

# UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



## ESTABILIZACIÓN DE SUELO ARENO LIMOSO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CENIZA DE EUCALIPTO Y CEMENTO PARA SU USO COMO CAPA SUBRASANTE

Proyecto de Grado presentado para optar al título de Licenciatura en Ingeniería Civil

**POSTULANTE:** HILDA VERONICA QUENTA NINACHOQUE

**TUTORES:** M.Sc. Ing. VICTOR EDUARDO BERMEJO FRANCO

Ing. MARIA DEL CARMEN CENZANO SERRANO

LA PAZ - BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

# **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por las bendiciones, por darme fuerza y salud para culminar con mi formación académica.

A la Universidad Mayor de San Andrés, la Facultad de Ingeniería Civil, por la formación académica de un buen profesional, al Ing. Miguel Muñoz Black director de la Carrera Ingeniería Civil por su labor a favor de la carrera; a todos los docentes los cuales brindan sus conocimientos y experiencia profesional para nuestra formación; así también, al personal administrativo que forma parte de la institución.

Agradecer en especial a mis asesores M.Sc. Ing. Víctor Bermejo Franco y Ing. María del Carmen Cenzano Serrano, por la orientación, dedicación y conocimientos compartidos para realizar el presente proyecto de grado, también agradecer a mis tribunales designados que con sus conocimientos apoyaron a la conclusión del proyecto.

Al Instituto de Ensayo de Materiales, al personal técnico de Suelos Don Rene y Don Diego, por permitirme realizar los ensayos con los equipos y materiales del instituto y por guiarme en el proceso.

Se agradece con mucho cariño, a mi familia por el apoyo incondicional, la confianza, los consejos, los ejemplos que me inculcaron en la vida, alentándome siempre para terminar esta etapa de estudio.

Por último, agradecer a mis compañeros y amigos que me acompañaron en el transcurso de mi estudio universitario.

**Hilda Veronica Quenta Ninachoque**

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto se lo dedico a Dios que siempre está presente en mi vida.

En especial dedico este proyecto a mi padre Rufino Quenta Quispe y a mi admirable madre Patricia Ninachoque Plata, que durante el tiempo de universidad siempre confiaron en mí, me brindaron su apoyo incondicional, su comprensión, un amor incondicional, además por el sacrificio que hicieron por permitirme cumplir con éxito esta etapa de mi vida. Así también, dedicárselos a mis hermanos Gustavo y Edgar que estuvieron acompañándome a lo largo de mi vida.

**Hilda Veronica Quenta Ninachoque**

## **ESTABILIZACION DE SUELO ARENO LIMOSO MEDIANTE LA ADICION DE CENIZA DE EUCALIPTO Y CEMENTO PARA SU USO COMO CAPA SUBRASANTE**

### **RESUMEN:**

El presente proyecto de grado tiene por objeto estabilizar un suelo areno limoso mediante la adición de ceniza de eucalipto junto con el cemento, con el fin de utilizarlo en proyectos carreteros en capas de un pavimento flexible, promoviendo de tal manera el uso de ceniza de eucalipto que no es bien aprovechada y a su vez fomenta la reciclación de madera muerta de eucalipto para obtener su ceniza, implementándola como material inorgánico estabilizador.

Se realizó los ensayos correspondientes para la caracterización mecánica del suelo en estado natural. Con objeto de hallar el porcentaje óptimo de cemento para estabilizar el suelo se siguió la Norma de Dosificación de la Portland Cement Association (PCA), para luego sustituir este porcentaje con ceniza de eucalipto en porcentajes de 25%, 50%, 75% y 100% respecto a este.

