieta**, que siempre están apoyándome en todo emprendimiento que tenga.

Vásquez Jo, Roque César.



Universidad Científica del Perú

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

**FACULTAD
CIENCIAS E
INGENIERÍA**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Con Resolución Decanal N° 574 -2019- UCP - FCEI del 11 de julio de 2019, la **FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP** designa como Jurado Evaluador y Dictaminador de la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional a los Señores:

- | | |
|--|------------|
| • Ing. Carol Begoña García Langer, Mg. | Presidente |
| • Ing. Félix Wong Ramírez, M. Sc. | Miembro |
| • Lic. Nerea Gallardo Sánchez, Mg. | Miembro |

En la ciudad de Iquitos, siendo las 18:00 pm, del día miércoles 17 de julio de 2019, en las instalaciones de la UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa del Trabajo de Suficiencia Profesional:

**"ESTUDIO EXPLORATORIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND
DE SUBRASANTE DE SUELO ARENO-ARCILLOSO EN CARRETERA NO
PAVIMENTADA "EL PAUJIL", LORETO. IQUITOS, 2019"**

Presentado por los sustentantes:

JHANK PIER ALATA MESTANZA y ROQUE CÉSAR VÁSQUEZ JO

Asesor: **Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M. Sc.**

Como requisito para optar el título profesional de: **Ingeniero Civil**

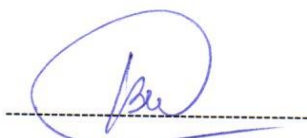
Luego de escuchar la Sustentación y formuladas las preguntas las que fueron:..... *absueltas*

El jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión:

Por lo que la Sustentación es: *aprobado por unanimidad*

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


Miembro


Presidente


Miembro

CALIFICACIÓN:	Aprobado (a) Excelencia	: 19 - 20
	Aprobado (a) Unanimidad	: 16 - 18
	Aprobado (a) Mayoría	: 13 - 15
	Desaprobado (a)	: 00 - 12

Av. Abelardo Quiñones Km. 2,5 San Juan Bautista, Iquitos Telf.: (065) 261074

APROBACIÓN

Proyecto de Investigación sustentado en acto público el día 17 de Julio a las 18:00 horas del 2019.



Ing. Carol Begoña García Langer, Mg.

PRESIDENTE DEL JURADO



Ing. Félix Wong Ramírez, M.Sc.

MIEMBRO DEL JURADO



Lic. Nerea Gallardo Sánchez, Mg.

MIEMBRO DEL JURADO



Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M.Sc.

ASESOR

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	VI
APROBACIÓN.....	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
CAPÍTULO I.....	1
- INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II.....	3
- MARCO REFERENCIAL.....	3
2.1. ANTECEDENTES.....	3
2.2. BASES TEÓRICAS.....	5
CAPÍTULO III.....	30
- MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. METODOLOGÍA.....	30
3.2. TIPO DE ESTUDIO.....	30
3.3. DISEÑO DE ESTUDIO.....	30
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	31
3.5. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	32
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	32
3.7. MATERIALES Y EQUIPOS A UTILIZAR.....	34
3.8. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS A REALIZAR.....	35

CAPÍTULO IV	39
- RESULTADOS	39
4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	39
4.2. ENSAYO LÍMITES ATTERBERG	40
4.3. ENSAYO PROCTOR MODIFICADO	41
4.4. ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)	49
- INTERPRETACIÓN	65
4.5. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	65
4.6. LÍMITES DE ATTERBERG	66
4.7. ENSAYO PROCTOR	67
4.8. ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)	69
4.9. RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS	71
CAPÍTULO V	72
- DISCUSIÓN	72
CAPÍTULO VI	76
- CONCLUSIONES	76
- RECOMENDACIONES	77
- ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Símbolos de Fases del Suelo.....	7
Tabla 2: Reglas para Determinar el Índice de Grupo.....	15
Tabla 3 : Clasificación de Materiales para Subrasantes de Carreteras.....	16
<i>Tabla 4: Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos</i>	
<i>Tipo Grava.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5: Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos</i>	
<i>Arenosos.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6: Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos</i>	
<i>Limosos y Arcillosos.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 7: Efectividad de los Agentes Estabilizadores.....</i>	<i>20</i>
Tabla 8: Dosificación de Cemento.....	23
Tabla 9: Cantidad de Muestra por Calicata.....	31
Tabla 10: Cantidad de Muestra a Ensayar.....	31
Tabla 11: Fases de Recopilación de Datos.....	32
Tabla 12: Ensayos (estándares y especiales) a realizar en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP.....	33
Tabla 13: Materiales a Utilizar para realizar el Proyecto.....	34
Tabla 14: Equipos a Utilizar para realizar el Proyecto.....	34
Tabla 15: Procedimiento de Análisis Granulométrico por Tamizado	35
Tabla 16: Procedimiento de Límite Líquido	35
Tabla 17: Procedimiento de Límite Plástico.....	36
Tabla 18: Procedimiento de Proctor Modificado	36
Tabla 19: Procedimiento de Ensayo de Relación de Soporte California.....	37
Tabla 20: Resultado de Análisis Granulométrico	39
Tabla 21: Resultado de Límite Líquido	40
Tabla 22: Resultado de Límite Plástico	40
Tabla 23: Resultado de Compactación Proctor en Estado Natural.....	41
Tabla 24: Resultado de Humedad Proctor en Estado Natural	41
Tabla 25: Resultado de Compactación Proctor con 4% de Cemento	43
Tabla 26: Resultado de Humedad Proctor con 4% de Cemento.....	43
Tabla 27: Resultado de Compactación Proctor con 6% de Cemento	45
Tabla 28: Resultado de Humedad Proctor con 6% de Cemento.....	45
Tabla 29: Resultado de Compactación Proctor con 8% de Cemento	47
Tabla 30: Resultado de Humedad Proctor con 8% de Cemento.....	47

Tabla 31: Densidad del Suelo Ensayo CBR en Estado Natural	49
Tabla 32: Expansión del Suelo en Estado Natural	50
Tabla 33: Ensayo Penetración CBR en Estado Natural	50
Tabla 34: Densidad del Suelo Ensayo CBR con 4% de Cemento.....	53
Tabla 35: Expansión del Suelo con 4% de Cemento.....	54
Tabla 36: Ensayo Penetración CBR con 4% de Cemento	54
Tabla 37: Densidad del Suelo Ensayo CBR con 6% de Cemento.....	57
Tabla 38: Expansión del Suelo con 6% de Cemento.....	58
Tabla 39: Ensayo Penetración CBR con 6% de Cemento	58
Tabla 40: Densidad del Suelo Ensayo CBR con 8% de Cemento.....	61
Tabla 41: Expansión del Suelo con 8% de Cemento.....	62
Tabla 42: Ensayo Penetración CBR con 8% de Cemento	62
Tabla 43: Resultados Obtenidos de los Ensayos.....	71
Tabla 44: Comparación de Resultados con Otras Tesis	72
Tabla 45: Grupos de Porcentaje de Finos	73
Tabla 46: Grado de Expansión.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras 1 : Fases del Suelo	6
Figuras 2: Prueba del límite Líquido: (a) Dispositivo para la Prueba; (b) Ranurador; (c) Pasta de Suelo antes de la Prueba; (d) Pasta de Suelo después de la Prueba.	11
Figuras 3: Prueba del Límite Plástico.	12
Figuras 4: Carta de Plasticidad.....	19
Figuras 5: Curvatura Granulométrica	39
Figuras 6: Curvatura de Flujo	40
Figuras 7: Curva de Compactación de Suelo en Estado Natural	42
Figuras 8: Curva de Compactación de Suelo con 4% de Cemento.....	44
Figuras 9: Curva de Compactación de Suelo con 6% de Cemento.....	46
Figuras 10: Curva de Compactación de Suelo con 8% de Cemento	48
Figuras 11: Curva de Penetración CBR en Estado Natural: (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes.....	51
Figuras 12: Curva CBR en Estado Natural	52
Figuras 13: Curva de Penetración CBR con 4% de Cemento: (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes.....	55
Figuras 14: Curva CBR con 4% de Cemento	56
Figuras 15: Curva de Penetración CBR con 6% de Cemento: (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes.....	59
Figuras 16: Curva CBR con 6% de Cemento	60
Figuras 17: Curva de Penetración CBR con 8% de Cemento : (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes.....	63
Figuras 18: Curva CBR con 8% de Cemento	64
Figuras 19: % Que Pasa la Malla N° 200	65
Figuras 20: Límites de Atterberg de la Muestra.....	66
Figuras 21: Densidad Máxima del Suelo	67
Figuras 22: Humedad Optima del Suelo	68
Figuras 23: Comparación de los Valores Máximos de Expansión.....	69
Figuras 24: Comparación de los Valores de CBR% del Suelo	70
Figuras 25: Proceso de Extracción de Muestra - Calicata Exploratoria N°01.....	82
Figuras 26: Proceso de Análisis Granulométrico	82
Figuras 27: Proceso de Ensayo Límite Líquido.....	83
Figuras 28: Proceso de Ensayo Límite Plástico	83

<i>Figuras 29: Proceso de Ensayo Proctor Modificado</i>	<i>84</i>
<i>Figuras 30: Proceso de Ensayo CBR.....</i>	<i>84</i>

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: FORMATO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	78
ANEXO 2: FORMATO DE LÍMITES ATTERBERG	79
ANEXO 3: FORMATO DE PROCTOR MODIFICADO	80
ANEXO 4: FORMATO DE ENSAYO CBR.....	81
ANEXO 5: PANEL FOTOGRÁFICO	82
ANEXO 6: MAPA DE UBICACIÓN	85

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la modificación de una subrasante de suelo areno-arcilloso, efecto de la adición en diferentes proporciones de cemento portland como material estabilizante en la carretera no pavimentada “El Paujil” código LO-524, para así poder cumplir con los requerimientos de las normas establecidas.

Se busca obtener valores adecuados de las propiedades del suelo natural conformante de la subrasante de la carretera de bajo tránsito y no pavimentada en mención, habiéndose aplicado proporciones de 4%, 6% y 8% de cemento portland.

Para ello se realizaron los ensayos de laboratorio: Análisis Granulométrico, límites de consistencia, determinación del peso específico máximo y humedad óptima (Proctor), y el Valor Relativo de Soporte (CBR), del material en estado natural; y similarmente estabilizado con cemento portland.

Los resultados obtenidos de los ensayos de CBR, en estado natural es de 22.60%, de suelo-cemento (proporción 4%) es de 138.00%, de suelo-cemento (proporción 6%) es de 148.00% y de suelo-cemento (proporción 8%) es de 258.00%; estos resultados obtenidos son satisfactorios, pues los porcentajes de 4%, 6% y 8% de cemento portland incorporado al suelo natural lograron obtener valores altos, e indican que se ha logrado un buen material para subrasante e inclusive para ser usado como base del pavimento.

Palabras Claves: suelo areno – arcilloso, estabilización, cemento, carretera no Pavimentada, CBR,

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to evaluate the mechanical properties of the modification of a subgrade of sandy-clayey soil, the effect of the addition in different proportions of portland cement as a stabilizing material, on the unpaved road "El Paujil" code LO-524, for thus being able to comply with the requirements of the established norms.

It seeks to obtain adequate values of the properties of the natural soil that forms the subgrade of the low traffic and unpaved road in mention, having applied proportions of 4%, 6% and 8% of Portland cement.

For this, laboratory tests were carried out: Granulometric Analysis, consistency limits, determination of the maximum specific weight and optimum humidity (Proctor), and the Relative Support Value (CBR); of the material in its natural state, and similarly stabilized with Portland cement.

The results obtained from the CBR tests, in the natural state is 22.60%, soil-cement (proportion 4%) is 138.00%, soil-cement (proportion 6%) is 148.00% and soil-cement (proportion 8%)) is 258.00%; These obtained results are satisfactory, because the percentages of 4%, 6% and 8% of portland cement incorporated to the natural soil were able to obtain high values, and indicate that a good subgrade material and even to be used as a base of the pavement has been achieved.

CAPÍTULO I

- INTRODUCCIÓN

La inestabilidad del suelo para la construcción es un problema muy frecuente en distintos lugares del mundo, pues debido a ello y al no realizar un adecuado estudio del mismo, grandes infraestructuras colapsan presentando expansiones, hundimientos y/o desprendimientos. En Perú pasa lo mismo, la mayoría de los suelos sufren estas amenazas para la Industria de la Construcción.

La presente investigación titulada “ESTUDIO EXPLORATORIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND DE SUBRASANTE DE SUELO ARENO-ARCILLOSO EN CARRETERA NO PAVIMENTADA “EL PAUJIL”, LORETO – IQUITOS, 2019”, tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la modificación de una subrasante de suelo areno-arcilloso, como efecto de la adición en diferentes proporciones de cemento portland como material estabilizante, de la carretera no pavimentada “El Paujil”, para así poder cumplir con los requerimientos de las normas establecidas.

El cemento portland como material estabilizante de suelos de fundación es utilizado en las capas subrasantes mayormente, en esta investigación se estudió el efecto del citado material estabilizante agregándolo en ciertas proporciones a un suelo areno-arcilloso de la subrasante de una carretera no pavimentada y de bajo tránsito, específicamente de la carretera “El Paujil” código LO-524, la que inicia a la altura del Km 35.50 de la carretera Iquitos Nauta, distrito de San Juan Bautista, Loreto - Perú.

La investigación está plenamente justificada, porque la Universidad contribuye de esta manera a resolver los problemas de su entorno y dentro de la línea de investigación “Ingeniería de los materiales y Construcción de Infraestructura”; bajo el entendido del objetivo fundamental de estabilizar las carreteras no pavimentadas es posible prestar a los usuarios un servicio de calidad que satisfaga sus necesidades de movilidad; y, en este caso, el proyecto se orienta a brindar una mejor calidad de vida en la población de diversas comunidades asentadas a ambos lados de esta vía de penetración que se dedican a las actividades agrícola y piscícola, cuyos excedentes de producción son transportados por esta carretera para el suministro de la población de la ciudad metropolitana de Iquitos.

En el aporte al conocimiento, esta investigación está justificada, porque se busca la mejora de las características físicas y mecánicas de las materiales in situ como una alternativa que ofrece la ventaja de la reducción del tiempo de construcción y costos de acarreo, pero a la par el comportamiento mecánico de los suelos amazónicos no es del todo conocido.

El uso de cemento para estabilizar suelos ha sido considerado en el área de la ingeniería como una contribución significativa, ya que tiene múltiples aplicaciones en el campo de la construcción especialmente para la estabilización en base, sub base y sub rasante para carreteras; requiriendo para su adecuado desempeño, material selecto y relativamente pequeñas cantidades de cemento, generando así un nuevo material compuesto, comúnmente conocido como “Suelo - Cemento”; el cual presenta una gran versatilidad ya que permite ampliar de manera considerable la utilización de casi todos los suelos como materiales de construcción. Para garantizar la buena calidad de las capas estabilizadas con suelo cemento es necesario que estas sean durables, para lograr dicha durabilidad es indispensable que estas tengan elevada capacidad de soporte y resista a los agentes atmosféricos, por lo que la etapa de diseño es esencial para este fin. (Flores Flores, 2015)

El trabajo de Investigación consistió en la realización de una serie de ensayos del material en estado natural y estabilizado con cemento portland, adicionando proporciones de 4%, 6% y 8%, encontrándose valores de resistencia muy altos a partir del 4% de adición del material estabilizante.

El presente proyecto está conformado en 4 partes: LA PRIMERA: ALCANCE DEL TEMA, de las cuales integra el capítulo 1: Introducción, LA SEGUNDA: FUNDAMENTACIÓN, que integra el capítulo 2: Marco Referencial; LA TERCERA: METODOLOGÍA, integrada por el capítulo 3: Materiales y Métodos; y LA CUARTA PARTE: RESULTADOS, que integran los capítulos 4: Resultados obtenidos de la investigación e interpretación, capítulo 5: Discusión, capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO II

- MARCO REFERENCIAL

2.1. ANTECEDENTES

En el año 2016, Deivys Ismael Hidalgo Benavides, en su trabajo experimental titulada: *Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzimas orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub rasante*, indica que la utilización de elementos tales como el cemento y las enzimas orgánicas en los procesos de estabilización de suelos arcillosos son de gran beneficio al momento de realizar obras de construcción debido a que el lugar de cimentación de las mismas se conforma de manera homogénea, intensificando las propiedades de este suelo arcilloso; razón por la cual se toma a consideración para la presente investigación las aplicaciones e indagaciones que han desarrollado a través de los años varios autores a cerca de los mencionados procesos de estabilización. (Hidalgo Benavides, 2016)

El cemento usado como estabilizador de suelo se desarrolla especialmente para la construcción de carreteras y presas de tierra. De acuerdo a la primera aplicación de este proceso de estabilización de suelo-cemento en Estados Unidos en el año de 1935, se demostró que el cemento es usado para estabilizar suelo de tipo arenoso y arcilloso, causando en estos la disminución de límite líquido, así como también incrementando el índice de plasticidad y la manejabilidad de suelos arcillosos. (Braja M. , 1999)

En el año 2009, Pedro Antonio Serigos, en su trabajo de investigación titulada: *Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la formación pampeano y cemento portland*, Al estabilizar el suelo con cemento Portland, la hidratación de este produce compuestos que a la vez reaccionan con los minerales arcillosos del suelo generando un material cementante que contribuye a la unión de las partículas de suelo y a estas con el cemento endurecido. Esto da como resultado un material dotado de cierta rigidez y resistencia mecánica, con una mayor estabilidad volumétrica y durabilidad que el suelo primitivo. Por lo que puede observarse, el suelo no es un material inerte, los materiales arcillosos poseen minerales que reaccionan con los agentes estabilizantes formando nuevos compuestos que modifican sus propiedades. Suelos con igual granulometría y con los mismos límites

de Atterberg reaccionarán de modo distinto ante el mismo cemento según los tipos y proporciones de minerales presentes en la fracción arcillosa. Por esto es que es importante estudiar los efectos que provoca el agente estabilizante sobre cada suelo en particular. (Serigos, 2009)

En el año 2015, Segura Romero Cesar Diego, en su trabajo de investigación titulada: Estabilización de suelos de alta plasticidad usando cemento portland en el departamento de Lambayeque, La estabilización de suelos es una técnica cuyo fin es modificar sus características mediante la incorporación de un conglomerante (normalmente cal y/o cemento) para permitir su aprovechamiento. (Segura Romero, 2015)

En el año 2015, Flores Flores Jaime Saul, en su trabajo de investigación titulada: Estabilización de suelos con fines de conformación de la estructura de un pavimento flexible estabilizado con cemento en la ciudad de Juliaca, La estabilización de suelos para el diseño y construcción de pavimentos se define como un mejoramiento de los materiales de sub rasante, sub base 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. (Flores Flores, 2015)

En el año 2010, Murillo Vasquez Eithel Xavier, en su trabajo de investigación titulada: Estudio del comportamiento de las bases de pavimentos rígidos en la ciudad de Cuenca y su influencia en el diseño, A pesar de considerarse que la base estabilizada con cemento, tiene un mejor comportamiento desde el punto de vista estructural, dándose una menor deformabilidad, mayor resistencia, menor permeabilidad, con lo que se reducen los efectos del bombeo en el pavimento que es una de las causas para el fracaso de la estructura. Sin embargo, en base al análisis económico que se presentan en las tablas 28 y 29 de las distintas alternativas de diseño, la alternativa 2 es decir la que utiliza base sin estabilizar, resulta ser la menos costosa, existiendo una diferencia del 6.7% en costo, entre el diseño de ésta y la que utiliza base estabilizada con cemento. Con el fin de obtener una base estabilizada con cemento de buena calidad, es necesario realizar una mezcla homogénea, evitando así obtener zonas en las que se den concentraciones de cemento superiores a otras. Es necesario dar la importancia que ameritan los estudios y diseños con el fin de garantizar que éstos y los trabajos que se ejecutan

en base a ellos se relacionen entre sí y sean lo más ajustados a la realidad. (Murillo Vasquez, 2010)

En el año 2010, Melvin Darío Vásquez Concha, en su tesis titulada: Pavimentos no tradicionales para carreteras de selva baja con bajo volumen de tránsito, aplicación: carretera Contamana – Aguas Calientes, Loreto, indica: La estabilización con cemento portland se comporta mejor con suelos arenosos y gravosos. El diseño de la mezcla de la estabilización con cemento es mejor realizarla con por resistencia, con ensayos de compresión simple y no con el ensayo de capacidad de soporte, esta se ajusta mejor para la estabilización cal y asfalto. (Vásquez Concha, 2010)

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. SUELO

2.2.1.1 DEFINICIÓN

Para los fines de esta obra, la palabra suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

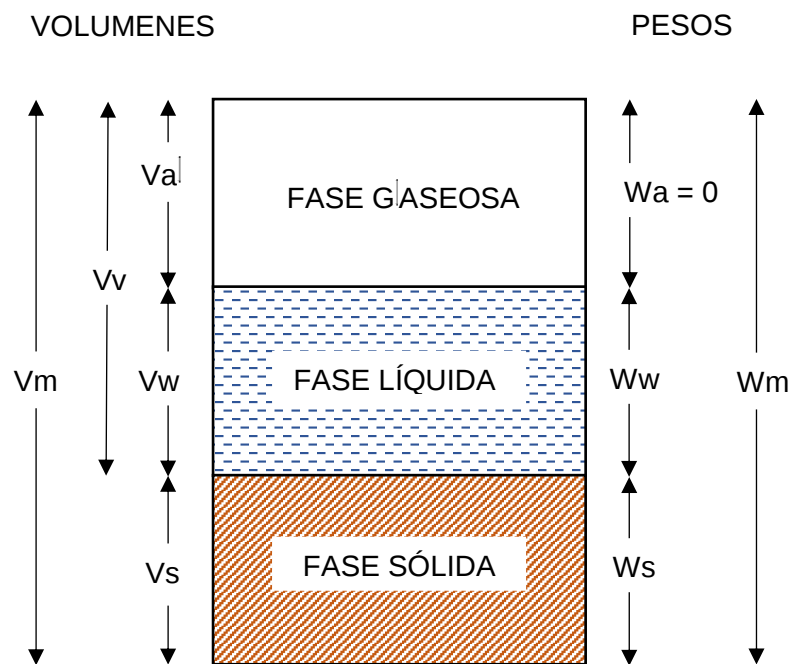
Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

2.2.1.2 FASES DEL SUELO

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: La sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo (incluyendo la capa sólida adsorbida); la líquida por el agua (libre, específicamente), aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido

carbónico. Etc.). Las fases líquida y gaseosa del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de los sólidos. Se dice que un suelo es totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, como caso particular, de sólo dos fases, la sólida y la líquida. Muchos suelos yacientes bajo el nivel freático son totalmente saturados. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

En la siguiente figura, representa el esquema de muestra de suelo con sus fases principales:



Figuras 1 : Fases del Suelo
Fuente: (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Tabla 1: Símbolos de Fases del Suelo.

V_m	Volumen total de la muestra de suelo (Volumen de la masa).
V_s	Volumen de la fase sólida de la muestra (Volumen de sólidos).
V_v	Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (Volumen de vacíos).
V_w	Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (Volumen de agua).
V_a	Volumen de la fase gaseosa de la muestra (Volumen de aire).
W_m	Peso total de la muestra del suelo (Peso de la masa).
W_s	Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (Peso de los sólidos).
W_w	Peso de la fase líquida de la muestra (Peso del agua).
W_a	Peso de la fase gaseosa de la muestra, convencionalmente considerado como nulo en Mecánica de Suelos.

Fuente: (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

2.2.1.3 RELACIONES FUNDAMENTALES

Las relaciones que se dan a continuación son importantísimas, para el manejo comprensible de las propiedades mecánicas de los suelos y un completo dominio de su significado y sentido físico; es imprescindible para poder expresar en forma asequible los datos y conclusiones de la Mecánica de Suelos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Relación de Vacíos

Se denomina relación de Vacíos, Oquedad o Índice de poros a la relación entre el volumen de los vacíos y de los sólidos de un suelo. La relación de vacíos se determina de acuerdo a la siguiente ecuación: $e = V_v / V_s$, en Donde, e = Relación de Vacíos; V_v = Volumen de Vacíos; V_s = Volumen de Sólidos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

La relación puede variar teóricamente de 0 ($V_v = 0$) a infinito (valor correspondiente a un espacio vacío). En la práctica no suelen hallarse valores menores de 0.25 (arenas muy compactas son finos) ni mayores

de 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Porosidad

Se llama porosidad de un suelo a la relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa. Se expresa: $n (\%) = (V_v/V_t) * 100$, en donde, n = Porosidad, V_v = Volumen de Vacíos, V_t = Volumen Total de la masa del suelo. Esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con sólo fase sólida a 100 (espacio vacío). Los valores reales suelen oscilar entre 20% y 95%. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Grado de Saturación

Se determina grado de saturación de un suelo a la relación entre su volumen de agua y el volumen de sus vacíos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Suele expresarse también como un porcentaje: $G_w (\%) = (V_w/V_v) * 100$, en donde, G_w = Grado de Saturación de Agua, V_w = Volumen de Agua, V_v = Volumen de vacíos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Contenido de Humedad

Se conoce como contenido de agua o humedad de un suelo, la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Suele expresarse como un porcentaje: $\omega (\%) = (W_w/W_s) * 100$, en donde, ω = Contenido de Humedad, W_w = Peso del Agua, W_s = Peso de Sólidos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Grado de Saturación de Aire

El grado de saturación de aire es una magnitud de escasa importancia práctica, respecto a las anteriores relaciones. Se define: $G_a (\%) = (V_a/V_v) * 100$, en donde, G_a = Grado de Saturación de Aire, V_a = Volumen de Aire, V_v = Volumen de vacíos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

2.2.1.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos es una técnica de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que no reúnen las condiciones necesarias para su utilización. Crea poco impacto ambiental, ya que ahorra transportar a un vertedero enormes volúmenes de material de excavación, y por otro, traer enormes volúmenes de material de préstamo. Con la estabilización 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. (De la Paz, 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, que originan las gravas 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. (De la Paz, 2010)

2.2.1.5 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

- ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

La estabilización mecánica es una técnica de mejora basada en la mezcla de diversos materiales con propiedades complementarias, de forma que se obtenga un nuevo material de mayor calidad y que cumpla las exigencias deseadas. Las propiedades que generalmente se pretenden mejorar con este tipo de estabilizaciones son la plasticidad y/o la granulometría; la plasticidad afecta a la susceptibilidad del material al agua y su capacidad drenante; la

granulometría incide en la resistencia, trabajabilidad y compacidad final de la capa de suelo. (De la Paz, 2010)

- ESTABILIZACIÓN VOLUMÉTRICA

Cuando se pretende mejorar un suelo a efecto de evitar la expansión volumétrica, es porque algunos suelos varían su volumen considerablemente ante los cambios de humedad, esto ocurre con mayor frecuencia en los suelos arcillosos. El modificar las propiedades de este suelo implica transformar la masa granulada, entrelazar suficientemente sus partículas, para lograr que resista la presión interna de expansión. Estudios anteriores han demostrado que los tratamientos químicos son los más recomendados para las arcillas superficiales, en tanto que los procedimientos térmicos (calentamientos que modifiquen la estructura molecular de las arcillas) son adecuados para las arcillas profundas expansivas. (De la Paz, 2010)

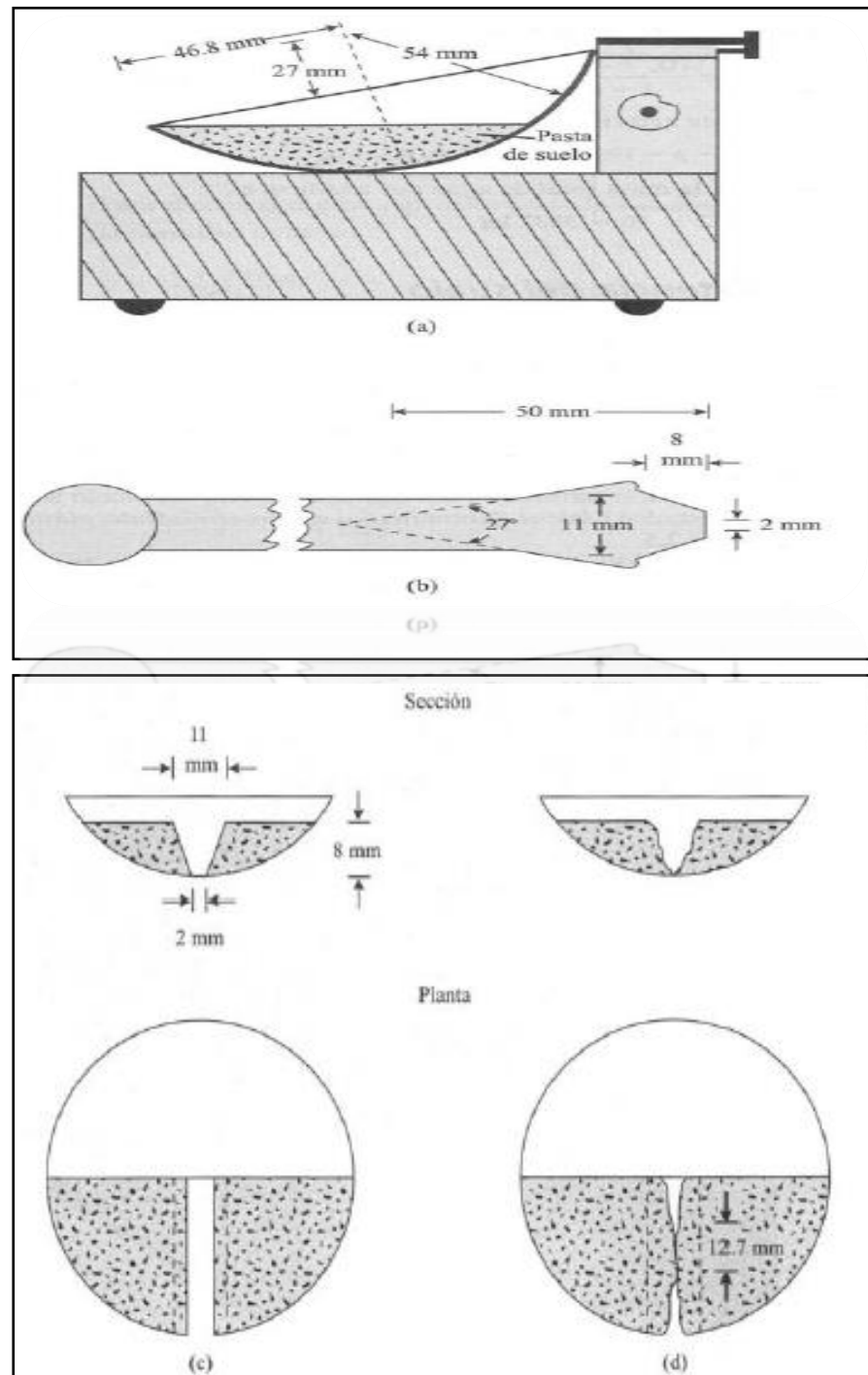
2.2.1.6 CONSISTENCIA DEL SUELO

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen también como límites de Atterberg. (Braja M. , 1999)

- LÍMITE LÍQUIDO (L.L)

Un diagrama esquemático (vista lateral) de un dispositivo para determinar el límite líquido se muestra en la figura 2a, que consiste en una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba del límite líquido se coloca una pasta en la copa. Se corta una ranura en el centro de la pasta de suelo, usando la herramienta de corte estándar (figura 2b). Luego, con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja caer desde una altura de 10 mm. El contenido de agua, en porcentaje requerido para cerrar

una distancia de 12.7 mm a lo largo del fondo de la ranura (véase las figuras 2c y 2d) a los 25 golpes se define como el límite líquido. El procedimiento para la prueba del límite líquido está dado en la Prueba D-4318 de la ASTM. (Braja M. , 1999)



Figuras 2: Prueba del Límite Líquido: (a) Dispositivo para la Prueba; (b) Ranurador; (c) Pasta de Suelo antes de la Prueba; (d) Pasta de Suelo después de la Prueba.

Fuente: (Braja M. , 1999).

- LÍMITE PLÁSTICO (L.P)

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio (figura 3) una masa de suelo de forma elipsoidal. (Braja M. , 1999)

El procedimiento para la prueba del límite plástico se da en la prueba D-4318 de la ASTM.



Figuras 3: Prueba del Límite Plástico.

Fuente: (Braja M. , 1999)

- ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P)

El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. (Braja M. , 1999)

$$IP = LL - LP$$

2.2.1.7 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada. Actualmente, dos sistemas de clasificación que usan la distribución por tamaño de grano y plasticidad de los suelos son usados comúnmente por los ingenieros de suelos. Éstos son el Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. El Sistema AASHTO lo usan principalmente los departamentos de caminos estatales y de condados, mientras que los ingenieros geotécnicos usualmente prefieren el Sistema Unificado. (Braja M. , 1999)

- SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO

El Sistema de Clasificación AASHTO actualmente en uso, se muestra en la tabla N° 01. De acuerdo con éste, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la criba No. 200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la criba No. 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 Y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. (Braja M. , 1999)

El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

- **Tamaño del grano:**

Grava: fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla No. 10 (2 mm) de Estados Unidos. (Braja M. , 1999)

Arena: fracción que pasa la malla No. 10 (2 mm) US. y es retenida en la malla No. 200 (0.075 mm) US. Limo y arcilla: fracción que pasa la malla No. 200 US. (Braja M. , 1999)

- **Plasticidad:**

El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor. Si cantos rodados y boleas (tamaños mayores que 75 mm) están presentes, éstos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que se está clasificando. Sin embargo, el porcentaje de tal material se registra. (Braja M. , 1999)

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla N° 01, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por un proceso de eliminación, el primer grupo desde la izquierda en el que los datos de prueba se ajusten, es la clasificación correcta. Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (GI) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación de grupo o de sub grupo. (Braja M. , 1999)

El índice de grupo está dado por la ecuación:

$$GI = (F - 35) [0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01 (F - 15) (IP - 10)$$

Donde: F = porcentaje que pasa la malla No. 200, LL = límite líquido, IP = índice de plasticidad. El primer término de la ecuación, es decir, $(F - 35) [0.2 + 0.005(LL - 40)]$, es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término, es decir $0.01 (F - 15) (IP - 10)$, es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad (Braja M. , 1999).

Tabla 2: Reglas para Determinar el Índice de Grupo.

1	Si la ecuación, da un valor negativo para GI , éste se toma igual a 0.
2	El índice de grupo calculado con la ecuación, se redondea al número entero más cercano (por ejemplo, $GI = 3.4$ se redondea a 3; $GI = 3.5$ se redondea a 4).
3	No hay un límite superior para el índice de grupo.
4	El índice de grupo de suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, Y A-3 siempre es 0.
5	Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, use el índice de grupo parcial para PI , o $GI = 0.01 (F - 15) (IP - 10)$.

Fuente: (Braja M. , 1999)

En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material para subrasantes es inversamente proporcional al índice de grupo. (Braja M. , 1999)

Tabla 3 : Clasificación de Materiales para Subrasantes de Carreteras.

CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% o MENOS DE LA MUESTRA QUE PASA LA MALLA N° 200)							MATERIALES LIMO - ARCILLA (MÁS DEL 35% DE LA MUESTRA QUE PASA LA MALLA N° 200)			
Clasificación de Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5'
											A-7-6'
Análisis por cribado (Porcentaje que pasa las mallas)											
N° 10	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 40	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características de la fracción que pasa la malla N° 40											
Límite Líquido	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidad	6 máx	-	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Fragmentos de Piedra Grava y Arena		Arena Fina	Grava y Arena Limosa o Arcillosa				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Tasa General de los Subrasante	De Excelente a Bueno							De Mediano a Pobre			

Fuente: (Braja M. , 1999)

Para A-7-5, $IP \leq LL - 30$; Para A-7-6, $IP > LL - 30$

- **SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)**

Hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros (Prueba D-2487 de la ASTM). El Sistema Unificado de Clasificación se presenta en las tablas N° 02, 03 y 04; clasifica los suelos en dos amplias categorías. (Braja M. , 1999)

- Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso. (Braja M. , 1999)
- Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos. (Braja M. , 1999)

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

W: bien graduado, P: mal graduado, L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50), H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50). (Braja M. , 1999)

Tabla 4: Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos Tipo Grava.

SÍMBOLO DE GRUPO	CRITERIOS
GW	Menos de 5% pasa la malla N° 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 4; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3.
GP	Menos de 5% pasa la malla N° 200; no cumple ambos criterios para GW.
GM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura N° 04) o el índice de plasticidad menor que 4.
GC	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura N° 04) o el índice de plasticidad mayor que 7.

GC-GM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura N° 04
GW-GM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GM.
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC.
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM.
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GC.

Fuente: (Braja M. , 1999).

Tabla 5: Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos Arenosos.

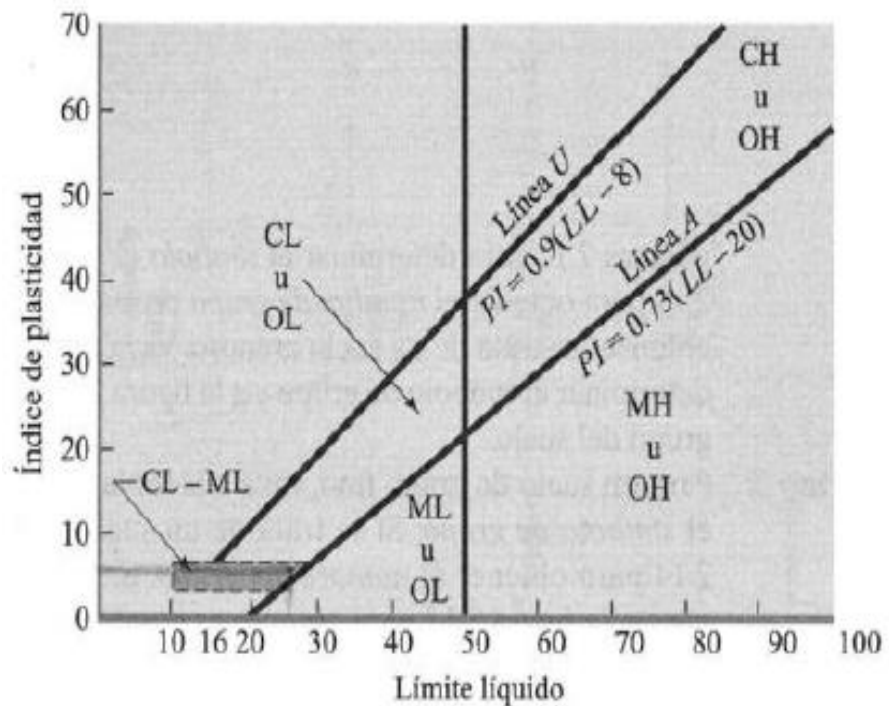
SÍMBOLO DE GRUPO	CRITERIOS
SW	Menos de 5% pasa la malla N° 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 6; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3.
SP	Menos de 5% pasa la malla N° 200; no cumple ambos criterios para SW.
SM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura N° 04) o el índice de plasticidad menor que 4.
SC	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura N° 04) o el índice de plasticidad mayor que 7.
SC-SM	Más de 12% pasa la malla N° 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura N° 04
SW-SM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SM.
SW-SC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SC.
SP-SM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SM.
SP-SC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SC.

Fuente: (Braja M. , 1999).

Tabla 6: Sistema Unificado de Clasificación; Símbolos de Grupo para Suelos Limosos y Arcillosos.

SÍMBOLO DE GRUPO	CRITERIOS
CL	Inorgánico; $LL < 50$; $IP > 7$; se grafica sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la figura N° 04).
ML	Inorgánico; $LL < 50$; $IP < 4$; se grafica debajo de la línea A (véase zona ML en la figura N° 04).
OL	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL < 50$ (véase zona OL en la figura N° 04).
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; IP se grafica sobre o arriba de la línea A (véase la zona CH en la figura N° 04).
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; IP se grafica debajo de la línea A (véase la zona MH en la figura N° 04).
OH	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la figura N° 04).
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la figura N° 04.
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Fuente: (Braja M. , 1999).



Figuras 4: Carta de Plasticidad.

Fuente: (Braja M. , 1999).

2.2.2.CEMENTO

Según la Norma Técnica Peruana NTP 334.009, el cemento Pórtland es un cemento hidráulico producido mediante la pulverización del Clinker compuesto esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente una o más de las formas sulfato de calcio como adición durante la molienda, es decir: Cemento Pórtland = Clinker Pórtland + Yeso. (Torre C., 2004)

El cemento Pórtland es un polvo muy fino de color verdoso. Al mezclarlo con agua forma una masa (pasta) muy plástica y moldeable que luego de fraguar y endurecer, adquiere gran resistencia y durabilidad. (Torre C., 2004)

2.2.2.1 ADITIVO ESTABILIZADOR

Sin ser limitativo, el aditivo estabilizador debe emplearse en el tratamiento de superficies de suelos con materiales orgánicos o de granulometrías muy finas (por ejemplo, en zonas de selva tropical, zonas de lluvias torrenciales, zonas pantanosas, etc.). El aditivo estabilizador, debe cumplir normas internacionales de certificación ISO. El aditivo debe ser capaz de mezclarse íntima y homogéneamente con el suelo y curarse de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. (CE.020)

La efectividad de los agentes estabilizadores debe cumplir con lo indicado en el siguiente cuadro:

Tabla 7: Efectividad de los Agentes Estabilizadores.

TIPO DE SUELO	Arcillas Finas	Arcillas Gruesas	Limos Finos	Limos Gruesos	Arenas Finas	Arenas Gruesas
Tamaño de Partícula (mm)	< 0,0006	0,0006 – 0,002	0,002 – 0,01	0,01 – 0,06	0,06 – 0,4	0,4 – 2,0
Estabilidad Volumétrica	Muy Pobre	Regular	Regular	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno
CAL	SI	SI	SI			
CEMENTO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
ASFALTO					SI	SI

Fuente: (CE.020).