Una vez definidos los porcentajes de ceniza de eucalipto y cemento, se realizó los ensayos de compresión simple a 7 días y durabilidad por mojado y secado, determinando con estos datos la dosificación óptima de ceniza de eucalipto y cemento para la estabilización del suelo de estudio. La dosificación óptima que permite cumplir con los requerimientos para que el suelo este estabilizado, fue la combinación de 2.9% de ceniza de eucalipto y 6.1% de cemento, teniendo una resistencia a compresión a 7 días de 1.91 MPa y un porcentaje de pérdida en peso de 12.83%, además, se halló su valor de CBR al 95% evidenciando que incrementa de 29% a 140% respecto al suelo natural.

## **STABILIZATION OF SANDY SILT SOIL THROUGH THE ADDITION OF EUCALYPTUS ASH AND CEMENT FOR USE AS A SUBGRADE LAYER**

### **ABSTRACT:**

The purpose of this degree project is to stabilize a sandy silty soil by adding eucalyptus ash together with cement, in order to use it in road projects in layers of a flexible pavement, thus promoting the use of eucalyptus ash that is not well used and at the same time encouraging the recycling of dead eucalyptus wood to obtain its ash, implementing it as a stabilizing inorganic material.

The corresponding tests were carried out for the mechanical characterization of the soil in its natural state. In order to find the optimal percentage of cement to stabilize the soil, the Portland Cement Association (PCA) Dosage Standard was followed, and then this percentage was replaced with eucalyptus ash in percentages of 25%, 50%, 75% and 100% with respect to this.

Once the percentages of eucalyptus ash and cement were defined, simple compression tests were carried out at 7 days and durability by wetting and drying, determining with these data the optimal dosage of eucalyptus ash and cement for the stabilization of the soil under study. The optimal dosage that allows to comply with the requirements for the soil to be stabilized, was the combination of 2.9% eucalyptus ash and 6.1% cement, having a compressive strength at 7 days of 1.91 MPa and a percentage of weight loss of 12.83%. In addition, its CBR value was found at 95% showing that it increases from 29% to 140% with respect to the natural soil.

# INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I .....	1
1. INTRODUCCION .....	1
1.1 Justificación General .....	1
1.1.1 Problemática.....	1
1.1.2 Justificación .....	2
1.2 Fines.....	3
1.3 Estado de arte.....	4
1.4 Objetivos del estudio .....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Alcance del proyecto .....	5
CAPITULO II .....	8
2. MARCO TEORICO.....	8
2.1 Mecánica de suelos .....	8
2.2 Suelo.....	8
2.3 Clasificación de suelos .....	9
2.3.1 Clasificación de suelos por el tamaño de partículas .....	9
2.3.1.1 Suelo areno limoso .....	9
2.3.2 Clasificación AASTHO .....	10
2.3.3 Clasificación Unificada de suelos S.U.C.S. ....	11
2.3.3.1 Suelo Grueso.....	11
2.3.3.2 Suelos finos.....	12
2.4 Eucalipto.....	12
2.4.1 Ceniza de eucalipto .....	14
2.5 Ensayo para determinar la composición química de ceniza .....	15
2.6 Cemento.....	16
2.7 Estabilización de suelos.....	17
2.8 Tipos de estabilización .....	17
2.8.1 Estabilización física .....	17
2.8.2 Estabilización mecánica .....	17