2.2.2.2 ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

El suelo-cemento es un material elaborado a partir de la mezcla de suelo, cemento Portland y agua, la cual es dosificada, compactada y curada de modo de obtener un material endurecido que satisface ciertas propiedades. Con el agregado de cemento Portland se busca aumentar la resistencia y disminuir la deformabilidad, la permeabilidad y la sensibilidad al agua. Estas mejoras estructurales y de durabilidad crecen con el tiempo y con el incremento del porcentaje de cemento. (Serigos, 2009)

El suelo-cemento se utiliza principalmente en la construcción de carreteras; también es utilizado como revestimiento impermeabilizante, en la estabilización de taludes, estabilización de suelo de fundaciones, construcción de ladrillos, y otras aplicaciones menos frecuentes. El contenido de cemento en la mezcla dependerá de las propiedades buscadas en la estabilización del suelo y del tipo de suelo utilizado. Se define “suelo mejorado o modificado con cemento” cuando el porcentaje de cemento utilizado en la mezcla es bajo (menor al 2%). Estas dosificaciones se aplican generalmente cuando se busca mejorar la estabilidad volumétrica del suelo, no mejorar la resistencia. Para suelos finos plásticos, es recomendable usar cal en lugar de cemento ya que esta es más efectiva y económica para controlar su inestabilidad volumétrica. (Serigos, 2009)

Cuando se utilizan cantidades de cemento superiores, generalmente de 5 a 35%, esta metodología se define como “suelo estabilizado con cemento”. Al utilizar estas cantidades de cemento se consigue un material dotado de cierta rigidez y resistencia, prácticamente insensible al agua. (Serigos, 2009)

La adición de cemento, debe mejorar las propiedades mecánicas del suelo, sin llegar a condiciones de rigidez similares a morteros hidráulicos. El profesional responsable debe verificar que los finos pasantes al tamiz

Nº200, en el suelo, se encuentre entre el 5% y 35% antes de ser mezclados con cemento. (CE.020)

Se pueden utilizar todos los tipos de cementos, pero en general se recomienda los de fraguado y endurecimiento normales. En casos de querer contrarrestar los efectos de la materia orgánica, se empleará cementos de alta resistencia. El suelo se deberá controlar con ensayos de granulometría, verificando que el límite líquido sea menor de 50% y el índice de plasticidad menor de 25%. (CE.020)

El material llamado suelo-cemento se obtiene por la mezcla íntima de un suelo suficientemente disgregado con cemento, agua y otras eventuales adiciones, seguida de una compactación y un curado adecuados. De esta forma, el material suelto se convierte en otro endurecido, mucho más resistente. A diferencia del concreto, sin embargo, los granos de los suelos no están envueltos en pasta de cemento endurecido, sino que están puntualmente unidos entre sí. Por ello, el suelo-cemento tiene una resistencia inferior y un módulo de elasticidad más bajo que el concreto. El contenido óptimo de agua se determina por el ensayo Proctor como en la compactación de suelos. (MTC)

Las propiedades del suelo-cemento dependen de: Tipo y cantidad de suelo, cemento y agua; Ejecución; y edad de mezcla compactada y tipo de curado. Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los granulares tipos A-1, A-2 y A-3, con finos de plasticidad baja o media ($LL < 40$, $IP < 18$). La resistencia del suelo-cemento aumenta con el contenido de cemento y la edad de la mezcla. Al añadir cemento a un suelo y antes de iniciarse el fraguado, su IP disminuye, su LL varía ligeramente y su densidad máxima y humedad-óptima aumenta o disminuyen ligeramente, según el tipo de suelo. (MTC)

La dosificación de cemento puede fijarse aproximadamente en función del tipo de suelo, según lo siguiente:

Tabla 8: Dosificación de Cemento.

Clasificación de Suelos AASHTO	Rango Usual de Cemento requerido, porcentaje del peso de los suelos
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: (MTC).

2.2.2.3 MATERIALES PARA LA ESTABILIZACIÓN

- Suelo

Todos los suelos pueden estabilizarse con cemento Portland con excepción de los suelos muy plásticos, de alto contenido de materia orgánica o con un alto contenido de sales nocivas para el cemento. (Serigos, 2009)

Existen distintas normas que limitan ciertas características del suelo para su uso en suelo-cemento, estas en general coinciden en limitar su granulometría y plasticidad. La finalidad de los límites indicados por las diferentes normas es la de obtener mezclas económicas y durables. Al utilizar suelos granulares, el pulverizado y mezclado es más efectivo, lo que implica un porcentaje de cemento menor y por lo tanto una mezcla más económica. Se considera que los suelos con entre un 5% y un 35% de partículas que pasan el tamiz #200 (75mm) producen las mezclas de suelo-cemento más económicas. Aun así, es posible obtener mezclas económicas con suelos con un alto contenido de finos y baja plasticidad. (Serigos, 2009)

Los suelos finos generalmente requieren mayores porcentajes de cemento para satisfacer las exigencias buscadas. Suelos muy plásticos

(con índice de plasticidad mayor a 8) tienen tendencia a producir terrones que no son desmenuzados durante el mezclado y que luego, en servicio, se “lavan” debilitando la estructura del material. En arenas o gravas uniformemente graduadas, la utilización de suelos con contenido de finos alto (material que pasa el tamiz #200) y de baja plasticidad pueden llegar a ser beneficiosos, llenando vacíos de la estructura granular y ayudando a reducir el porcentaje de cemento en la mezcla. (Serigos, 2009)

- Cemento Portland

En principio cualquier tipo de cemento Portland se puede utilizar. Generalmente se utiliza CPN (Cemento Portland Normal). En ciertos casos se busca disminuir el efecto dañino de las reacciones entre los sulfatos y el cemento usando MRS (moderada resistencia a sulfatos). Cuando la mezcla se produce y se coloca en climas fríos es conveniente el uso de cementos del tipo ARI (alta resistencia inicial) o bien los que contienen como aditivo el cloruro de calcio. Los cementos ARI, al tener mayor finura, tienen mayor reactividad lo que permite obtener mayor resistencia para algunos suelos. (Serigos, 2009)

- Agua

El agua se incorpora a la mezcla a fin de alcanzar la humedad y el peso unitario seco especificados en la compactación y de hidratar el cemento. El agua correspondiente a la humedad óptima normalmente es bastante superior a la necesaria para la completa hidratación del cemento. Se especifica agua potable o relativamente limpia, sin cantidades nocivas de ácidos, álcalis o materia orgánica. También se ha utilizado agua de mar en forma satisfactoria; la presencia de cloruros incrementa la resistencia a edad temprana. (Serigos, 2009)

- Aditivos y adiciones

El aditivo más comúnmente utilizado es el retardador de fraguado, este se utiliza cuando el suelo-cemento es elaborado en planta y las condiciones climáticas son desfavorables o las distancias a transportar son considerables. (Serigos, 2009)

Las adiciones más utilizadas son puzolanas y cenizas volantes, estas incrementan la resistencia a largo plazo y optimizan la dotación de cemento. La desventaja de utilizar estas adiciones es la menor resistencia inicial, lo que resulta en una mayor fisuración.

(Serigos, 2009)

2.2.2.4 PROPIEDADES DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS CON CEMENTO

- Naturaleza de los suelos estabilizados con cemento

Los suelos estabilizados con cemento pueden clasificarse, de acuerdo con las propiedades de la mezcla resultante, en los siguientes tipos:

Los suelos mejorados con cemento, en los que se añade a un suelo, una vez disgregado en su caso, una cantidad de cemento relativamente baja, a fin de mejorar algunas de sus características (por ejemplo, su susceptibilidad a los cambios de humedad), y que después del tratamiento siguen constituyendo un material suelto. (Velarde del Castillo, 2015)

Los suelos estabilizados con cemento, en los que el producto final, después del fraguado del cemento, es un material, con una cierta resistencia mecánica. La principal diferencia entre los suelos estabilizados con cemento para explanadas y los utilizados en capas de firme radica en el contenido más elevado de cemento de los segundos, lo que se traduce en una superior resistencia mecánica y en una mayor homogeneidad. (Velarde del Castillo, 2015)

- Propiedades en estado fresco

Plazo de trabajabilidad: Ya se ha mencionado que el plazo de trabajabilidad es un parámetro muy importante, tanto en lo que se refiere a la puesta en obra de este tipo de materiales como en su comportamiento a largo plazo. Para su determinación, el método más sencillo consiste en realizar ensayos de compactación diferida, confeccionando probetas después de haber dejado transcurrir un tiempo

cada vez mayor a partir de la mezcla de los componentes y determinando la densidad de las mismas. (Velarde del Castillo, 2015)

Estabilidad inmediata: Para poder soportar el paso inmediato de los vehículos sin que se produzcan deformaciones importantes que puedan perjudicar su comportamiento posterior, el suelo estabilizado con cemento, una vez compactado, debe tener un esqueleto mineral con una estabilidad suficiente. Para la estimación de la misma se utiliza el denominado índice de capacidad de soporte inmediata, el cual se determina sometiendo una probeta recién compactada a un ensayo de penetración con la prensa CBR, sin imbibición y sin ninguna sobrecarga anular. El valor CBR, obtenido en estas condiciones, es el índice de capacidad de soporte inmediata, y debe ser al menos igual o superior a 50 para poder permitir la apertura a la circulación. (Velarde del Castillo, 2015)

- Propiedades físicas y mecánicas

Densidad: Al igual que en los suelos, los materiales tratados con cemento tienen una curva densidad seca – humedad, antes de la hidratación del conglomerante, que se obtiene aplicando una energía de compactación normalizada a distintas muestras del mismo material de partida en las que se va variando su contenido de humedad. Dicha curva suele tener una forma aproximadamente parabólica, con una densidad máxima para un contenido de humedad que se denomina humedad óptima. (Velarde del Castillo, 2015)

Permeabilidad: Los suelos estabilizados con cemento tienen coeficientes de permeabilidad que suelen situarse entre $1,7 \cdot 10^{-7}$ y 10^{-9} m/s. Los valores más reducidos corresponden normalmente a suelos con un porcentaje importante de partículas arcillosas. En comparación con la del suelo de partida, la permeabilidad disminuye notablemente al mezclarlos con cemento en el caso de suelos granulares, mientras que por el contrario puede aumentar en algún caso si se trata de suelos arcillosos o limosos. En general, cuanto mayor es el contenido de cemento, menor es la permeabilidad, a igualdad del resto de factores. (Velarde del Castillo, 2015)

Resistencias mecánicas: Las resistencias mecánicas de los suelos estabilizados con cemento dependen fundamentalmente de los siguientes factores: El contenido de cemento, la densidad alcanzada en la compactación, la humedad de la mezcla, la naturaleza del suelo, la edad del material, las temperaturas a las que se ha visto sometido. (Velarde del Castillo, 2015)

- Durabilidad

Comportamiento frente a heladas y ciclos de humedad-sequedad: El fraguado y primer endurecimiento de los materiales tratados con cemento pueden verse retrasados e incluso detenidos cuando los mismos tienen lugar en periodo de heladas, debido, entre otras causas, a la acción expansiva del agua intersticial, que impide la evolución normal de estos procesos. En algunos casos, la formación de hielo puede dar lugar a una descompactación del material. No obstante, salvo en estas circunstancias, el proceso de fraguado se continúa desarrollando normalmente una vez que la temperatura alcanza valores normales. (Velarde del Castillo, 2015)

Comportamiento frente a ambientes agresivos: En los terrenos y aguas subterráneas con yeso u otros sulfatos (de sodio, magnesio o potasio) puede producirse un ataque de los mismos a las mezclas con cemento. Dicho ataque puede ser de varias formas, pero el más peligroso se produce al reaccionar los sulfatos con el aluminato tricálcico que se forma durante la hidratación del cemento, lo que da lugar a cristales de sulfoaluminato tricálcico hidratado, también conocido como ettringita. Esta reacción es muy expansiva y puede llevar a la desintegración de la capa tratada con cemento. La rapidez y la importancia de estos ataques aumentan a medida que se incrementan tanto la concentración de los sulfatos en las aguas subterráneas o en el propio suelo como la temperatura. (Velarde del Castillo, 2015)

2.2.2.5 GENERALIDADES DEL SUELO CEMENTO

- SUELO MODIFICADO CON CEMENTO

Como su nombre lo indica, el cemento aquí es utilizado para modificar las propiedades físicas y químicas de algunos suelos para mejorar su capacidad de respuesta. Generalmente este proceso involucra bajas cantidades de cemento, razón por la cual se convierte en una buena alternativa en situaciones donde se necesita aumentar levemente la capacidad de respuesta del suelo con bajos costos. Aunque sabemos que la cal es más efectiva para cortar la plasticidad de los suelos, cuando utilizamos cemento estamos reduciendo plasticidad y aumentando resistencia. (Flores Flores, 2015)

- GRAVA – CEMENTO

Este material podríamos ubicarlo en un punto intermedio entre los concretos y el suelo-cemento. Por lo tanto, requiere de un proceso de elaboración más cuidadoso. Se caracteriza por altos contenidos de cemento que pueden oscilar entre 130 y 180 Kg./m³, obteniéndose resistencias de hasta 70 Kg./cm². Es normal entonces que ante contenidos tan altos de cemento su elaboración suela hacerse en una planta de mezclas en condiciones controladas, pues tanto las resistencias requeridas como las inversiones en materiales son mayores. (Flores Flores, 2015)

- SUELO – CEMENTO

Para definirlo podemos decir que es una mezcla íntima de suelo pulverizado, cemento y agua que, en proporciones adecuadas, puede convertirse en un estupendo aliado al momento de defender la subrasante de las solicitudes del tráfico. Lo anterior trae como consecuencia un material resistente y durable con excelentes propiedades mecánicas, que es ampliamente utilizado como base para pavimentos en un gran número de proyectos viales. (Flores Flores, 2015)

Debido a la cantidad de definiciones que se pueden encontrar relacionadas con el suelo cemento es necesario trabajar con una definición que sea acorde a nuestra investigación, como la siguiente:

Suelo-cemento, es una mezcla destinada a mejorar las condiciones de estabilidad del suelo, en la cual mediante un análisis de laboratorio se establece el contenido, el tipo de cemento y la cantidad de agua necesaria para combinar con el suelo y cumplir con los requisitos mínimos de resistencia y durabilidad. (Flores Flores, 2015)

- APLICACIONES DEL SUELO CEMENTO

Teniendo en cuenta las propiedades de las capas estabilizadas con cemento, es normal en todo el mundo, verlo aplicado en diferentes tipos de vías, su uso permite una gran flexibilidad, principalmente se ha aprovechado suelo-cemento para la construcción de bases y subbases de carreteras, cimentaciones, muros, aeropuertos, áreas de almacenamiento, protecciones de presas y protecciones contra la erosión de corrientes de agua. Por su relativo bajo costo en la construcción de bases para pavimentos con tráfico industrial muy pesado, el suelo-cemento ha sido utilizado mundialmente para hacer terminales portuarias de minerales y contenedores, terminales de ferrocarriles, terminales de vehículos muy pesados, patios de almacenamiento industrial pesado y para soportar la carga de vehículos con ruedas de acero. (Flores Flores, 2015)

- VENTAJAS DEL USO DEL SUELO CEMENTO

La estabilización de los suelos aumenta enormemente la potencialidad de uso de los bancos de materiales. Esto se debe a que una buena parte de los materiales de los bancos, que en un proyecto convencional se desecharían como deficientes por no satisfacer los requerimientos de diseño, se pueden utilizar mediante un tratamiento adecuado con cemento. Con el tratamiento se mejorarán las características físicas para que puedan ser aprovechados. El tratamiento con cemento es uno de los que, con más amplio campo de acción, han dado resultados muy satisfactorios y mayores posibilidades de uso.

(Flores Flores, 2015)

CAPÍTULO III

- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA

La investigación será aplicada, pues se trata de un estudio sobre el tratamiento con cemento portland del suelo areno-arcilloso de la subrasante de la Carretera: “El Paujil” código LO-524, ubicada en el distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, departamento de Loreto y Región Loreto; a una altitud promedio de 124.00 m.s.n.m. Une la progresiva del Km. 35+500 lado Derecho de la carretera Iquitos – Nauta, con la Comunidad de El Paujil, alcanzando una longitud de 10 Km camino a nivel de Trocha Carrozable. Correspondiéndole un diseño experimental transversal.

3.2. TIPO DE ESTUDIO

Aplicada.

3.3. DISEÑO DE ESTUDIO

Experimental Transversal.

El grupo experimental estará conformado por los suelos areno-arcillosos, de una (01) calicata de hasta 1.50m de profundidad correspondientes al tramo 0+000 a km 6+000.

La representación gráfica es la siguiente:

$$G_1: O_1 \times O_2$$

Donde:

G1: Grupo Experimental

X: Estabilización del suelo areno-arcilloso con cemento portland

O1: Test antes del experimento

O2: Test después del experimento

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. POBLACIÓN

La población estará conformada por suelos areno-arcillosos de la carretera El Paujil 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.

3.4.2. MUESTRA

Para la prueba de hipótesis, la cantidad de muestra se determinará a criterio no probabilístico, considerándose objeto de estudio una (01) calicata de suelo areno-arcilloso de la carretera El Paujil con la cual elaboraremos ensayos adicionándolo porcentajes de cemento portland de 0%, 4%, 6% y 8%, según se indica en las siguientes tablas.

Tabla 9: Cantidad de Muestra por Calicata.

Ensayo	Cantidad (Kg)
Contenido de humedad	5.00 kg
Límites de consistencia	5.00 kg
Granulometría	5.00 kg
Ensayo Proctor	40.00 kg
Ensayo CBR	65.00 kg
Total, por calicata	120.00 kg

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10: Cantidad de Muestra a Ensayar.

Variable/ Código	M0	M4	M6	M8	Parcial
Especímenes Límite Líquido y Plástico	03	-	-	-	03
Especímenes densidad seca máxima	04	04	04	04	16
Especímenes CBR	03	03	03	03	12
Total, de ensayos					31

Fuente: Elaboración Propia

3.5. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se aplicará el método científico. Se usará el análisis cualitativo y cuantitativo.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 11: Fases de Recopilación de Datos.

LA RECOPIACIÓN DE DATOS	
Primera fase: Trabajo de campo	Se tomarán las muestras de las calicatas de la subrasante en zonas aún no alteradas (muestras inalteradas) y hasta a 1.50m de profundidad en un promedio de 120kg por calicata.
Segunda fase: Trabajo de laboratorio	Los ensayos a realizar son los conocidos como estándares y los denominados especiales.

Fuente: Elaboración Propia

3.6.2. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos acerca de la efectividad del cemento portland como estabilizador, se determinará mediante ensayos realizados sobre probetas estabilizadas y sobre probetas del suelo de la subrasante de la carretera El Paujil; teniendo como criterio de efectividad, la mejora en una propiedad de desempeño de los resultados obtenidos de las probetas estabilizadas 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 cemento portland en la estabilización de carreteras no pavimentadas.

3.6.3.LABORATORIOS Y PROCEDIMIENTOS

En el laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP, las muestras representativas de suelo areno-arcilloso, cemento y la mezcla adicionando cemento portland serán sometidas a los ensayos (estándares y especiales) siguientes:

Tabla 12: Ensayos (estándares y especiales) a realizar en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la UCP.

Características	Ensayo	Normas
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)
Mecánicas	Proctor Modificado	(MTC E 115-ASTMD1557)
	California Bearing Ratio	(MTC E 132–2000; ASTM D1883)

Fuente: Elaboración Propia

Los ensayos de laboratorio se realizarán 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 corresponda. Los resultados de estos ensayos se presentarán en el Anexo correspondiente del Informe Final del proyecto profesional.

3.7. MATERIALES Y EQUIPOS A UTILIZAR

3.7.1. MATERIALES

Tabla 13: Materiales a Utilizar para realizar el Proyecto.

Material	Suelo areno-arcilloso de la subrasante de la carretera El Paujil
	Cemento Portland
	Agua potable

Fuente: Elaboración Propia

3.7.2. EQUIPOS

Tabla 14: Equipos a Utilizar para realizar el Proyecto.

Equipos	Descripción
Tamices	Para análisis granulométrico mediante tamizado por lavado (ASTM D422).
Taras	Para secado de muestra en el horno, taras de todos los tamaños.
Balanza Electrónica Digital	Con precisión dentro del 0.1% para el pesado de muestras.
Horno o Estufa de Secado	Se utiliza para secar el material agregado a temperaturas de acuerdo a las normas técnicas establecidas. Fuente de calor capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
Copa Casagrande	Equipo respectivo para ensayo de límite líquido.
Placa de vidrio	Para realizar ensayo de límite Plástico.
Moldes	Para Ensayo de Proctor Modificado (ASTM D1557); y Ensayo de CBR (ASTM D1883).
Martillo	Para Compactación adecuada de cada ensayo a realizar, peso de 10 lb.
Diales	Para determinación de la expansión del suelo.
Penetración CBR	Para determinación del valor CBR.

Fuente: Elaboración Propia

3.8. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS A REALIZAR

Tabla 15: Procedimiento de Análisis Granulométrico por Tamizado

1	Análisis Granulométrico mediante tamizado por lavado: Norma ASTM D 422.	
Material	Muestra seca aproximadamente 200 gr.	
Equipos	• Tamices N° 10, 20, 40, 50, 100 y 200. • Balanza Electrónica Digital. • Taras.	
Procedimiento	Se seleccionó una parte de la muestra para tamizarlo por la malla N°40. La cantidad de muestra para el ensayo respectivo es aproximadamente 200 gr, para el caso un peso de muestra de 189.05 gramos. Luego se pasó a realizar el lavado de la muestra con la malla N° 200. Posterior al Lavado se procedió a ingresar la muestra al horno para su secado correspondiente y después tamizarlo. Para el tamizado se emplearon las mallas N° 10, 20, 40, 50, 100 y 200.	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16: Procedimiento de Límite Líquido

2	Límite Líquido: Norma ASTM D4318	
Material	Muestra seca que pasa Tamiz N°40.	
Equipos	• Copa Casagrande. • Espátula • Ranurador • Balanza Electrónica Digital. • Taras.	

Procedimiento	Conforme a lo establecido en norma ASTM D4318 se procedió a determinar el límite Líquido empleando la copa de Casagrande, que expresa la relación del contenido de agua en un suelo y el número de golpes en la copa de Casagrande.
----------------------	---

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17: Procedimiento de Límite Plástico

3	Límite Plástico: Norma ASTM D4318
Material	Muestra seca una porción.
Equipos	• Placa de Vidrio. • Taras. • Balanza Electrónica Digital.
Procedimiento	Se realizaron pequeños rollitos de 3.2 de diámetro aproximadamente con la mano sobre una placa de vidrio, luego se introdujo al horno.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18: Procedimiento de Proctor Modificado

4	Proctor Modificado: Norma ASTM D1557
Material	• Muestra seca. • Papel Filtro. • Cemento Portland.
Equipos	• Moldes de compactación de peso 4159 gr y volumen de 940 cm³. • Pisón o Martillo. • Balanza Electrónica Digital. • Regla Metálica.
Procedimiento	Se tamizó la muestra por la malla N°04 (4.76mm) para luego preparar 4 bandejas por cada Proctor a elaborar, cada bandeja con un peso de 2200 gramos respectivamente. Se determinó el contenido húmedo de la muestra, para calcular la cantidad de agua requerida.

	Una vez preparada las muestras y materiales a utilizar se moldearon las probetas para los distintos ensayos. Se dosificaron con distintos contenidos de cemento portland y el contenido de agua correspondiente en cada caso. Las probetas se dosificaron para los contenidos de cemento 0, 4, 6 y 8%, el porcentaje de cemento se definió mediante el manual de diseño de carreteras no pavimentas de bajo volumen de tránsito. El procedimiento consistió en la densificación del material mediante la aplicación de 25 golpes por capa uniformemente distribuido, en 5 capas, aplicadas por un martillo para Proctor en caída libre. Para cada probeta se tomó una muestra de material para realizar un control de humedad. Con la prueba del Proctor modificado se logró determinar el óptimo contenido de humedad para cada proporción de cemento adicionado, así como también la densidad seca del suelo compactado.
--	--

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19: Procedimiento de Ensayo de Relación de Soporte California

5	Relación de Soporte California (CBR): Norma ASTM D1883	
Material	• Muestra seca. • Papel Filtro. • Cemento Portland.	
Equipos	• Molde de Compactación (con collar y base). • Disco espaciador (Espesor = 6.14cm) • Martillo de compactación. • Dial (para medir la expansión). • Máquina de compresión equipada con pistón de penetración con Capacidad máxima de 5000g kg. • Balanza Electrónica Digital.	

Procedimiento	Se tamizó la muestra por la malla N°04 (4.76mm) para luego preparar 3 bandejas por cada ensayo a elaborar, cada bandeja con un peso de 5000 gramos respectivamente. Se prepara la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de compactación Proctor modificado. Se ensambla los moldes cilíndricos con sus placas de base, collares de extensión, discos espaciadores y papeles filtro. Se compacta la muestra en los 3 CBR en cada uno de ellos en 5 capas, el primero con 12 golpes, el segundo con 25 golpes y el tercero con 56 golpes por capa. Se determina la humedad de las muestras de cada molde. • Curado Las probetas realizadas en estado natural se introdujeron directamente al agua para su respectivo curado de 96 horas (4 días), del mismo modo se puso el dial para tomar lecturas de la expansión durante el tiempo de curado. Las probetas realizadas con cemento añadido, primero se envolvió con bolsas de plástico por 7 días a la intemperie para la trabajabilidad del cemento en el suelo y luego sumergirlos al agua por 96 horas con dial para su respectiva lectura de Expansión. Después de finalizado los curados, se procedió a realizar las lecturas de deformación y penetración.
-----------------------------	--

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

- RESULTADOS

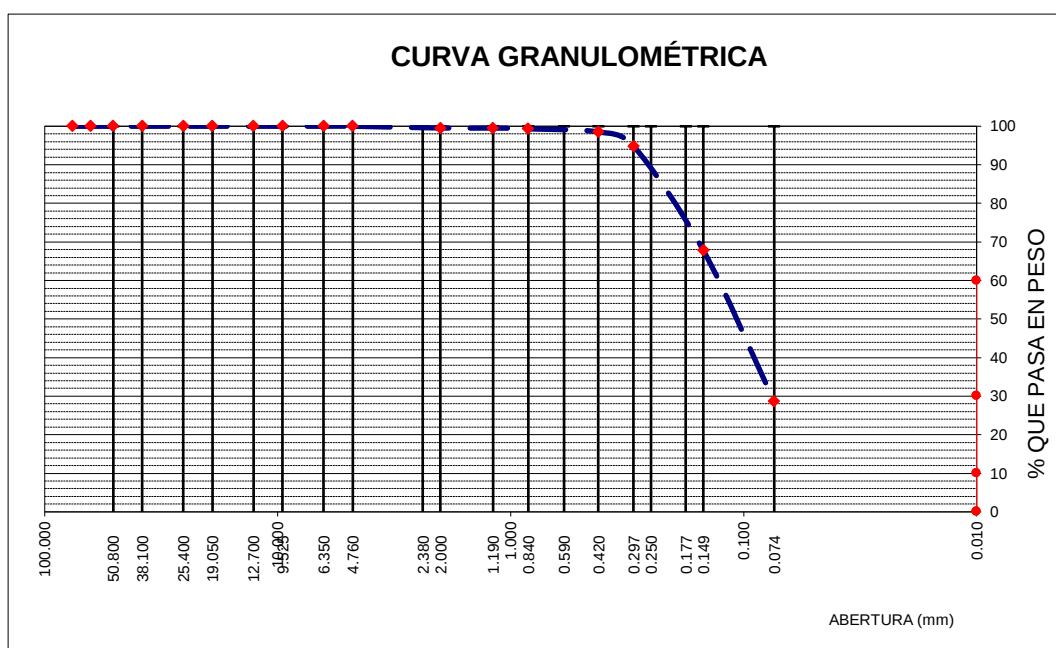
4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Peso de Muestra Seca : 189.05 Clasificación SUCS : **SC**
 Peso de Muestra Lavada : 134.88 Clasificación AASHTO : **A-2-4 (0)**

Tabla 20: Resultado de Análisis Granulométrico

Tamices ASTM	Abertura en mm	Peso Retenido	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	% Que Pasa
2 1/2"	63.500				
2"	50.600				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700				
3/8"	9.525				
1/4"	6.350				
Nº4	4.760				100.00
Nº10	2.000	0.87	0.46	0.46	99.54
Nº20	0.840	0.41	0.22	0.68	99.32
Nº40	0.420	1.52	0.80	1.48	98.52
Nº50	0.297	6.92	3.66	5.14	94.86
Nº100	0.149	51.11	27.04	32.18	67.82
Nº200	0.074	74.05	39.17	71.35	28.65
Pasa Nº200		54.17	28.65		

Fuente: Elaboración Propia



Figuras 5: Curvatura Granulométrica

Fuente: Elaboración Propia

4.2. ENSAYO LÍMITES ATTERBERG

Límite Líquido : **29.61**

Límite Plástico : **21.85**

Índice Plástico : **7.76**

Tabla 21: Resultado de Límite Líquido

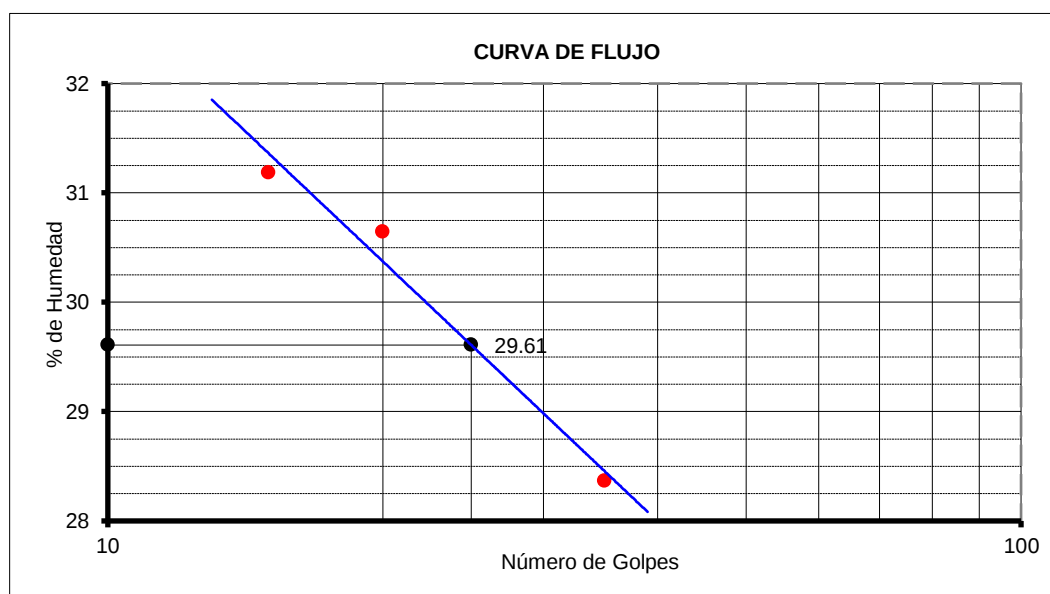
Límite Líquido: Norma ASTM D4318 – T 89			
Ensayo N°	1	2	3
N° de Golpes	15	20	35
R + Suelo Húmedo	54.45	54.82	60.04
R + Suelo Seco	51.21	51.48	57.71
Peso de la Tara	40.82	40.58	48.59
Peso de Agua	3.24	3.34	2.53
Peso de Suelo Seco	10.39	10.90	8.92
% de Humedad	31.18	30.64	28.36

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22: Resultado de Límite Plástico

Límite Plástico: Norma ASTM D4318 – T 90			
Ensayo N°	1	2	3
R + Suelo Húmedo	49.27	48.92	41.87
R + Suelo Seco	48.86	48.60	41.53
Peso de la Tara	46.99	47.13	39.95
Peso de Agua	0.41	0.32	0.34
Peso de Suelo Seco	1.87	1.47	1.58
% de Humedad	21.93	21.77	21.52

Fuente: Elaboración Propia



Figuras 6: Curvatura de Flujo

Fuente: Elaboración Propia

4.3. ENSAYO PROCTOR MODIFICADO

4.3.1. ESTADO NATURAL

M. D. S : **1.878 gr/cm³**

O. C. H : **12.44 %**

Tabla 23: Resultado de Compactación Proctor en Estado Natural

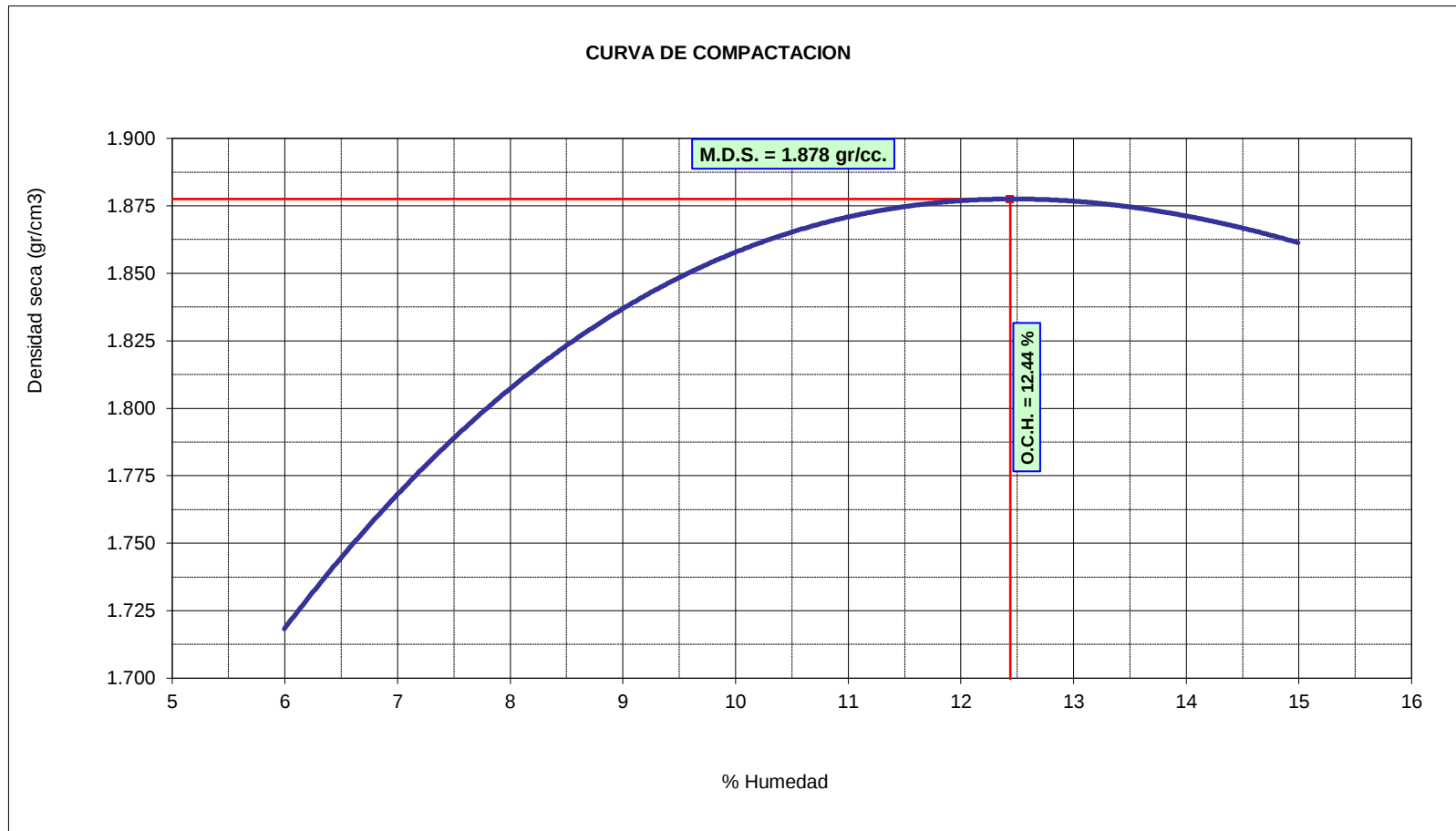
Compactación				
Prueba N°	1	2	3	4
Número de Capas	5	5	5	5
Número de Golpes	25	25	25	25
Peso Suelo + Molde (gr.)	5871	6047	6135	6171
Peso Molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del Molde (cm ³)	940	940	940	940
P. Suelo Compactado (gr.)	1712	1888	1976	2012
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	1.821	2.009	2.102	2.140

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24: Resultado de Humedad Proctor en Estado Natural

Humedad %								
N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + Suelo Húmedo (gr.)	126.00	102.85	125.70	111.41	111.24	95.33	117.20	123.67
Recipiente + Suelo Seco (gr.)	120.97	99.30	119.21	105.27	104.16	89.53	108.76	114.29
Peso de Recipiente (gr.)	38.11	39.33	48.33	37.95	45.61	40.82	52.36	51.84
Peso de Agua (gr.)	5.03	3.55	6.49	6.14	7.08	5.80	8.44	9.38
Peso de Suelo Seco (gr.)	82.86	59.97	70.88	67.32	58.55	48.71	56.40	62.45
Humedad (%)	6.07	5.92	9.16	9.12	12.09	11.91	14.96	15.02
Promedio Humedad (%)	6.00		9.14		12.00		14.99	
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.718		1.840		1.877		1.861	

Fuente: Elaboración Propia



Figuras 7: Curva de Compactación de Suelo en Estado Natural

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. SUELO CON 4% DE CEMENTO

M. D. S : **1.893 gr/cm³**

O. C. H : **11.97 %**

Tabla 25: Resultado de Compactación Proctor con 4% de Cemento

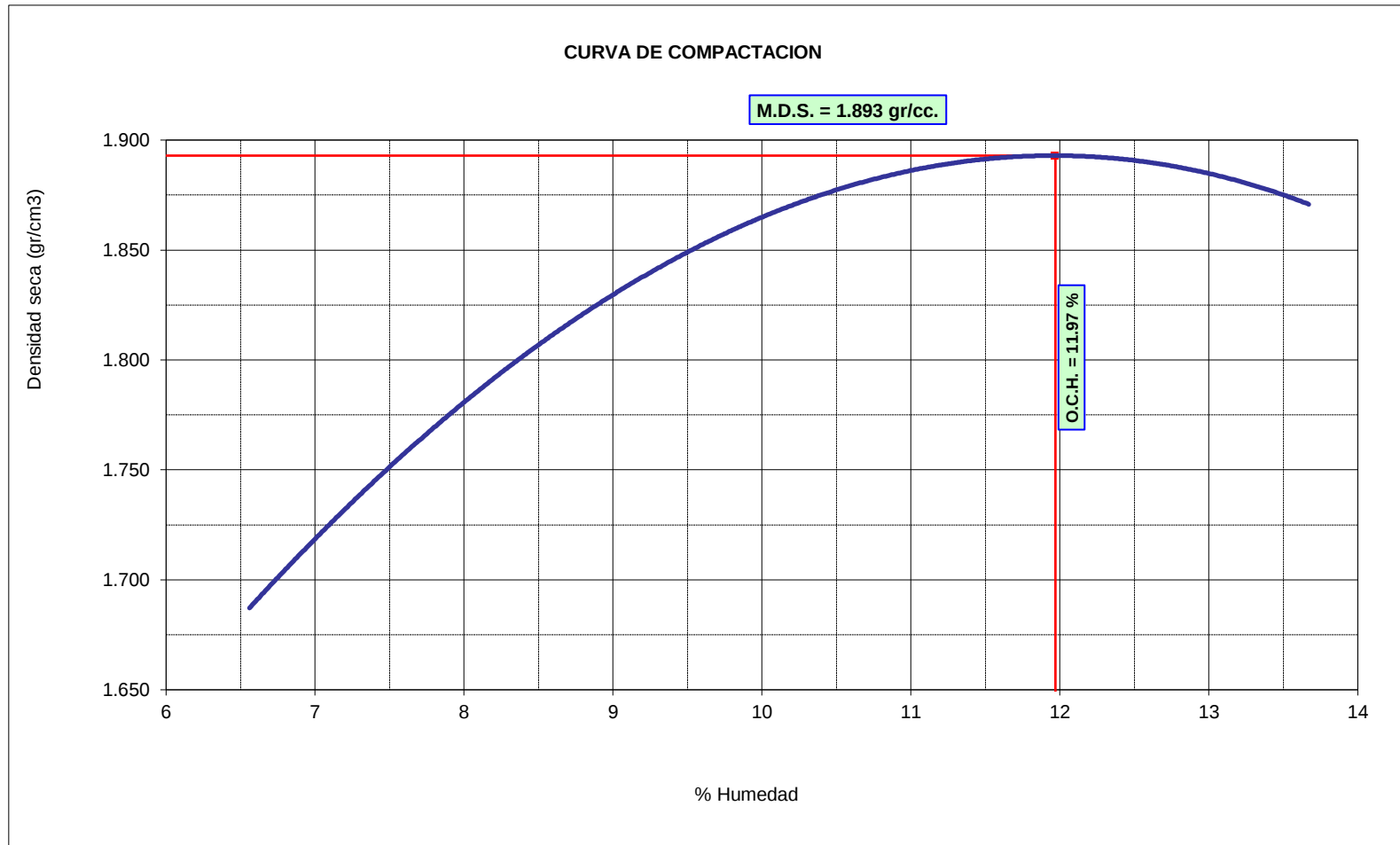
Compactación				
Prueba N°	1	2	3	4
Número de Capas	5	5	5	5
Número de Golpes	25	25	25	25
Peso Suelo + Molde (gr.)	5849	6008	6116	6158
Peso Molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del Molde (cm ³)	940	940	940	940
P. Suelo Compactado (gr.)	1690	1849	1957	1999
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	1.798	1.967	2.082	2.127

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26: Resultado de Humedad Proctor con 4% de Cemento

Humedad %								
N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + Suelo Húmedo (gr.)	136.85	113.18	121.51	119.81	97.40	99.43	123.00	113.77
Recipiente + Suelo Seco (gr.)	131.15	108.48	115.48	114.45	92.94	93.76	114.81	105.02
Peso de Recipiente (gr.)	45.65	35.65	48.05	49.43	51.86	39.81	54.61	41.32
Peso de Agua (gr.)	5.70	4.70	6.03	5.36	4.46	5.67	8.19	8.75
Peso de Suelo Seco (gr.)	85.50	72.83	67.43	65.02	41.08	53.95	60.20	63.70
Humedad (%)	6.67	6.45	8.94	8.24	10.86	10.51	13.60	13.74
Promedio Humedad (%)	6.56		8.59		10.68		13.67	
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.687		1.811		1.881		1.871	