2.8.3	Estabilización química .....	18
2.8.4	Estabilización con cemento.....	18
2.8.4.1	Metodología de dosificación .....	19
2.9	Estructura de pavimento .....	21
2.9.1	Subrasante .....	21
2.9.2	Subbase .....	22
2.9.3	Base.....	23
2.10	Ensayos de caracterización de suelos .....	23
2.10.1	Contenido de humedad natural (ASTM D2216-98) .....	23
2.10.2	Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T27-82) .....	24
2.10.3	Gravedad específica (AASHTO T100-70) .....	25
2.10.4	Análisis granulométrico por método del hidrómetro (AASHTO T88-93) .....	26
2.10.5	Límite de Atterberg.....	27
2.10.5.1	Límite líquido (AASHTO T 89-81).....	27
2.10.5.2	Límite plástico (AASHTO T90-70) .....	28
2.10.6	Compactación.....	29
2.10.6.1	Proctor estándar (AASHTO T-99) .....	29
2.10.6.2	Proctor modificado (AASHTO T-180-90).....	30
2.10.7	Relación Soporte California CBR (AASHTO T193) .....	31
2.10.8	Moldeado de probetas .....	32
2.10.9	Compresión simple .....	33
2.10.10	Durabilidad por mojado y secado.....	35
CAPITULO III.....		37
3.	MARCO PRACTICO Y METODOLOGIA.....	37
3.1	Localización y extracción de muestra de suelo .....	37
3.2	Recolección y Calcinación para obtener ceniza de eucalipto .....	38
3.2.1	Recolección de troncos y ramas de eucalipto .....	40
3.2.2	Calcinación y obtención de ceniza de eucalipto .....	41
3.3	Determinación de componentes químicos de ceniza de eucalipto.....	42
3.3.1	Ensayo de Fluorescencia de Rayos X.....	43
3.4	Ensayo de caracterización del suelo natural .....	43

3.4.1	Contenido de humedad natural (ASTM D2216-98) .....	43
3.4.2	Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T27-82) .....	44
3.4.3	Gravedad específica (AASHTO T100-70) .....	46
3.4.4	Análisis granulométrico por método del hidrómetro (AASHTO T88-93) .....	47
3.4.5	Límite de Atterberg.....	48
3.4.5.1	Límite líquido (AASHTO T 89-81).....	48
3.4.5.2	Límite plástico (AASHTO T90-70) .....	49
3.4.6	Compactación.....	50
3.4.6.1	Proctor estándar (AASHTO T-99) .....	50
3.4.6.2	Proctor modificado (AASHTO T-180-90) .....	51
3.4.7	Relación Soporte California CBR (AASHTO T193) .....	53
3.4.8	Moldeado de probetas .....	56
3.4.9	Compresión simple .....	57
3.4.10	Durabilidad por mojado y secado .....	59
3.5	Dosificación de suelo-cemento.....	59
3.5.1	Proctor estándar (AASHTO T-99).....	60
3.5.2	Compresión simple suelo-cemento .....	60
3.5.3	Durabilidad por mojado y secado suelo-cemento.....	62
3.5.4	Relación Soporte California CBR (AASHTO T193) Suelo-Cemento.....	63
3.6	Ensayo experimental de suelo-ceniza de eucalipto-cemento.....	65
3.6.1	Proctor estándar (suelo-ceniza de eucalipto-cemento).....	66
3.6.2	Compresión simple (suelo-ceniza de eucalipto-cemento) .....	66
3.6.3	Durabilidad por mojado y secado (suelo-ceniza de eucalipto-cemento) .....	68
CAPITULO IV.....		70
4.	CALCULOS Y RESULTADOS.....	70
4.1	Análisis de la ceniza de eucalipto .....	70
4.2	Análisis de propiedades del suelo.....	70
4.2.1	Humedad Natural .....	70
4.2.2	Peso específico.....	70
4.2.3	Granulometría del suelo y características granulométricas del suelo .....	71
4.2.4	Límites de consistencia .....	73