Fuente: Elaboración Propia



Figuras 8: Curva de Compactación de Suelo con 4% de Cemento

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3. SUELO CON 6% DE CEMENTO

M. D. S : **1.890 gr/cm³**

O. C. H : **12.86 %**

Tabla 27: Resultado de Compactación Proctor con 6% de Cemento

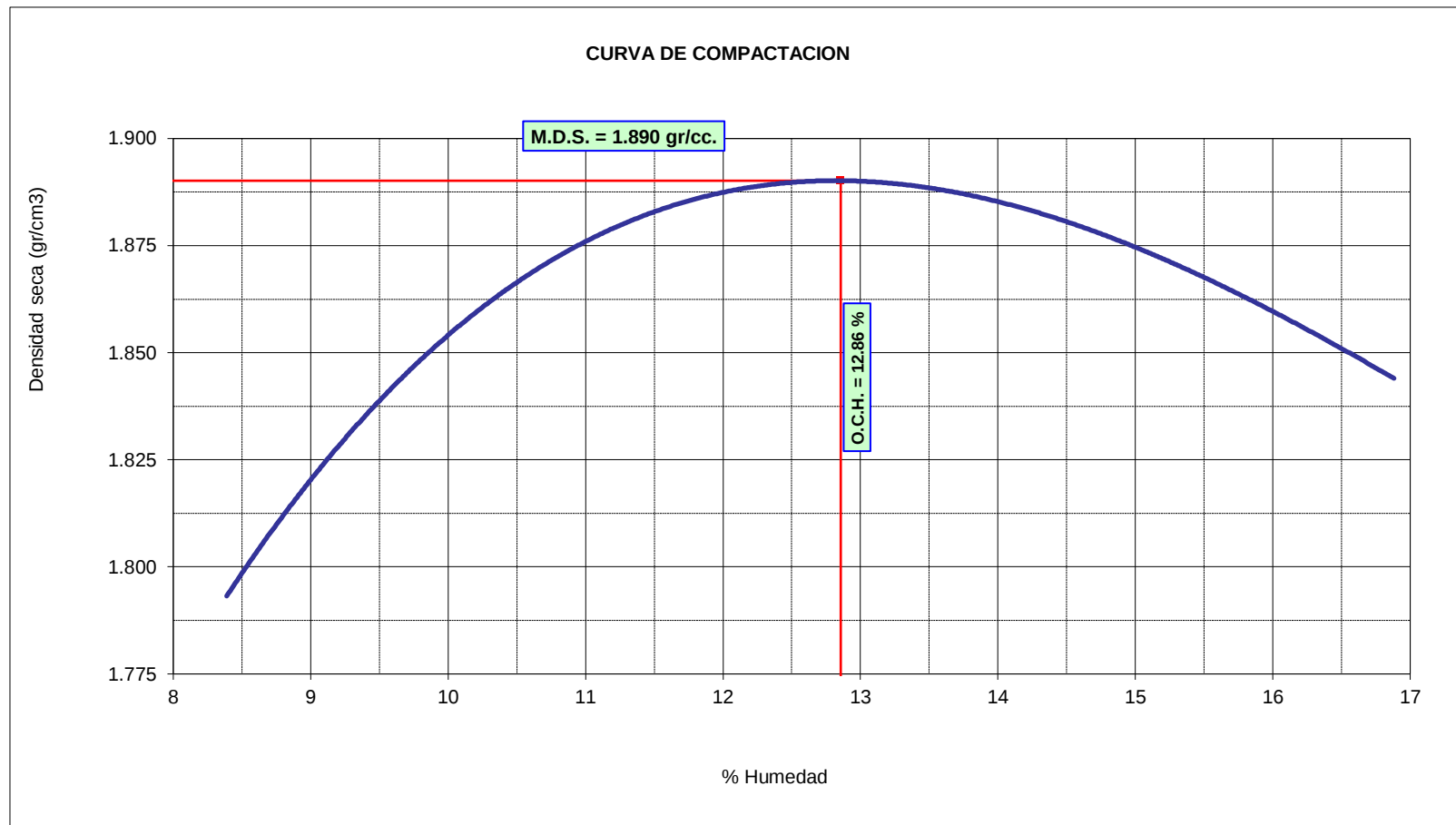
Compactación				
Prueba N°	1	2	3	4
Número de Capas	5	5	5	5
Número de Golpes	25	25	25	25
Peso Suelo + Molde (gr.)	5986	6126	6176	6185
Peso Molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del Molde (cm ³)	940	940	940	940
P. Suelo Compactado (gr.)	1827	1967	2017	2026
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	1.944	2.093	2.146	2.155

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28: Resultado de Humedad Proctor con 6% de Cemento

Humedad %								
N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + Suelo Húmedo (gr.)	104.94	86.26	110.49	110.05	116.05	105.62	127.32	105.06
Recipiente + Suelo Seco (gr.)	100.58	82.52	103.00	104.53	107.94	97.60	114.39	96.74
Peso de Recipiente (gr.)	47.93	38.50	37.90	54.68	48.60	39.05	38.57	46.95
Peso de Agua (gr.)	4.36	3.74	7.49	5.52	8.11	8.02	12.93	8.32
Peso de Suelo Seco (gr.)	52.65	44.02	65.10	49.85	59.34	58.55	75.82	49.79
Humedad (%)	8.28	8.50	11.51	11.07	13.67	13.70	17.05	16.71
Promedio Humedad (%)	8.39		11.29		13.68		16.88	
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.793		1.880		1.887		1.844	

Fuente: Elaboración Propia



Figuras 9: Curva de Compactación de Suelo con 6% de Cemento

Fuente: Elaboración Propia

4.3.4. SUELO CON 8% DE CEMENTO

M. D. S : **1.880 gr/cm³**

O. C. H : **12.59 %**

Tabla 29: Resultado de Compactación Proctor con 8% de Cemento

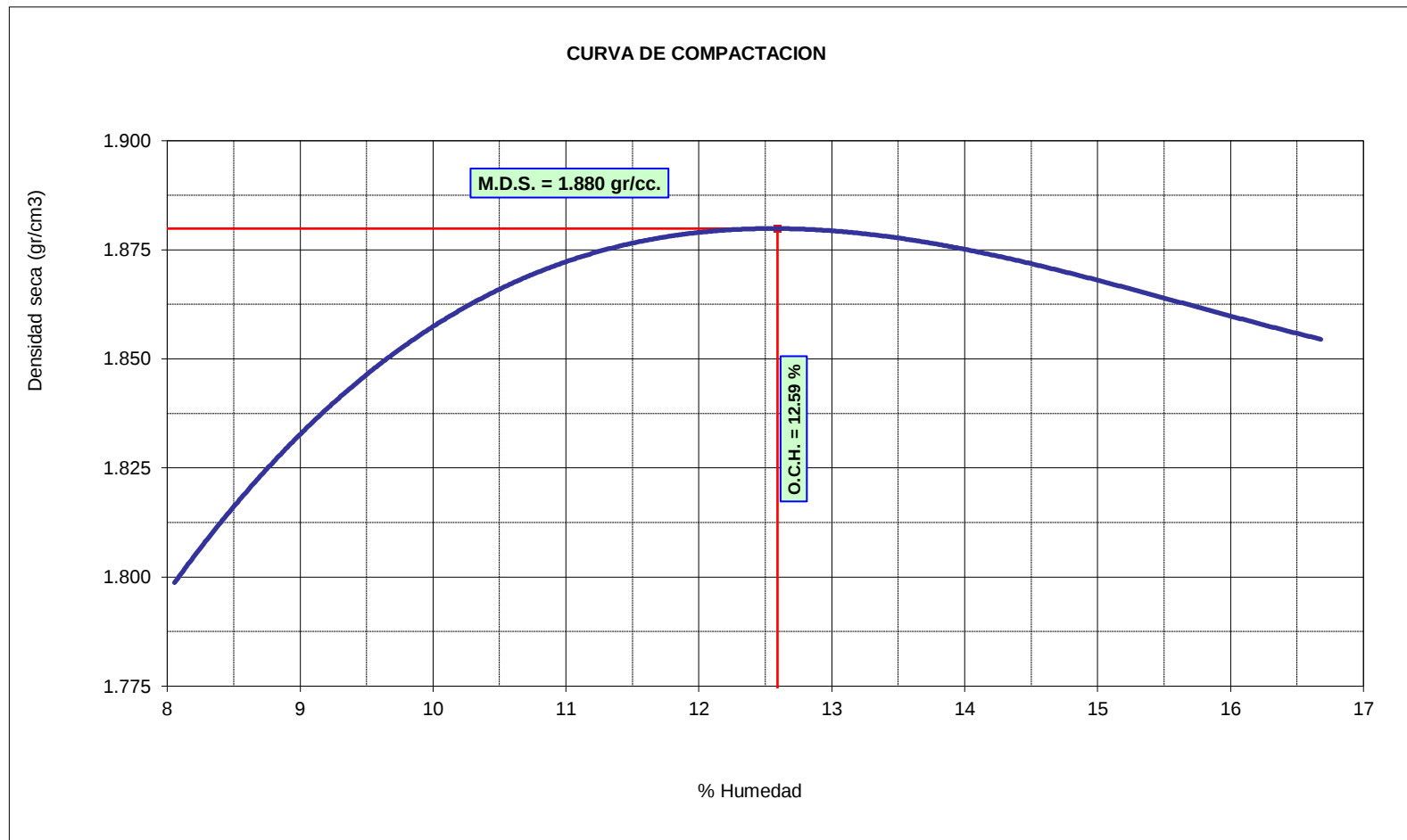
Compactación				
Prueba N°	1	2	3	4
Número de Capas	5	5	5	5
Número de Golpes	25	25	25	25
Peso Suelo + Molde (gr.)	5986	6100	6173	6193
Peso Molde (gr.)	4159	4159	4159	4159
Volumen del Molde (cm ³)	940	940	940	940
P. Suelo Compactado (gr.)	1827	1941	2014	2034
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	1.944	2.065	2.143	2.164

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30: Resultado de Humedad Proctor con 8% de Cemento

Humedad %								
N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + Suelo Húmedo (gr.)	82.62	104.35	95.79	113.30	110.03	112.65	116.68	97.03
Recipiente + Suelo Seco (gr.)	79.44	99.38	91.14	106.83	101.05	104.64	107.63	88.78
Peso de Recipiente (gr.)	39.41	38.52	46.99	46.03	39.83	48.24	53.83	38.89
Peso de Agua (gr.)	3.18	4.97	4.65	6.47	8.98	8.01	9.05	8.25
Peso de Suelo Seco (gr.)	40.03	60.86	44.15	60.80	61.22	56.40	53.80	49.89
Humedad (%)	7.94	8.17	10.53	10.64	14.67	14.20	16.82	16.54
Promedio Humedad (%)	8.06		10.59		14.44		16.68	
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.799		1.867		1.872		1.855	

Fuente: Elaboración Propia



Figuras 10: Curva de Compactación de Suelo con 8% de Cemento

Fuente: Elaboración Propia

4.4. ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

4.4.1. ESTADO NATURAL

Tabla 31: Densidad del Suelo Ensayo CBR en Estado Natural

Molde	N°	17		13		7	
Capas	N°	5		5		5	
Golpes por capa	N°	12		25		56	
Condición de Muestra		Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado
Peso de Suelo Húmedo + Molde	Gr.	12423	12744	12845	13052	13190	13339
Peso de Molde	Gr.	8561	8561	8634	8634	8791	8791
Volumen del Suelo	c.c.	2144	2144	2107	2107	2116	2116
Peso del Suelo Húmedo	Gr.	3862	4183	4211	4418	4399	4548
Densidad Húmeda	Gr/c.c.	1.802	1.951	1.999	2.097	2.079	2.150
HUMEDAD							
N° de Recipiente	N°	4	5	6	7	8	9
Peso del Suelo Húmedo + Recip.	Gr.	144.83	124.78	125.62	135.12	133.91	129.98
Peso del Suelo Seco + Recip.	Gr.	134.29	109.69	117.23	120.95	125.10	115.85
Peso del Recipiente	Gr.	46.88	40.58	47.82	45.92	53.23	39.41
Peso del Agua	Gr.	10.54	15.09	8.39	14.17	8.81	14.13
Peso del Suelo Seco	Gr.	87.41	69.11	69.41	75.03	71.87	76.44
Humedad	%	12.06	21.83	12.09	18.89	12.26	18.49
Densidad Seca	Gr/c.c.	1.608	1.602	1.783	1.764	1.852	1.814

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 32: Expansión del Suelo en Estado Natural

<u>EXPANSIÓN</u>								
Fecha	Hora	Días	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %
19 - 06 - 19	06:15	0	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
20 - 06 - 19	05:20	1	0.036	0.79	0.023	0.50	0.017	0.37
21 - 06 - 19	06:00	2	0.039	0.07	0.028	0.11	0.018	0.02
22 - 06 - 19	04:20	3	0.042	0.07	0.031	0.07	0.018	0.00
23 - 06 - 19	03:30	4	0.044	0.04	0.033	0.04	0.019	0.02

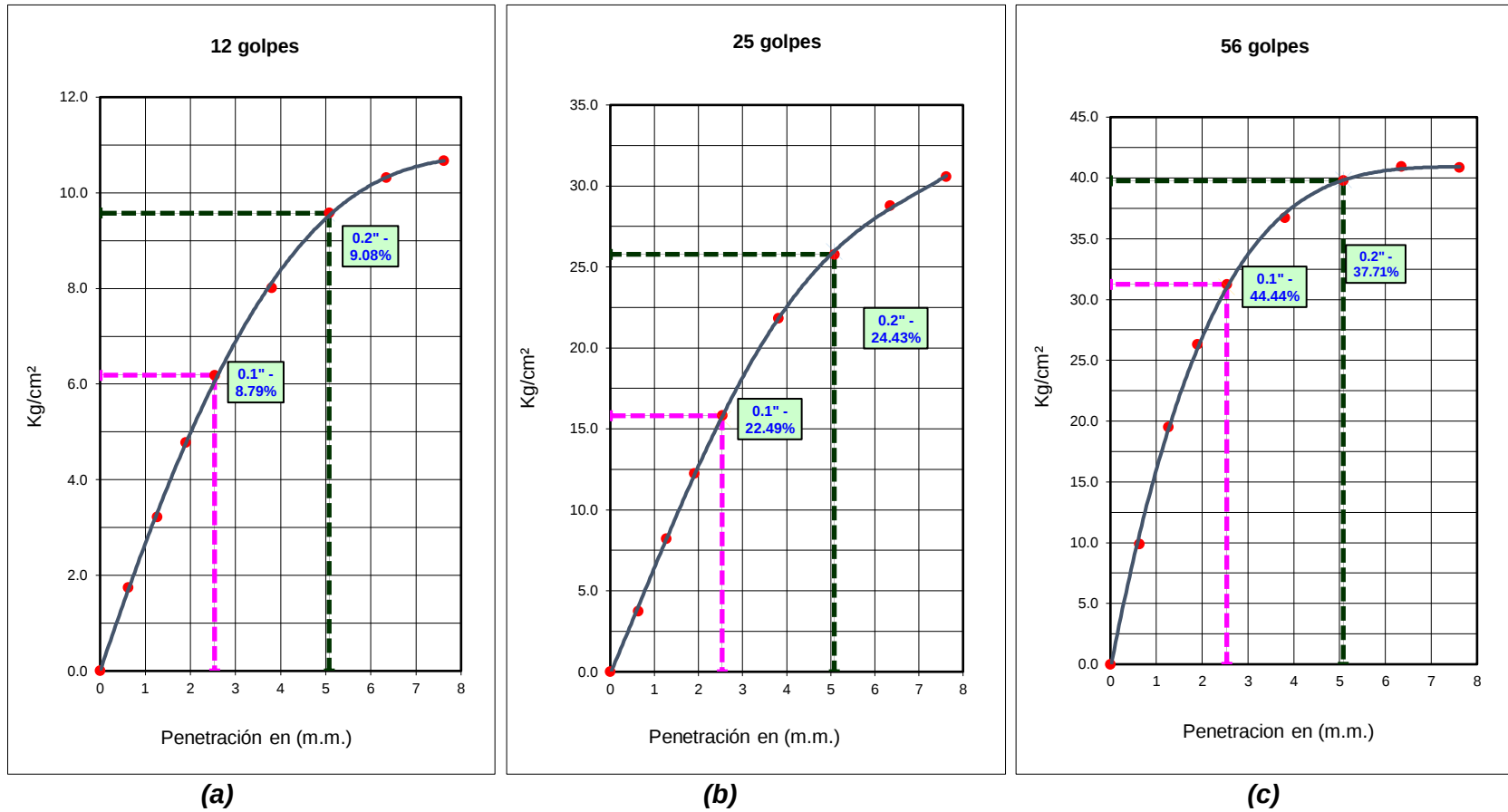
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33: Ensayo Penetración CBR en Estado Natural

<u>PENETRACIÓN</u>							
Penetración Pulgadas	Penetración mm	Carga		Carga		Carga	
		Kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2
0.025	0.63	34.3	1.75	73.2	3.73	194.3	9.89
0.050	1.27	63.2	3.22	161.3	8.21	382.7	19.49
0.075	1.90	93.8	4.78	240.2	12.23	516.7	26.31
0.100	2.54	121.4	6.18	310.5	15.81	613.6	31.24
0.150	3.81	157.4	8.01	428.6	21.82	721.1	36.72
0.200	5.08	188.1	9.58	506.1	25.77	781.0	39.77
0.250	6.35	202.7	10.32	565.1	28.77	804.0	40.94
0.300	7.62	209.5	10.67	600.6	30.58	802.4	40.86

Fuente: Elaboración Propia

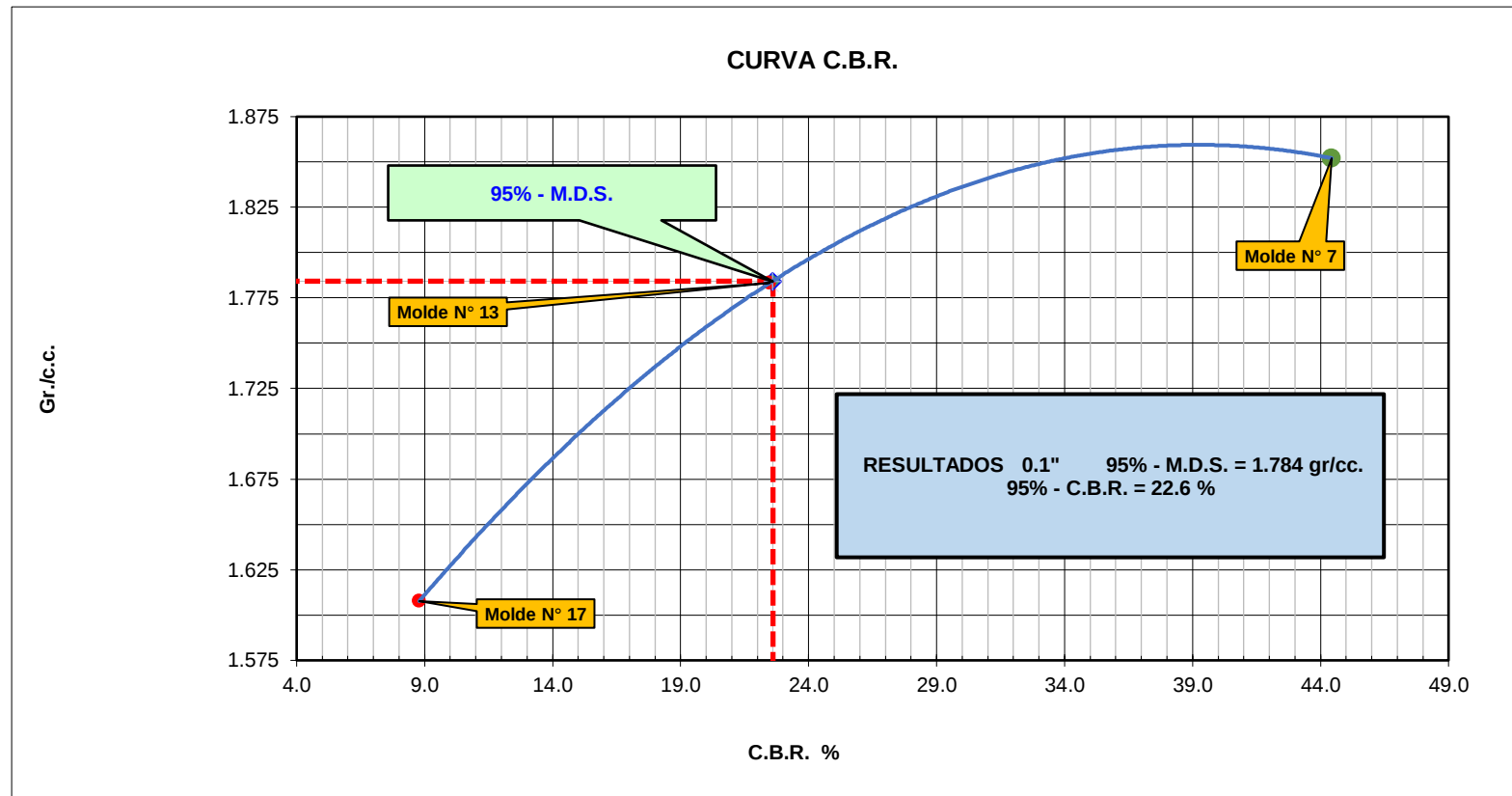
Fuente: Elaboración Propia



Figuras 11: Curva de Penetración CBR en Estado Natural: (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes

Fuente: Elaboración Propia

Condición de la Muestra	: 4 días de Saturación	95 % MDS	: 1.784 gr/c.c.
Sobrecarga	: 10.00 lb	CBR 100 % MDS	: 44.44 %
Hinchamiento Promedio	: 0.70 %	CBR 95 % MDS	: 22.60 %



Figuras 12: Curva CBR en Estado Natural

Fuente: Elaboración Propia

4.4.2. SUELO CON 4% DE CEMENTO

Tabla 34: Densidad del Suelo Ensayo CBR con 4% de Cemento

Molde	N°	4		12		14	
Capas	N°	5		5		5	
Golpes por capa	N°	12		25		56	
Condición de Muestra		Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado
Peso de Suelo Húmedo + Molde	Gr.	12458	12721	12796	12978	13021	13143
Peso de Molde	Gr.	8493	8493	8501	8501	8573	8573
Volumen del Suelo	c.c.	2132	2132	2146	2146	2132	2132
Peso del Suelo Húmedo	Gr.	3965	4228	4295	4477	4448	4570
Densidad Húmeda	Gr/c.c.	1.860	1.983	2.001	2.086	2.086	2.143
HUMEDAD							
N° de Recipiente	N°	4	5	6	7	8	9
Peso del Suelo Húmedo + Recip.	Gr.	129.94	119.48	119.03	141.61	132.98	135.64
Peso del Suelo Seco + Recip.	Gr.	121.47	107.73	110.87	129.16	125.01	123.40
Peso del Recipiente	Gr.	48.25	38.89	40.22	50.11	53.96	38.45
Peso del Agua	Gr.	8.47	11.75	8.16	12.45	7.97	12.24
Peso del Suelo Seco	Gr.	73.22	68.84	70.65	79.05	71.05	84.95
Humedad	%	11.57	17.07	11.55	15.75	11.22	14.41
Densidad Seca	Gr/c.c.	1.667	1.694	1.794	1.802	1.876	1.873

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 35: Expansión del Suelo con 4% de Cemento

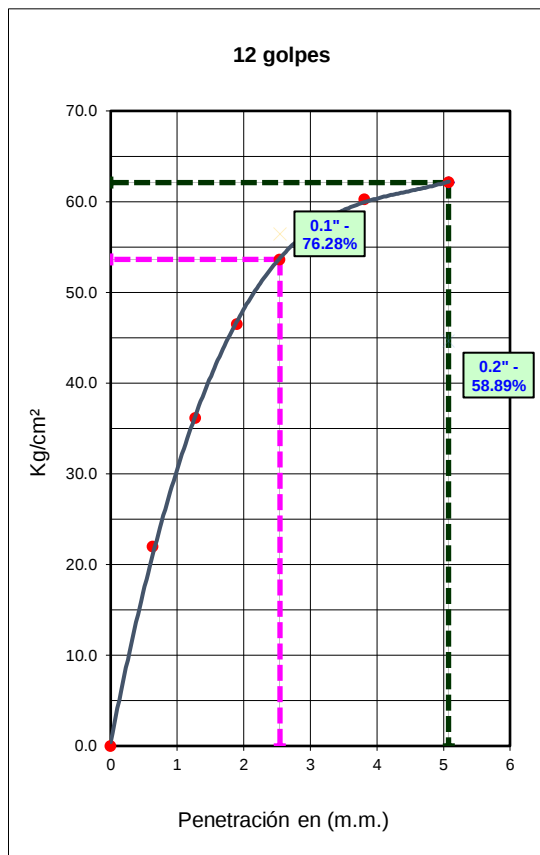
<u>EXPANSIÓN</u>								
Fecha	Hora	Días	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %
26 - 06 - 19	06:15	0	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
27 - 06 - 19	05:20	1	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
28 - 06 - 19	06:00	2	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
29 - 06 - 19	04:20	3	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
30 - 06 - 19	03:30	4	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

Fuente: Elaboración Propia

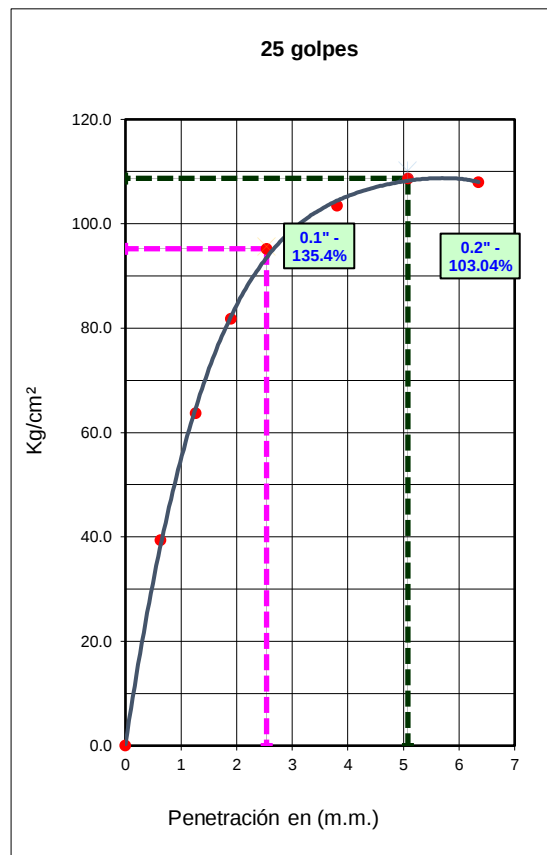
Tabla 36: Ensayo Penetración CBR con 4% de Cemento

<u>PENETRACIÓN</u>							
Penetración Pulgadas	Penetración mm	Carga		Carga		Carga	
		Kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2
0.025	0.63	431.3	21.96	772.4	39.33	1061.3	54.04
0.050	1.27	709.4	36.12	1250.3	63.66	1742.2	88.71
0.075	1.90	912.9	46.48	1606.4	81.79	2385.0	121.44
0.100	2.54	1053.3	53.63	1869.7	95.20	2948.4	150.12
0.150	3.81	1183.5	60.26	2030.7	103.40	3819.3	194.47
0.200	5.08	1219.7	62.10	2134.3	108.67	4130.7	210.32
0.250	6.35	0.0	0.00	2120.2	107.95	3861.3	196.60
0.300	7.62	0.0	0.00	1559.4	79.40	3714.2	189.11

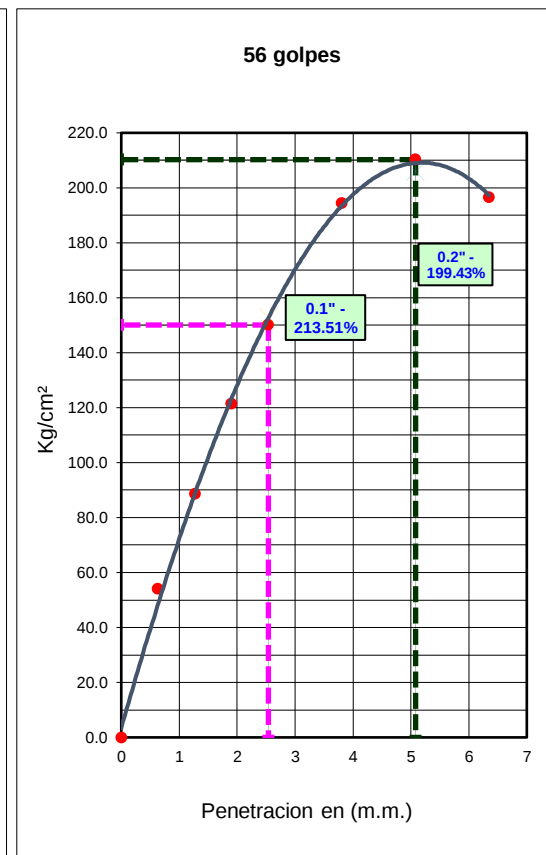
Fuente: Elaboración Propia



(a)



(b)

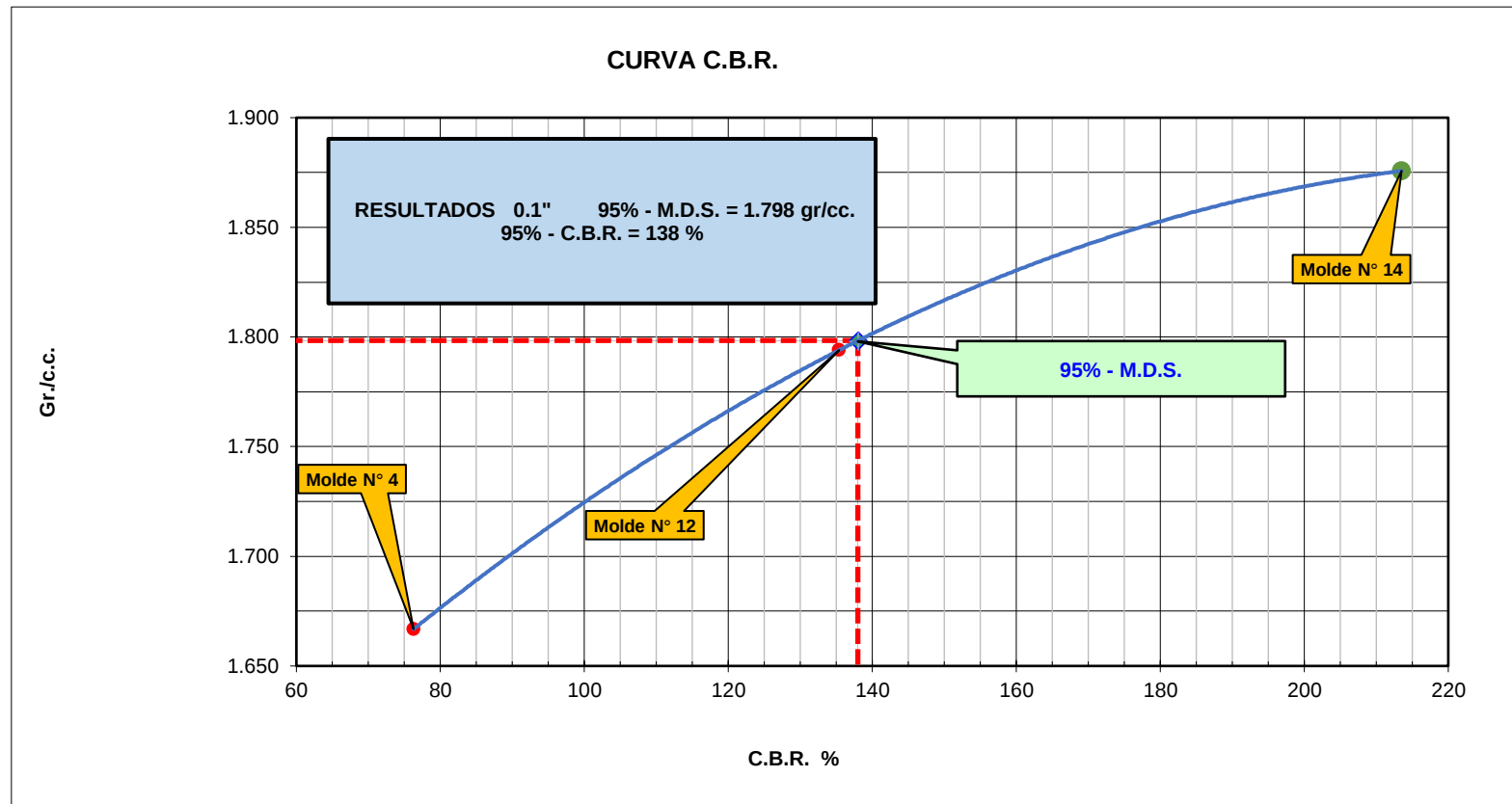


(c)

Figuras 13: Curva de Penetración CBR con 4% de Cemento: (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes

Fuente: Elaboración Propia

Condición de la Muestra	: 4 días de Saturación	95 % MDS	: 1.798 gr/c.c.
Sobrecarga	: 10.00 lb	CBR 100 % MDS	: 231.51 %
Hinchamiento Promedio	: 0.00 %	CBR 95 % MDS	: 138.00 %



Fuente: Elaboración Propia

4.4.3. SUELO CON 6% DE CEMENTO

Tabla 37: Densidad del Suelo Ensayo CBR con 6% de Cemento

Molde	N°	2		10		19	
Capas	N°	5		5		5	
Golpes por capa	N°	12		25		56	
Condición de Muestra		Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado
Peso de Suelo Húmedo + Molde	Gr.	12521	12772	12974	13151	13064	13183
Peso de Molde	Gr.	8499	8499	8722	8722	8641	8641
Volumen del Suelo	c.c.	2144	2144	2107	2107	2116	2116
Peso del Suelo Húmedo	Gr.	4022	4273	4252	4429	4423	4542
Densidad Húmeda	Gr/c.c.	1.876	1.993	2.018	2.102	2.090	2.147
HUMEDAD							
N° de Recipiente	N°	4	5	6	7	8	9
Peso del Suelo Húmedo + Recip.	Gr.	129.19	148.20	140.31	151.16	126.74	139.14
Peso del Suelo Seco + Recip.	Gr.	119.53	133.07	130.16	137.14	117.58	126.22
Peso del Recipiente	Gr.	37.96	53.22	47.12	51.87	38.20	37.36
Peso del Agua	Gr.	9.66	15.13	10.15	14.02	9.16	12.92
Peso del Suelo Seco	Gr.	81.57	79.85	83.04	85.27	79.38	88.86
Humedad	%	11.84	18.95	12.22	16.44	11.54	14.54
Densidad Seca	Gr/c.c.	1.678	1.676	1.798	1.805	1.874	1.874

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 38: Expansión del Suelo con 6% de Cemento

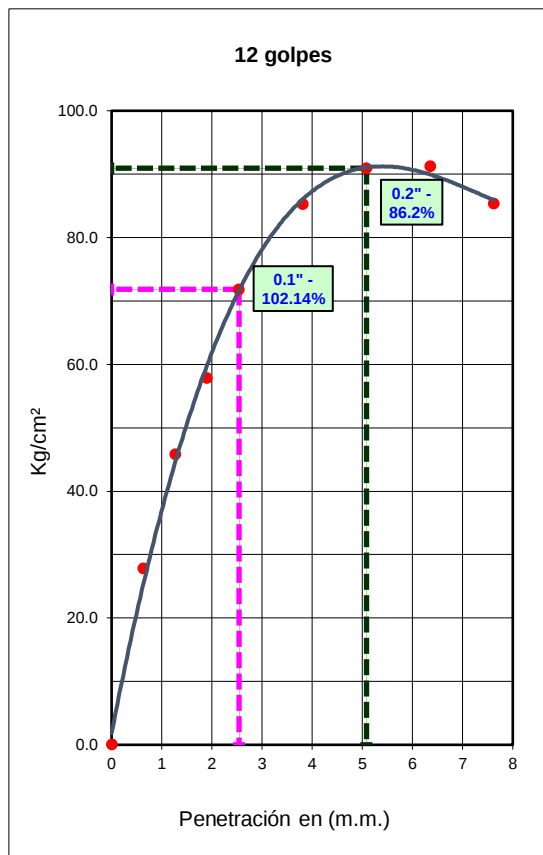
<u>EXPANSIÓN</u>								
Fecha	Hora	Días	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %
26 - 06 - 19	06:15	0	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
27 - 06 - 19	05:20	1	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
28 - 06 - 19	06:00	2	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
29 - 06 - 19	04:20	3	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
30 - 06 - 19	03:30	4	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

Fuente: Elaboración Propia

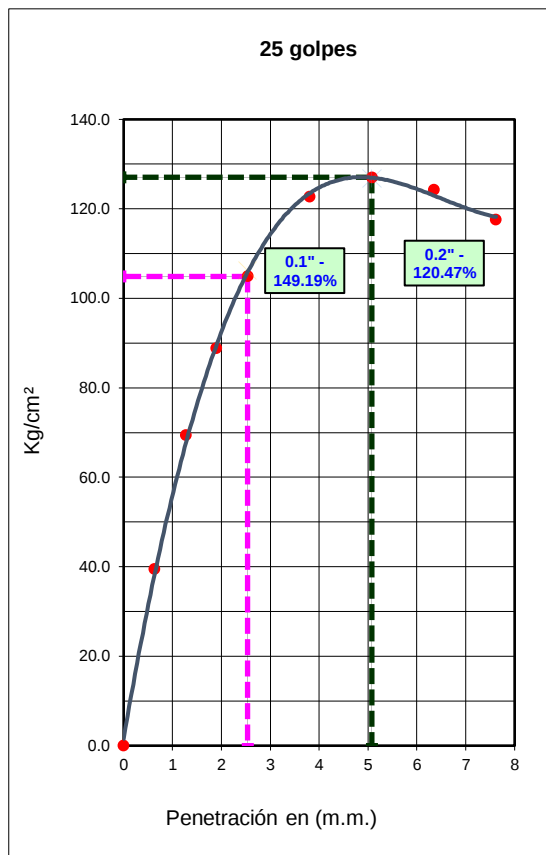
Tabla 39: Ensayo Penetración CBR con 6% de Cemento

<u>PENETRACIÓN</u>							
Penetración Pulgadas	Penetración mm	Carga		Carga		Carga	
		Kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2
0.025	0.63	546.3	27.82	776.3	39.53	954.3	48.59
0.050	1.27	900.2	45.84	1363.7	69.43	1851.2	94.26
0.075	1.90	1135.7	57.83	1744.5	88.82	2524.7	128.55
0.100	2.54	1410.5	71.82	2060.2	104.90	3097.2	157.70
0.150	3.81	1675.4	85.31	2409.3	122.67	3763.4	191.62
0.200	5.08	1785.4	90.91	2495.2	127.05	3950.5	201.15
0.250	6.35	1791.3	91.21	2440.4	124.26	3662.3	186.47
0.300	7.62	1675.5	85.31	2309.2	117.58	3205.2	163.20

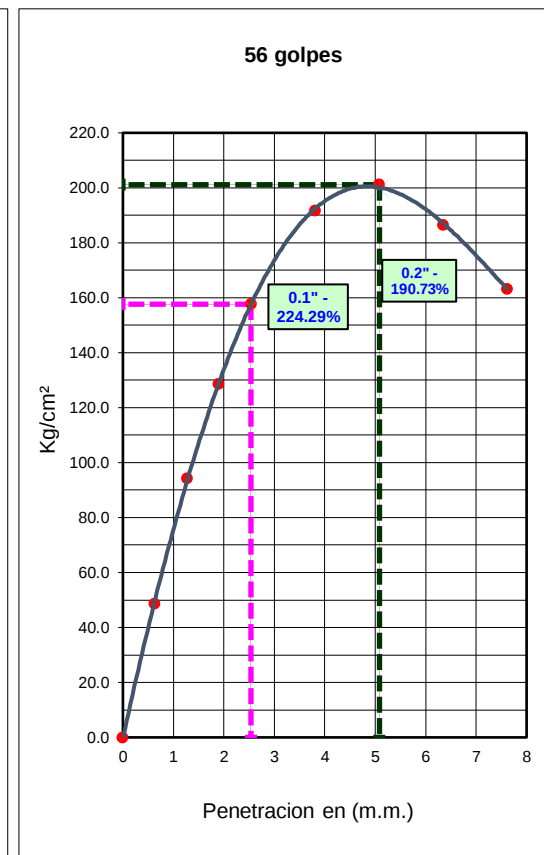
Fuente: Elaboración Propia



(a)



(b)

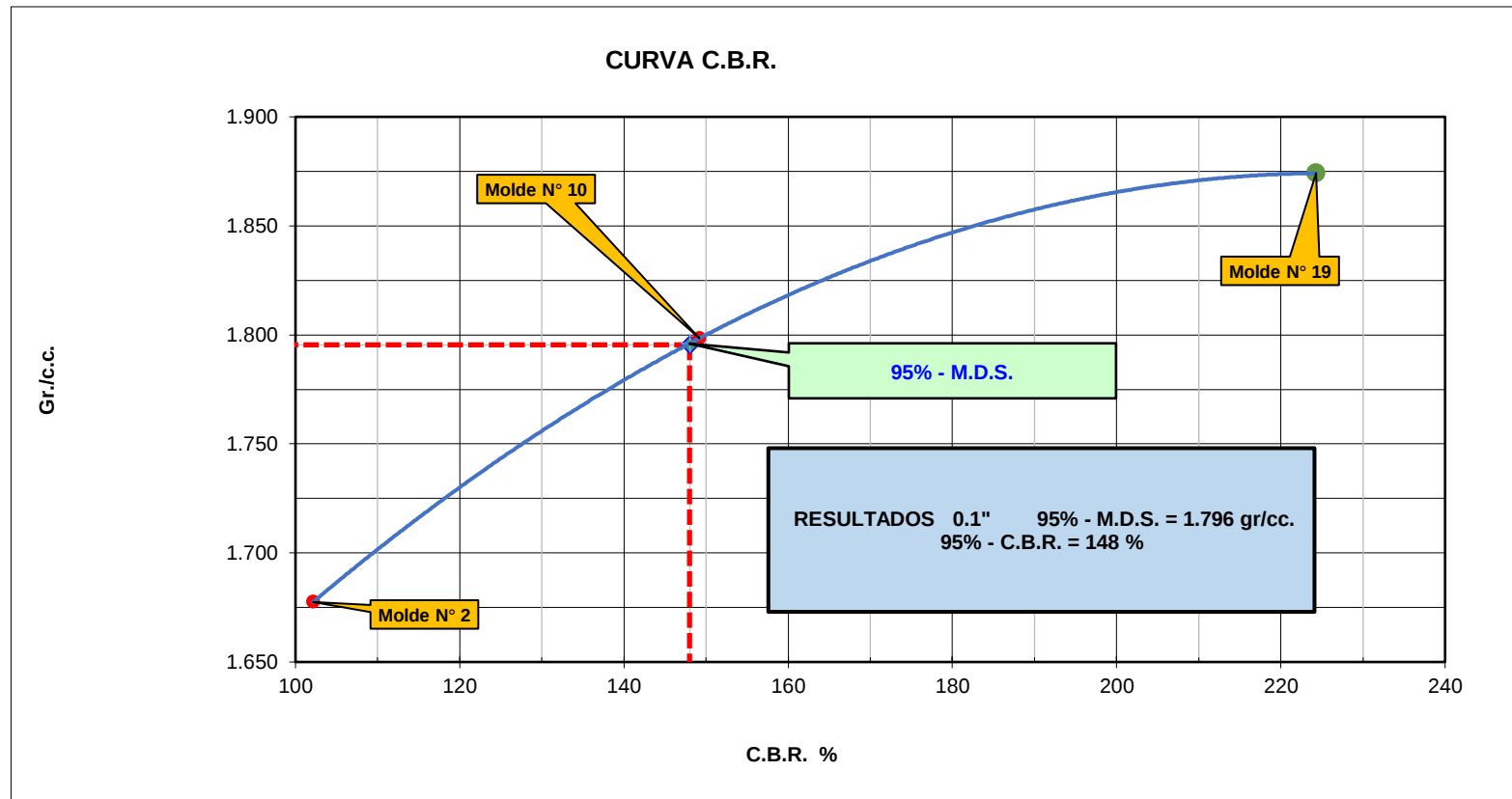


(c)

Figuras 15: Curva de Penetración CBR con 6% de Cemento: (a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes

Fuente: Elaboración Propia

Condición de la Muestra	: 4 días de Saturación	95 % MDS	: 1.796 gr/c.c.
Sobrecarga	: 10.00 lb	CBR 100 % MDS	: 224.29 %
Hinchamiento Promedio	: 0.00 %	CBR 95 % MDS	: 148.00 %



Figuras 16: Curva CBR con 6% de Cemento

Fuente: Elaboración Propia

4.4.4. SUELO CON 8% DE CEMENTO

Tabla 40: Densidad del Suelo Ensayo CBR con 8% de Cemento

Molde	N°	8		21		23	
Capas	N°	5		5		5	
Golpes por capa	N°	12		25		56	
Condición de Muestra		Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado
Peso de Suelo Húmedo + Molde	Gr.	12379	12765	12820	13055	13004	13146
Peso de Molde	Gr.	8627	8627	8638	8638	8652	8652
Volumen del Suelo	c.c.	2130	2130	2116	2116	2116	2116
Peso del Suelo Húmedo	Gr.	3752	4138	4182	4417	4352	4494
Densidad Húmeda	Gr/c.c.	1.762	1.943	1.977	2.088	2.057	2.124
HUMEDAD							
N° de Recipiente	N°	4	5	6	7	8	9
Peso del Suelo Húmedo + Recip.	Gr.	134.98	123.74	146.92	134.14	133.54	147.83
Peso del Suelo Seco + Recip.	Gr.	125.84	108.93	137.52	121.09	124.88	134.67
Peso del Recipiente	Gr.	41.48	39.56	54.54	39.39	50.13	39.09
Peso del Agua	Gr.	9.14	14.81	9.40	13.05	8.66	13.16
Peso del Suelo Seco	Gr.	84.36	69.37	82.98	81.70	74.75	95.58
Humedad	%	10.83	21.35	11.33	15.97	11.59	13.77
Densidad Seca	Gr/c.c.	1.589	1.601	1.775	1.800	1.843	1.867

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41: Expansión del Suelo con 8% de Cemento

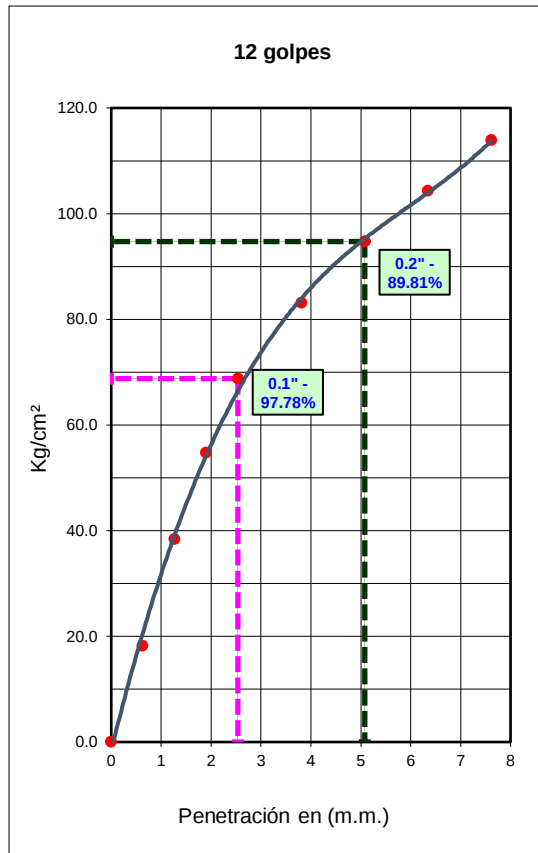
<u>EXPANSIÓN</u>								
Fecha	Hora	Días	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %	Dial (Pulg.)	Expansión %
26 - 06 - 19	06:15	0	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
27 - 06 - 19	05:20	1	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
28 - 06 - 19	06:00	2	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
29 - 06 - 19	04:20	3	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
30 - 06 - 19	03:30	4	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

Fuente: Elaboración Propia

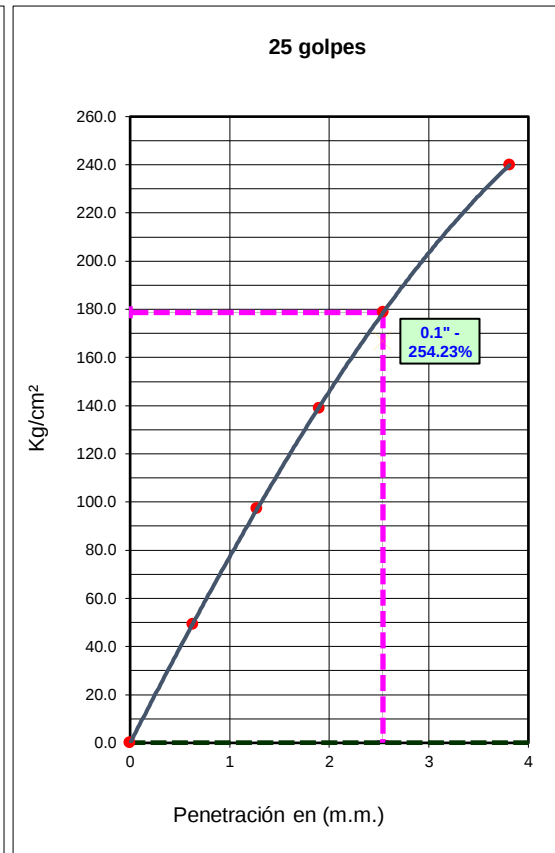
Tabla 42: Ensayo Penetración CBR con 8% de Cemento

<u>PENETRACIÓN</u>							
Penetración Pulgadas	Penetración mm	Carga		Carga		Carga	
		Kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2	kg	Kg/cm2
0.025	0.63	357.2	18.19	965.2	49.14	1377.2	70.12
0.050	1.27	752.4	38.31	1912.4	97.37	2459.4	125.22
0.075	1.90	1074.7	54.72	2728.3	138.92	3195.3	162.69
0.100	2.54	1350.2	68.75	3510.7	178.75	3814.5	194.22
0.150	3.81	1631.3	83.06	4710.2	239.83	4791.3	243.96
0.200	5.08	1860.2	94.71	0.0	0.00	0.0	0.00
0.250	6.35	2048.3	104.29	0.0	0.00	0.0	0.00
0.300	7.62	2235.4	113.82	0.0	0.00	0.0	0.00

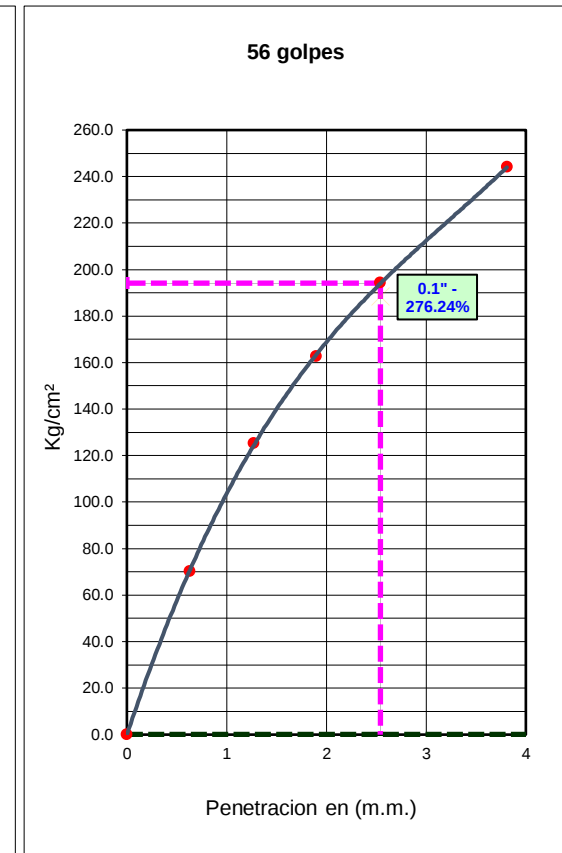
Fuente: Elaboración Propia



(a)



(b)



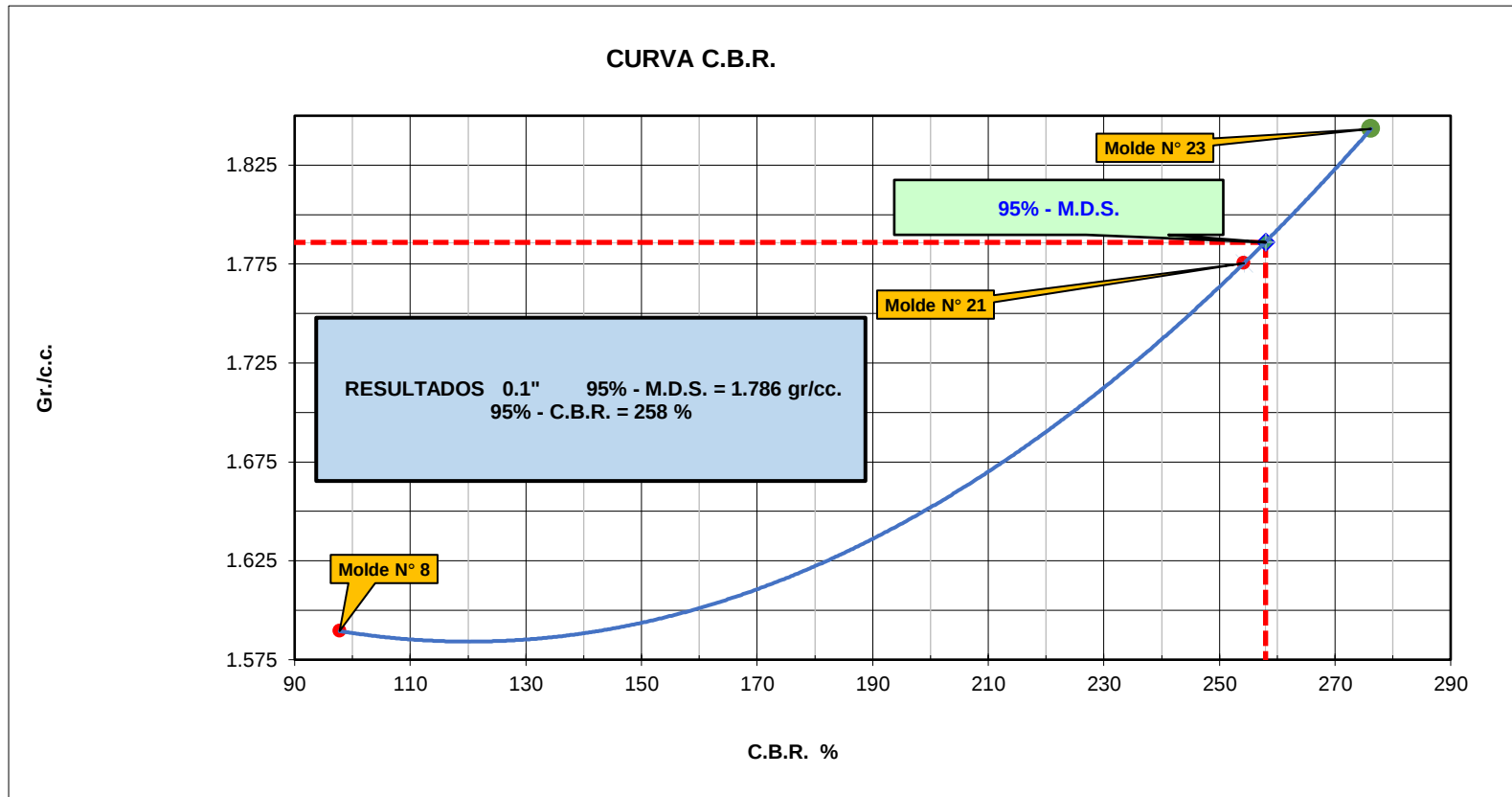
(c)

Figuras 17: Curva de Penetración CBR con 8% de Cemento :(a) 12 Golpes; (b) 25 Golpes; (c) 56 Golpes

Fuente: Elaboración Propia

Condición de la Muestra : 4 días de Saturación
Sobrecarga : 10.00 lb
Hinchamiento Promedio : 0.00 %

95 % MDS : 1.786 gr/c.c.
CBR 100 % MDS : **276.24 %**
CBR 95 % MDS : **258.00 %**



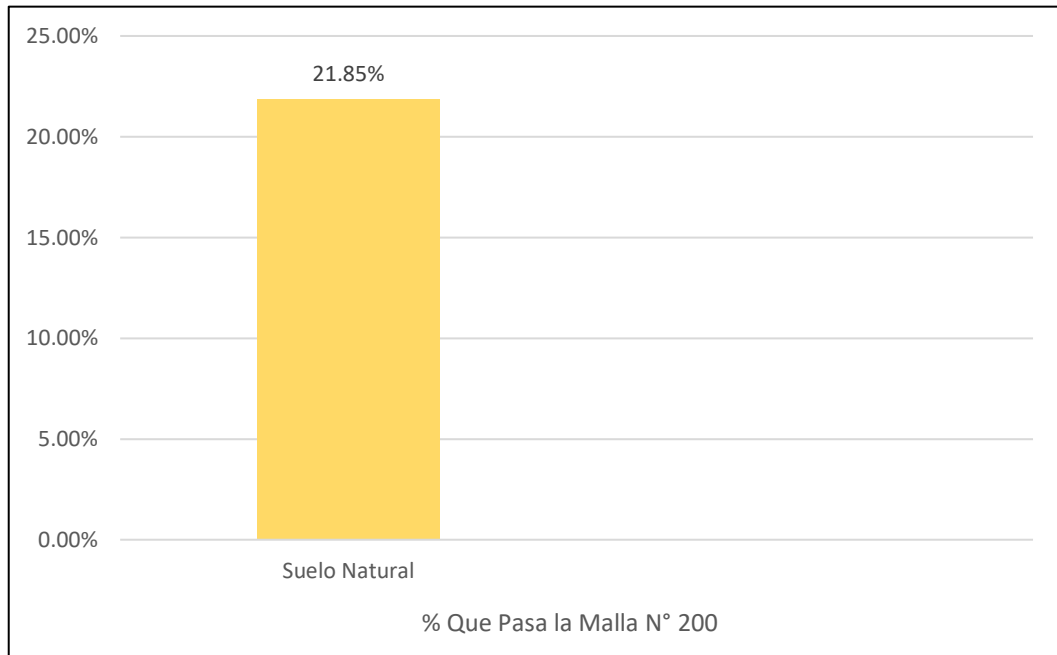
Figuras 18: Curva CBR con 8% de Cemento

Fuente: Elaboración Propia

- INTERPRETACIÓN

4.5. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Figuras 19: % Que Pasa la Malla N° 200



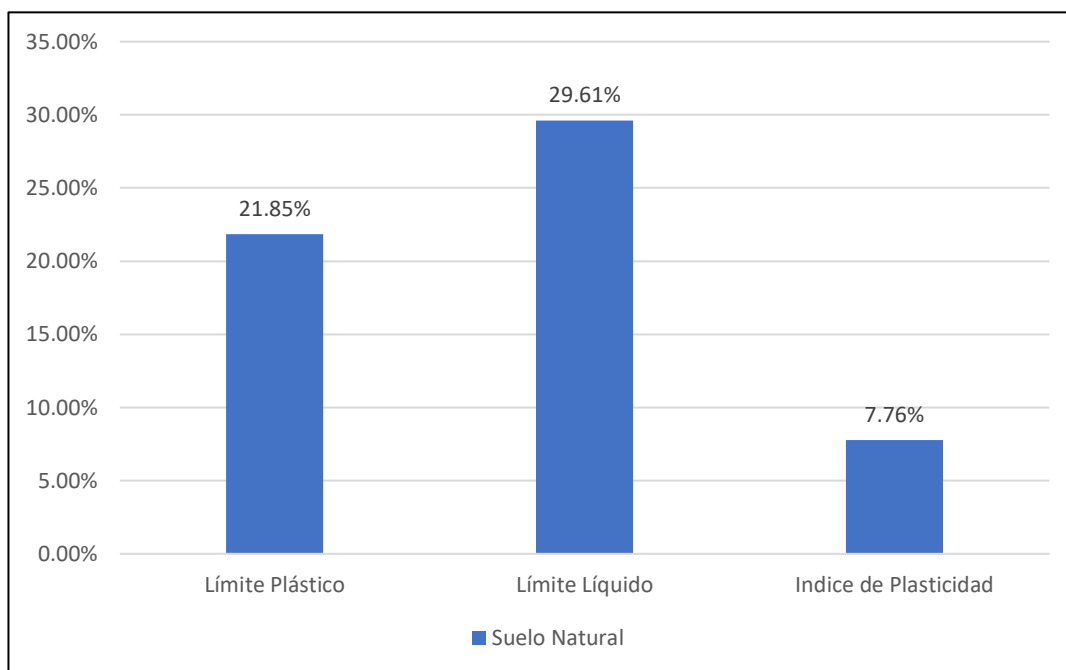
Fuente: Elaboración Propia

De la **Figura 19**, Este valor se encuentra dentro de los parámetros que la norma (CE.020) “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y TALUDES”, establece.

Dicha norma indica que para realizar estabilización de suelos con cemento se debe de tomarse en cuenta la siguiente nota: **El profesional responsable debe verificar que los finos pasantes al tamiz N°200, en el suelo, se encuentre entre 5% y 35%, antes de ser mezclados con cemento.**

4.6. LÍMITES DE ATTERBERG

Figuras 20: Límites de Atterberg de la Muestra



Fuente: Elaboración Propia

De la **Figura 20**: Estos valores se encuentran dentro de los parámetros que la norma (CE.020) “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y TALUDES”, establece.

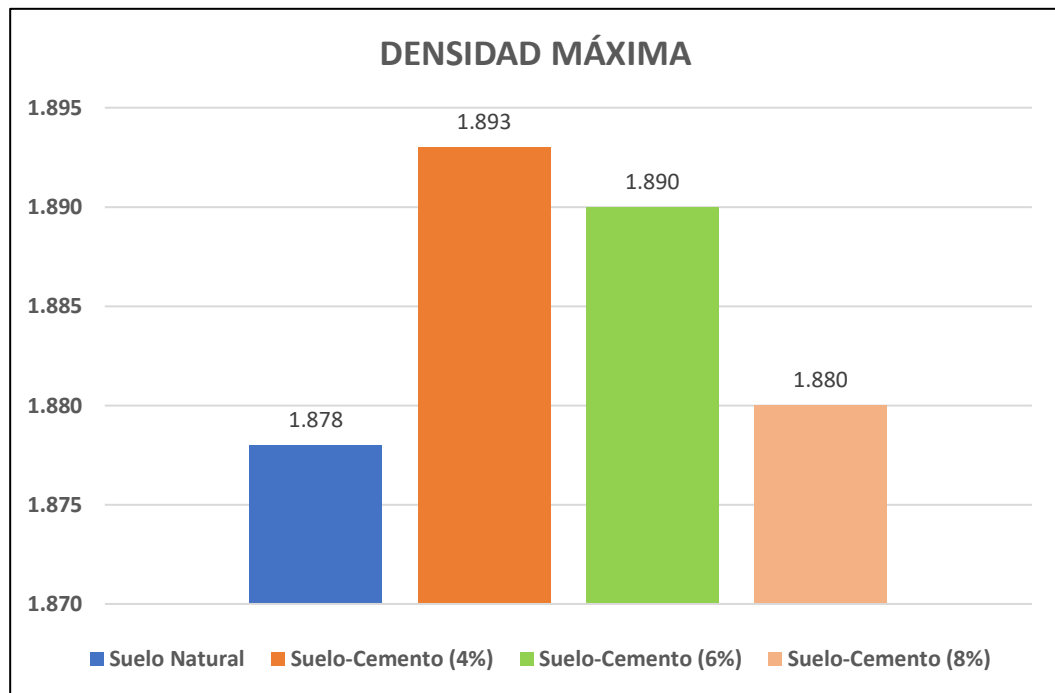
Dicha norma indica que: **El suelo se deberá controlar con ensayos de granulometría, verificando que el límite líquido sea menor de 50% y el índice de plasticidad menor de 25%.**

Según clasificación AASHTO con los datos obtenidos, se determinó un suelo A - 2 - 4 (0).