4.2.5	Clasificación de suelo .....	74
4.2.5.1	Sistema de clasificación AASHTO .....	74
4.2.5.2	S.U.C.C.....	76
4.2.6	Compactación.....	77
4.2.7	CBR.....	78
4.2.8	Compresión Simple.....	80
4.2.9	Durabilidad.....	80
4.3	Análisis de la dosificación de estabilización de suelo-cemento .....	81
4.4	Análisis comparativo de ensayos suelo-ceniza de eucalipto-cemento .....	89
4.4.1	Compactación.....	89
4.4.1.1	Análisis de humedad óptima y densidad seca máxima.....	92
4.4.2	Compresión Simple.....	95
4.4.2.1	Análisis de resistencia a compresión a 7 días.....	97
4.4.3	Durabilidad.....	98
4.4.3.1	Análisis de durabilidad .....	101
4.5	Análisis de dosificaciones dosificación óptima.....	102
4.5.1	Compresión simple suelo-cemento (Dosificación óptima).....	102
4.5.2	Durabilidad por mojado y secado suelo-cemento (Dosificación óptima).....	104
4.5.3	Relación Soporte California CBR (AASHTO T193) .....	106
CAPITULO V .....		108
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		108
5.1	Conclusiones.....	108
5.2	Recomendaciones .....	110
CAPITULO VI.....		113
6. BIBLIOGRAFIA.....		113
7. ANEXOS.....		114

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Laboratorios a realizar en la fase experimental</i> .....	7
<b>Tabla 2</b> <i>Composición química de ceniza de eucalipto</i> .....	14
<b>Tabla 3</b> <i>Composición química de ceniza de eucalipto y cemento tipo I</i> .....	15
<b>Tabla 4</b> <i>Métodos de Proctor Estándar</i> .....	30
<b>Tabla 5</b> <i>Métodos de Proctor Modificado</i> .....	31
<b>Tabla 6</b> <i>Porcentaje de pérdida de peso</i> .....	36
<b>Tabla 7</b> <i>Cantidad de suelo necesaria para los laboratorios realizados</i> .....	38
<b>Tabla 8</b> <i>Ensayos suelo ceniza de eucalipto y cemento</i> .....	65
<b>Tabla 9</b> <i>Contenido de humedad suelo natural</i> .....	70
<b>Tabla 10</b> <i>Gravedad específica de suelo natural</i> .....	71
<b>Tabla 11</b> <i>Composición porcentual de suelo natural</i> .....	72
<b>Tabla 12</b> <i>Parámetros granulométricos Cu y Cc</i> .....	73
<b>Tabla 13</b> <i>Valor de límite líquido</i> .....	73
<b>Tabla 14</b> <i>Características del suelo para AASHTO</i> .....	74
<b>Tabla 15</b> <i>Características del suelo para SUCS</i> .....	74
<b>Tabla 16</b> <i>Clasificación AASHTO</i> .....	75
<b>Tabla 17</b> <i>Clasificación SU.C.S.</i> .....	76
<b>Tabla 18</b> <i>Valores promedio del ensayo Proctor T-99</i> .....	77
<b>Tabla 19</b> <i>Valores promedio del ensayo Proctor T-180</i> .....	78
<b>Tabla 20</b> <i>Cálculo de expansión CBR (Ensayo 1)</i> .....	79
<b>Tabla 21</b> <i>Valor promedio de CBR</i> .....	79
<b>Tabla 22</b> <i>Valor promedio de la resistencia a compresión (7 días)</i> .....	80
<b>Tabla 23</b> <i>Porcentaje de agua retenido</i> .....	81
<b>Tabla 24</b> <i>Porcentaje de pérdida en peso suelo natural (1 Ciclo)</i> .....	81
<b>Tabla 25</b> <i>Composición porcentual del suelo natural según la PCA</i> .....	82
<b>Tabla 26</b> <i>Valores promedio del ensayo Proctor T-99 Suelo-Cemento (D-I)</i> .....	85
<b>Tabla 27</b> <i>Valor promedio de la resistencia a compresión (7 días) Suelo-Cemento</i> .....	86
<b>Tabla 28</b> <i>Valores promedio del ensayo Proctor T-180 Suelo-Cemento (D-I)</i> .....	89
<b>Tabla 29</b> <i>Valor promedio Hop y Ds max para diferentes % de ceniza de eucalipto y cemento</i> .	92
<b>Tabla 30</b> <i>Variación de %Hop respecto a la dosificación D-I</i> .....	93

<b>Tabla 31</b>	<i>Variación de Ds max respecto a la dosificación D-I</i> .....	<b>94</b>
<b>Tabla 32</b>	<i>Resistencia promedio a 7 días (D-II)</i> .....	<b>95</b>
<b>Tabla 33</b>	<i>Resistencia promedio a 7 días (D-III)</i> .....	<b>95</b>
<b>Tabla 34</b>	<i>Resistencia promedio a 7 días (D-IV)</i> .....	<b>96</b>
<b>Tabla 35</b>	<i>Resistencia promedio a 7 días (D-V)</i> .....	<b>96</b>
<b>Tabla 36</b>	<i>Resistencia a 7 días</i> .....	<b>97</b>
<b>Tabla 37</b>	<i>Porcentaje de pérdida D-V: SN+9%CE (1 Ciclo)</i> .....	<b>100</b>
<b>Tabla 38</b>	<i>Valor de % de pérdida a 12 ciclos</i> .....	<b>101</b>
<b>Tabla 39</b>	<i>Dosificación óptima según Ensayo de Compresión y Durabilidad</i> .....	<b>102</b>
<b>Tabla 40</b>	<i>Valor Promedio Hop y Ds max (Dosificación óptima)</i> .....	<b>102</b>
<b>Tabla 41</b>	<i>Resistencia promedio a 7 días (Dosificación óptima)</i> .....	<b>104</b>
<b>Tabla 42</b>	<i>Promedio de porcentaje de pérdida (Dosificación óptima)</i> .....	<b>105</b>
<b>Tabla 43</b>	<i>%Hop y Ds max (Dosificación óptima)</i> .....	<b>106</b>
<b>Tabla 44</b>	<i>Valor de CBR (Dosificación óptima)</i> .....	<b>106</b>
<b>Tabla 45</b>	<i>Tabla resumen (Resistencia, durabilidad, Hop y Ds max)</i> .....	<b>109</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	<i>Clasificación de suelos por el tamaño de las partículas</i> .....	9
<b>Figura 2</b>	<i>Carta de Plasticidad de la AASHTO (Divide grupo A-2 y A-7)</i> .....	11
<b>Figura 3</b>	<i>Suelos gruesos (grava y arena)</i> .....	12
<b>Figura 4</b>	<i>Eucalipto (Eucalyptus Globulus)</i> .....	14
<b>Figura 5</b>	<i>Ceniza de eucalipto</i> .....	15
<b>Figura 6</b>	<i>Cemento Viacha IP-40</i> .....	16
<b>Figura 7</b>	<i>Estabilización química de suelo con cemento</i> .....	19
<b>Figura 8</b>	<i>Capa de pavimento Rígido y Flexible</i> .....	21
<b>Figura 9</b>	<i>Porcentaje de CBR para la Subrasante</i> .....	22
<b>Figura 10</b>	<i>Tamaño de Tamices de laboratorio</i> .....	24
<b>Figura 11</b>	<i>Serie gruesa de Tamices</i> .....	24
<b>Figura 12</b>	<i>Valores de gravedad específica para algunos tipos de suelo</i> .....	25
<b>Figura 13</b>	<i>Materiales para el ensayo (Picnómetro, agua destilada, termómetro y pipeta)</i> .....	26
<b>Figura 14</b>	<i>Materiales y equipos para el ensayo</i> .....	26
<b>Figura 15</b>	<i>Límite de consistencia</i> .....	27
<b>Figura 16</b>	<i>Cuchara de Casagrande</i> .....	28
<b>Figura 17</b>	<i>Molde de 6" (Proctor Modificado)</i> .....	30
<b>Figura 18</b>	<i>Apisonador de 10 lb (Proctor Modificado)</i> .....	30
<b>Figura 19</b>	<i>Moldes del ensayo de CBR</i> .....	32
<b>Figura 20</b>	<i>Aparato para medir la extensión</i> .....	32
<b>Figura 21</b>	<i>Equipo para extraer probeta de suelo cemento</i> .....	33
<b>Figura 22</b>	<i>Sitio de Curado Húmedo</i> .....	33
<b>Figura 23</b>	<i>Prensa (Ruptura de las probetas)</i> .....	34
<b>Figura 24</b>	<i>Resistencia mínima admisible - Método A</i> .....	34
<b>Figura 25</b>	<i>Resistencia mínima admisible - Método B</i> .....	35
<b>Figura 26</b>	<i>Ubicación del lugar de toma de muestra</i> .....	37
<b>Figura 27</b>	<i>Extracción de muestra de suelo</i> .....	37
<b>Figura 28</b>	<i>Árbol caído (Eucalipto)</i> .....	38
<b>Figura 29</b>	<i>Arboles, ramas y hojas de eucalipto caídas</i> .....	39
<b>Figura 30</b>	<i>a) Corte de troncos y ramas b) y c) Acopio de troncos y ramas de eucalipto</i> .....	40

<b>Figura 31</b>	<i>Obtención de Leña.....</i>	<b>41</b>
<b>Figura 32</b>	<i>Calcinación en horno de ladrillo .....</i>	<b>41</b>
<b>Figura 33</b>	<i>Calcinación de troncos y ramas de eucalipto en el horno de IEM .....</i>	<b>42</b>
<b>Figura 34</b>	<i>Aparato para tamizar la ceniza.....</i>	<b>42</b>
<b>Figura 35</b>	<i>Ceniza de eucalipto .....</i>	<b>42</b>
<b>Figura 36</b>	<i>Resultados del ensayo Fluorescencia de Rayos X en IGEMA .....</i>	<b>43</b>
<b>Figura 37</b>	<i>Muestras para el ensayo.....</i>	<b>44</b>
<b>Figura 38</b>	<i>Muestra de 6 Kg para el ensayo.....</i>	<b>44</b>
<b>Figura 39</b>	<i>Desarrollo de tamizado de la muestra Fina.....</i>	<b>45</b>
<b>Figura 40</b>	<i>Peso del picnómetro .....</i>	<b>46</b>
<b>Figura 41</b>	<i>Proceso de colocado de agua y suelo al picnómetro .....</i>	<b>46</b>
<b>Figura 42</b>	<i>Mescla en la batidora.....</i>	<b>48</b>
<b>Figura 43</b>	<i>Lectura del picnómetro colocado a baño maría .....</i>	<b>48</b>
<b>Figura 44</b>	<i>Muestra de suelo colocado en el aparato de Cuchara de Casagrande .....</i>	<b>49</b>
<b>Figura 45</b>	<i>Molde y apisonador (Proctor T-99) .....</i>	<b>50</b>
<b>Figura 46</b>	<i>Muestra preparada para el ensayo T-99.....</i>	<b>50</b>
<b>Figura 47</b>	<i>Espécimen compactado y enrazado .....</i>	<b>51</b>
<b>Figura 48</b>	<i>Registro del molde y suelo húmedo (T-99).....</i>	<b>51</b>
<b>Figura 49</b>	<i>Cápsula y suelo con diferentes humedades.....</i>	<b>51</b>
<b>Figura 50</b>	<i>Muestra de suelo 8 Kg (T-180).....</i>	<b>52</b>
<b>Figura 51</b>	<i>Mezcla homogénea del suelo.....</i>	<b>52</b>
<b>Figura 52</b>	<i>Proceso de compactación.....</i>	<b>52</b>
<b>Figura 53</b>	<i>Enrazado con regla metálica .....</i>	<b>53</b>
<b>Figura 54</b>	<i>Peso del molde y suelo húmedo (T-180) .....</i>	<b>53</b>
<b>Figura 55</b>	<i>Espécimen compactado y enrazado de molde C.B.R. ....</i>	<b>54</b>
<b>Figura 56</b>	<i>Inmersión y registro de lectura con deformímetro.....</i>	<b>55</b>
<b>Figura 57</b>	<i>Ensayo de penetración en molde de C.B.R. ....</i>	<b>55</b>
<b>Figura 58</b>	<i>Muestra de suelo ya ensayada.....</i>	<b>55</b>
<b>Figura 59</b>	<i>Probeta compactada y gata hidráulica .....</i>	<b>56</b>
<b>Figura 60</b>	<i>Proceso de extracción de la probeta .....</i>	<b>57</b>
<b>Figura 61</b>	<i>Curado húmedo de probetas .....</i>	<b>57</b>

<b>Figura 62</b>	<i>Proceso de inmersión de probetas</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 63</b>	<i>Probeta de suelo natural disgregado</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 64</b>	<i>Probeta posicionada correctamente antes del ensayo</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 65</b>	<i>Falla de probeta al esfuerzo máximo</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 66</b>	<i>Cepillado en probeta de suelo natural</i> .....	<b>59</b>
<b>Figura 67</b>	<i>Moldeado de probetas Suelo-Cemento (Ensayo compresión)</i> .....	<b>61</b>
<b>Figura 68</b>	<i>Inmersión de probetas suelo-cemento</i> .....	<b>61</b>
<b>Figura 69</b>	<i>Proceso de medida de diámetro y altura de las probetas</i> .....	<b>61</b>
<b>Figura 70</b>	<i>Probetas suelo-cemento sometida a compresión</i> .....	<b>62</b>
<b>Figura 71</b>	<i>Proceso de poner las probetas al horno a 100 °C</i> .....	<b>62</b>
<b>Figura 72</b>	<i>Probetas suelo-cemento sometida a Durabilidad por mojado y secado</i> .....	<b>63</b>
<b>Figura 73</b>	<i>Proceso de Compactación Suelo-Cemento</i> .....	<b>64</b>
<b>Figura 74</b>	<i>Ensayo de penetración CBR Suelo-Cemento</i> .....	<b>64</b>
<b>Figura 75</b>	<i>Muestra de suelo ya ensayada Suelo-Cemento</i> .....	<b>64</b>
<b>Figura 76</b>	<i>Muestra de suelo, ceniza de eucalipto y cemento (Diferentes dosificaciones)</i> .....	<b>65</b>
<b>Figura 77</b>	<i>Proceso de enrasado (Suelo-Ceniza de eucalipto-Cemento)</i> .....	<b>66</b>
<b>Figura 78</b>	<i>Proceso de extracción de la probeta suelo-ceniza de eucalipto-cemento</i> .....	<b>67</b>
<b>Figura 79</b>	<i>Ensayo de compresión simple</i> .....	<b>67</b>
<b>Figura 80</b>	<i>Proceso de inmersión probetas suelo-ceniza de eucalipto-cemento</i> .....	<b>68</b>
<b>Figura 81</b>	<i>Secado de las probetas a 110 °C</i> .....	<b>68</b>
<b>Figura 82</b>	<i>Cepillado de probeta suelo-ceniza de eucalipto-cemento</i> .....	<b>68</b>
<b>Figura 83</b>	<i>Probetas sometidas al ensayo de durabilidad</i> .....	<b>69</b>
<b>Figura 84</b>	<i>Curva granulométrica del suelo natural</i> .....	<b>71</b>
<b>Figura 85</b>	<i>Curva granulométrica por tamizado</i> .....	<b>72</b>
<b>Figura 86</b>	<i>Curva de escurrimiento del suelo natural</i> .....	<b>73</b>
<b>Figura 87</b>	<i>Carta de plasticidad de AASHTO</i> .....	<b>75</b>
<b>Figura 88</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-99 Suelo natural</i> .....	<b>77</b>
<b>Figura 89</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-180</i> .....	<b>78</b>
<b>Figura 90</b>	<i>Clasificación del suelo según la PCA</i> .....	<b>82</b>
<b>Figura 91</b>	<i>Peso específico seco máximo estimado vs %Grava fina más Arena gruesa</i> .....	<b>83</b>
<b>Figura 92</b>	<i>Cantidad de cemento en peso indicado</i> .....	<b>84</b>

<b>Figura 93</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-99 Suelo-Cemento (D-I)</i> .....	<b>85</b>
<b>Figura 94</b>	<i>Cantidad de cemento en peso (Verdadero valor peso específico máximo)</i> .....	<b>86</b>
<b>Figura 95</b>	<i>Resistencia a compresión mínima admisible ensayadas a los 7 días</i> .....	<b>87</b>
<b>Figura 96</b>	<i>Curva de %pérdida en 12 Ciclo Suelo-Cemento (D-I)</i> .....	<b>88</b>
<b>Figura 97</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-180 Suelo-Cemento (D-I)</i> .....	<b>88</b>
<b>Figura 98</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-99 Ceniza de eucalipto-Cemento (D-II)</i> .....	<b>90</b>
<b>Figura 99</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-99 Ceniza de eucalipto-Cemento (D-III)</i> .....	<b>90</b>
<b>Figura 100</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-99 Ceniza de eucalipto-Cemento (D-IV)</i> .....	<b>91</b>
<b>Figura 101</b>	<i>Curva de compactación Proctor T-99 Suelo-Ceniza de eucalipto-Cemento (D-V)</i> .	<b>91</b>
<b>Figura 102</b>	<i>Curvas de compactación</i> .....	<b>92</b>
<b>Figura 103</b>	<i>Análisis de contenido de humedad óptima</i> .....	<b>93</b>
<b>Figura 104</b>	<i>Análisis de densidad seca máxima suelo-ceniza de eucalipto-cemento</i> .....	<b>94</b>
<b>Figura 105</b>	<i>Variación de resistencia a 7 días</i> .....	<b>96</b>
<b>Figura 106</b>	<i>Porcentaje óptimo en base a la resistencia</i> .....	<b>97</b>
<b>Figura 107</b>	<i>Variación Volumétrica en 12 ciclos, para diferentes dosificaciones</i> .....	<b>98</b>
<b>Figura 108</b>	<i>Porcentaje de pérdida en los 12 ciclos, para diferentes dosificaciones</i> .....	<b>99</b>
<b>Figura 109</b>	<i>Porcentajes de pérdida a 12 ciclos</i> .....	<b>100</b>
<b>Figura 110</b>	<i>Porcentaje óptimo en base al porcentaje de pérdida</i> .....	<b>101</b>
<b>Figura 111</b>	<i>Proctor T-99, curva de compactación (Dosificación óptima)</i> .....	<b>103</b>
<b>Figura 112</b>	<i>Curva de compactación con dosificación óptima</i> .....	<b>103</b>
<b>Figura 113</b>	<i>Resistencia a 7 días Dosificación óptima</i> .....	<b>104</b>
<b>Figura 114</b>	<i>Curva de %perdida en los 12 ciclos</i> .....	<b>105</b>
<b>Figura 115</b>	<i>Curva de porcentaje de pérdida en peso (Dosificación óptima)</i> .....	<b>105</b>
<b>Figura 116</b>	<i>Proctor T-180, Curva de compactación (Dosificación óptima)</i> .....	<b>106</b>
<b>Figura 117</b>	<i>Valor de CBR Suelo natural y Dosificación óptima</i> .....	<b>107</b>

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Planilla de Ensayos del suelo natural.....	114
ANEXO A-1.    Contenido de Humedad Natural .....	114
ANEXO A-2.    Análisis granulométrico por tamizado.....	115
ANEXO A-3.    Gravedad específica.....	116
ANEXO A-4.    Análisis granulométrico por método del hidrómetro.....	117
ANEXO A-5.    Límite de Atterberg.....	118
ANEXO A-6.    Sistema de