Así mismo el (MTC), indica: **Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los granulares tipos A-1, A-2 y A-3, con finos de plasticidad baja o media ($LL < 40$, $IP < 18$).**

4.7. ENSAYO PROCTOR

Figuras 21: Densidad Máxima del Suelo

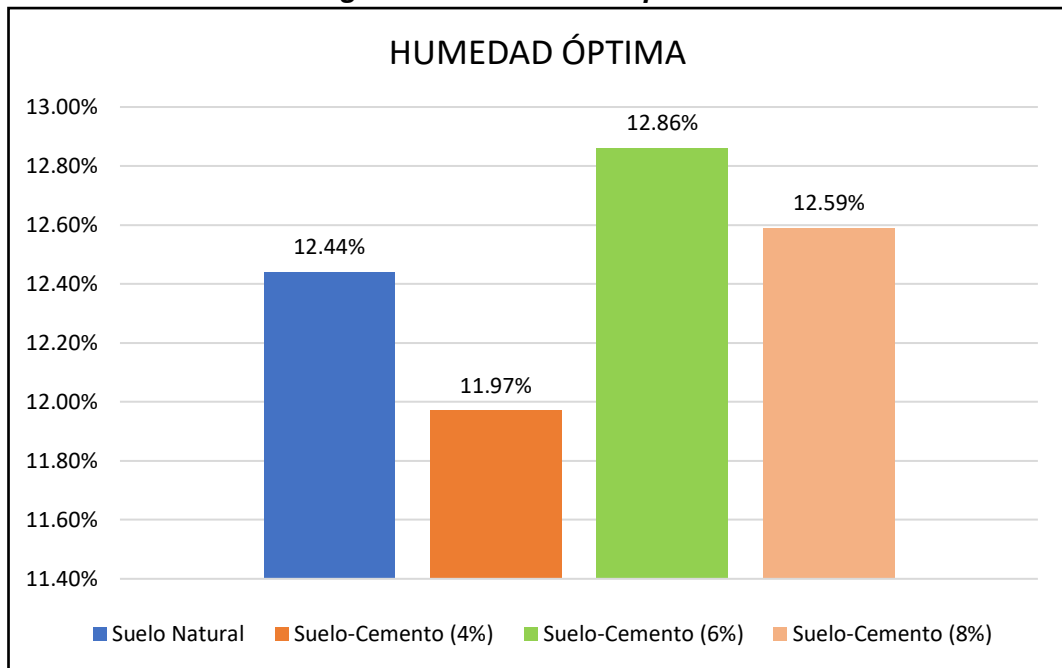


Fuente: Elaboración Propia

De la **Figura 21**: Indica que la densidad de suelo seco del suelo-cemento (4%) se encuentra más densificada que el resto de suelos, el segundo más densificado es el suelo-cemento (6%), el tercer más densificado es el suelo-cemento (8%) y por último se encuentra el suelo natural.

La aplicación del cemento a un suelo areno-arcilloso de acuerdo a lo indicado en la **Figura N°21**, demuestra que el cemento aplicado en mayores porcentajes disminuye la densidad de la muestra.

Figuras 22: Humedad Optima del Suelo



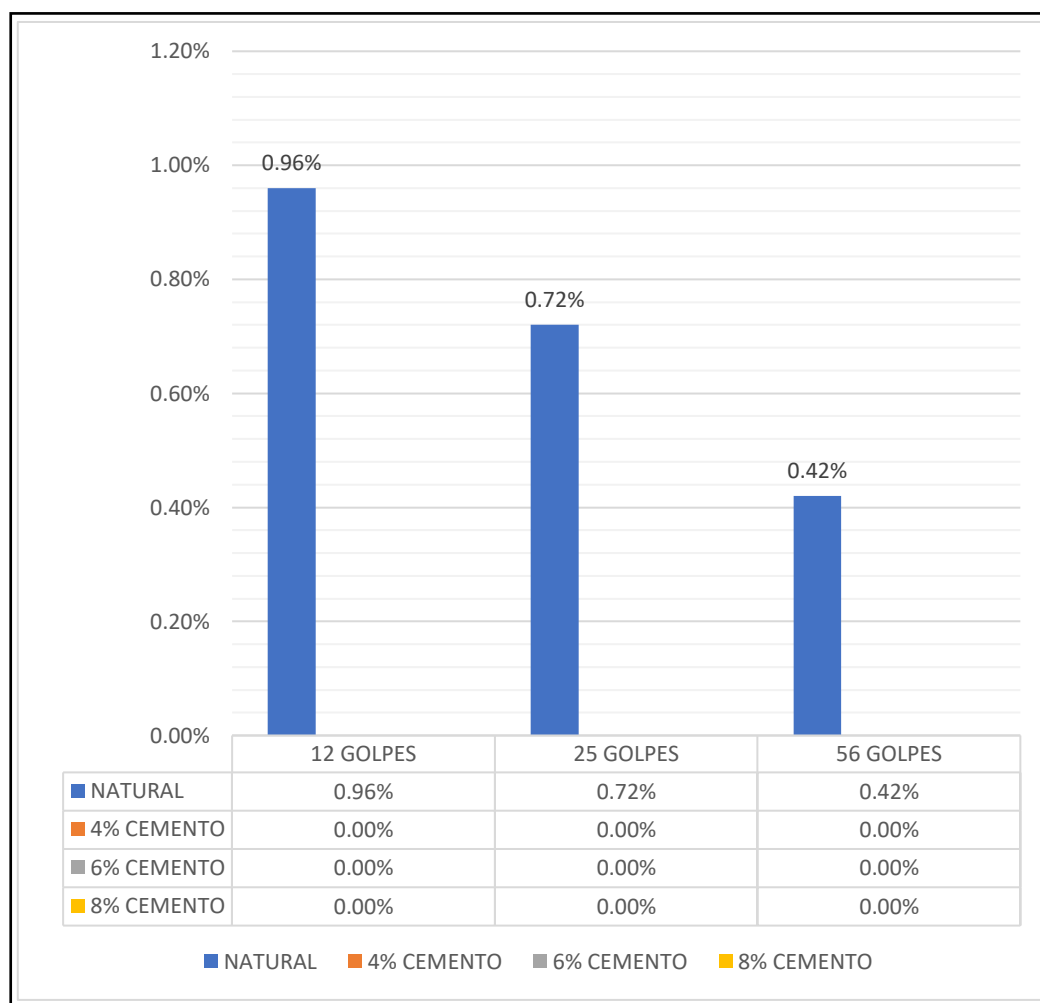
Fuente: Elaboración Propia

De la **Figura 22:** indica que el contenido de humedad optimo del suelo-cemento (6%) se encuentra con mayor porcentaje de humedad que el resto de suelos, el segundo más húmedo es el suelo-cemento (8%), el tercer más húmedo es el suelo natural y por último se encuentra el suelo-cemento (4%).

Los porcentajes de humedad obtenidos, se generan mediante la ejecución del ensayo de Proctor Modificado “método A”, tales valores indican la cantidad de agua necesaria en el suelo para generar una correcta compactación del suelo, es así que los datos varían de acuerdo a la del estabilizador para llevar a cabo un adecuado funcionamiento.

4.8. ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Figuras 23: Comparación de los Valores Máximos de Expansión

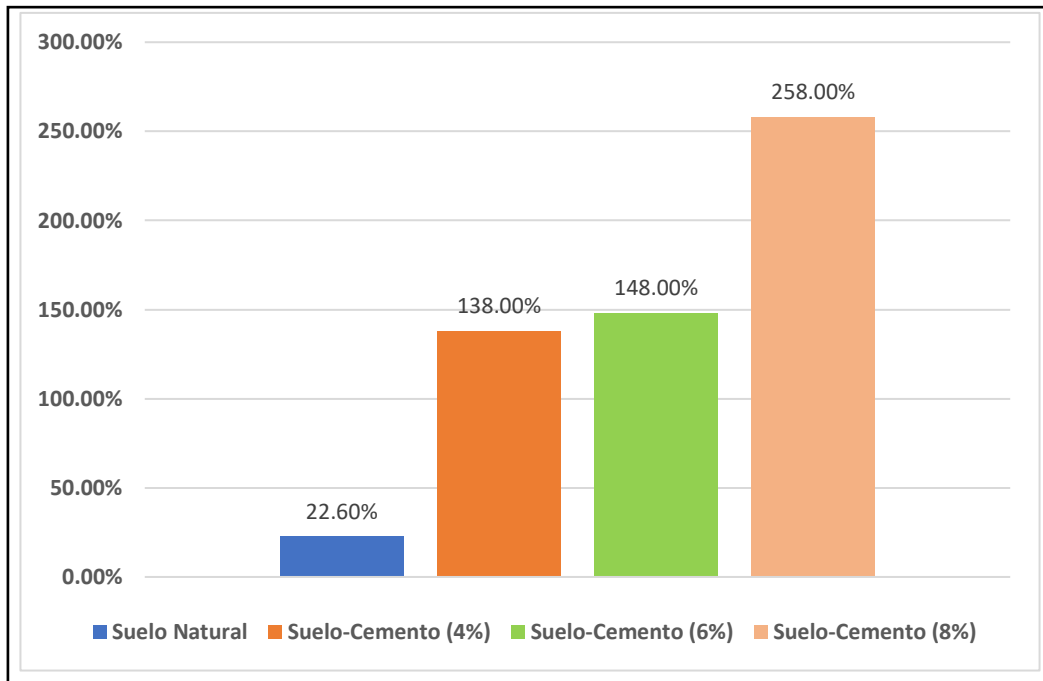


Fuente: Elaboración Propia

En la **Figura 23**: Se demuestra que el suelo natural a menor número de golpes de compactación de CBR, aumenta la expansión del material, teniendo como valor máximo de expansión la muestra de 12 golpes con 0.96%; así mismo un porcentaje promedio de muestra en estado natural de 0.70%.

De acuerdo a la **Figura 23**, los resultados de las muestras de suelo-cemento en todas sus proporciones no sufren ninguna variación o expansión, resistiendo a la infiltración del agua.

Figuras 24: Comparación de los Valores de CBR% del Suelo



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del CBR% obtenido para suelo natural corresponde a un material areno-arcilloso de baja plasticidad “SC” de acuerdo a la tabla de identificación de suelos SUCS. Resultado que corresponde a 22.60%, indicando que la muestra de suelo areno-arcilloso son denominados una base y sub-base bueno.

La aplicación del cemento a un suelo areno-arcilloso de acuerdo a lo indicado en la **Figura N°24**, demuestra que el cemento aplicado en mayores porcentajes aumenta la capacidad portante y mejora sustancialmente, debido al poder aglutinante que tiene el cemento portland,

De acuerdo a lo indicado en la **Figura N°24**, los resultados de suelo-cemento (4%), suelo-cemento (6%), suelo-cemento (8%), corresponde 138.00%, 148.00% y 248.00% respectivamente, denominados una base excelente.

4.9. RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS

Tabla 43: Resultados Obtenidos de los Ensayos

ENSAYOS	SUELO			
	NATURAL	4% CEMENTO	6% CEMENTO	8% CEMENTO
SUCS	SC	-	-	-
ASSHTO	A-2-4 (0)	-	-	-
LÍMITE LÍQUIDO (%)	29.61	-	-	-
LÍMITE PLÁSTICO (%)	21.85	-	-	-
ÍNDICE PLÁSTICO (%)	7.76	-	-	-
DENSIDAD SECA MÁXIMA (gr/cm ³)	1.878	1.893	1.890	1.880
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	12.44	11.97	12.86	12.59
CBR 100%	44.44	213.51	224.29	276.24
CBR 95%	22.60	138.00	148.00	258.00

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

- DISCUSIÓN

Tabla 44: Comparación de Resultados con Otras Tesis

Ens. Ubic	PAUJIL				JULIACA				ECUADOR		
	0%	4%	6%	8%	0%	3%	5%	7%	0%	5%	10%
SUCS	SC	-	-	-	CL	-	-	-	CH	-	-
Límite Líquido%	29.61	-	-	-	49.88	-	-	-	60.5	-	-
Índice Plástico%	7.76	-	-	-	28.97	-	-	-	6.33	-	-
Densidad Seca de Muestra(gr/cm3)	1.878	1.893	1.890	1.880	1.817	1.85	1.898	1.943	1.1452	1.1453	1.143
Óptimo Contenido de Humedad%	12.44	11.97	12.86	12.59	16.34	17	18.45	19.07	30.8	32	33.8
Expansión %	0.70	-	-	-	1.39	1.28	1.1	1.1	-	-	-
CBR 100%	44.44	213.51	224.29	276.24	8	11	15	20	-	-	-
CBR 95%	22.60	138.00	148.00	258.00	7.5	9.8	13.5	16	3.81	6.86	6.94

Fuente: Elaboración Propia

- **SUCS:**

Según SUCS, los resultados obtenidos se ubican dentro del grupo III, ya que el % que pasa de la malla 200 es de 28.65%. La muestra de suelo de Flores Flores J.S. (2015) e Hidalgo Benavides D.I. (2016), se encuentran clasificados dentro del grupo IV de suelos finos.

Tabla 45: Grupos de Porcentaje de Finos

GRUPO	PASA N° 200	CLASIFICACIÓN SUCS	Se evalúa
I	< 5%	GW	Cu, Cc
		GP	
		SW	
		SP	
II	5% – 12%	GW – GM	Cu, Cc, IP, LL
		GW – GC	
		GP – GM	
		GP – GC	
		SW – SM	
		SW – SC	
		SP – SM	
		SP – SC	
III	12% - 50%	GM	IP, LL
		GC	
		SM	
		SC	
IV	> 50%	ML (OL)	IP, LL
		MH (OH)	
		CL	
		CH	
		CL – ML	

Fuente: SUCS.

- **Límite Líquido:**

Según Dahshanamurthy y Raman (1973), la muestra se ubica en el rango de bajo hinchamiento, ya que el LL es de 29.61%. La muestra de suelo de Flores Flores J.S. (2015), se considera de hinchamiento medio e Hidalgo Benavides D.I. (2016), se considera de alto hinchamiento.

Tabla 46: Grado de Expansión

LIMITE LIQUIDO (%)	GRADO DE EXPANSIÓN
0 – 20	NO HAY HINCHAMIENTO
20 – 35	BAJO HINCHAMIENTO
35 – 50	HINCHAMIENTO MEDIO
50 – 70	ALTO HINCHAMIENTO
70 – 90	HINCHAMIENTO MUY ALTO
MAYOR QUE 90	HINCHAMIENTO EXTRA ALTO

Fuente: Dakshanamurthy y Raman.

- **Índice Plástico:**

Según la norma (CE.020), **“El suelo se deberá de controlar con ensayos de granulometría, verificando que el LL sea menor de 50% y el IP menor de 25%”**. Nuestros resultados cumplen con la normativa, sin embargo, Flores Flores J.S. (2015) e Hidalgo Benavides D.I. (2016), no cumplen.

- **Densidad Seca de Muestra:**

Los resultados obtenidos de densidad seca en promedio de las muestras, es mayor a las densidades obtenidas por Flores Flores J.S. (2015), e Hidalgo Benavides D.I. (2016). En consideración a esta comparación de resultados las muestras analizadas por los autores presentan un mayor grado de compactación.

- **Óptimo Contenido de Humedad:**

Los resultados obtenidos del optimo contenido de humedad de las muestras, es menor a las obtenidas por Flores Flores J.S. (2015), e Hidalgo Benavides D.I. (2016).

- **Expansión:**

Las muestras que incorporadas con cemento fueron curadas durante 7 días y luego sumergidas 96 horas continuas, no muestran expansión alguna, salvo la muestra en estado natural, que tiene un valor promedio de expansión de 0.70%, sin embargo, las muestras de suelo de Flores Flores J.S. (2015), presentan en todos sus ensayos expansiones que en promedio es de 1.217, siendo la máxima

de 1.39 (estado natural) y las mínimas de 1.10 en las dosificaciones de 5 y 7 % de cemento. Por otro lado, no se obtuvieron datos de las muestras de Hidalgo Benavides D.I. (2016).

- **CBR 95%:**

Los resultados al 95% de CBR en comparación con las otras investigaciones presenta grandes diferencias de valores, siendo el máximo de 258.00% para el suelo cemento con 8% y un mínimo de 22.60% para el suelo en estado natural, mientras que Flores Flores J.S. (2015), presenta como valor máximo 16.00% para suelo-cemento al 7% y un mínimo de 7.50% para el suelo en estado natural. Por otro lado, los datos de las muestras de Hidalgo Benavides D.I. (2016), presenta como valor máximo 6.94% para un suelo-cemento al 10% y un mínimo de 3.81% para el suelo en estado natural.

CAPÍTULO VI

- CONCLUSIONES

- La identificación y clasificación según la granulometría de la muestra en estado natural del suelo obtenido fue una arena-arcillosa de baja plasticidad según indica la tabla SUCS.
- De acuerdo al ensayo de Límites de consistencia realizado, la muestra en estado natural presenta un plasticidad que se encuentra dentro del rango y parámetros de la norma (CE.020) y del (MTC), siendo éste adecuado para realizar estabilización con cemento portland según las referencias antes mencionadas.
- La aplicación del cemento a las muestras de suelo areno-arcilloso obtenido en campo, demuestra que añadiendo cemento portland en mayores porcentajes disminuye la densidad de la muestra.
- Los valores de expansión de las muestras suelos-cemento (4%), suelos-cemento (6%) y suelos-cemento (8%) con distintos números de golpes, no sufrieron variación alguna, resistiendo a la infiltración del agua.
- Los resultados de la investigación fueron satisfactorios, pues los porcentajes de 4%, 6% y 8% de cemento portland lograron obtener valores de CBR elevados mayores a los esperados.

- **RECOMENDACIONES**

- Realizar variaciones menores del contenido de cemento portland aplicado al suelo para posteriores investigaciones, debido a que el ensayo de CBR se obtuvieron valores muy altos.

- ANEXOS

ANEXO 1: FORMATO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Responsables :

Fecha :

Tamices ASTM	Abertura en mm	Peso Retenido	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	% Que Pasa

ANEXO 2: FORMATO DE LÍMITES ATTERBERG

Responsables :

Fecha :

Límite Líquido: Norma ASTM D4318 – T 89			
Ensayo N°			
N° de Golpes			
R + Suelo Húmedo			
R + Suelo Seco			
Peso de la Tara			
Peso de Agua			
Peso de Suelo Seco			
% de Humedad			

Límite Plástico: Norma ASTM D4318 – T 90			
Ensayo N°			
R + Suelo Húmedo			
R + Suelo Seco			
Peso de la Tara			
Peso de Agua			
Peso de Suelo Seco			
% de Humedad			

ANEXO 3: FORMATO DE PROCTOR MODIFICADO

Responsables :

Fecha :

Compactación				
Prueba N°				
Número de Capas				
Número de Golpes				
Peso Suelo + Molde (gr.)				
Peso Molde (gr.)				
Volumen del Molde (cm3)				
P. Suelo Compactado (gr.)				
Densidad Húmeda (gr/cm3)				

Humedad %								
N° Recipiente								
Recipiente + Suelo Húmedo (gr.)								
Recipiente + Suelo Seco (gr.)								
Peso de Recipiente (gr.)								
Peso de Agua (gr.)								
Peso de Suelo Seco (gr.)								
Humedad (%)								
Promedio Humedad (%)								
Densidad Seca (gr/cm3)								

ANEXO 4: FORMATO DE ENSAYO CBR

Responsables :

Fecha :

Molde	N°						
Capas	N°						
Golpes por capa	N°						
Condición de Muestra		Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado	Hum. Opt.	Saturado
Peso de Suelo Húmedo + Molde	Gr.						
Peso de Molde	Gr.						
Volumen del Suelo	c.c.						
Peso del Suelo Húmedo	Gr.						
Densidad Húmeda	Gr/c.c.						
<u>HUMEDAD</u>							
N° de Recipiente	N°						
Peso del Suelo Húmedo + Recip.	Gr.						
Peso del Suelo Seco + Recip.	Gr.						
Peso del Recipiente	Gr.						
Peso del Agua	Gr.						
Peso del Suelo Seco	Gr.						
Humedad	%						

ANEXO 5: PANEL FOTOGRÁFICO



Figuras 25: Proceso de Extracción de Muestra - Calicata Exploratoria N°01



Figuras 26: Proceso de Análisis Granulométrico



Figuras 27: Proceso de Ensayo Límite Líquido



Figuras 28: Proceso de Ensayo Límite Plástico



Figuras 29: Proceso de Ensayo Proctor Modificado



Figuras 30: Proceso de Ensayo CBR

ANEXO 6: MAPA DE UBICACIÓN

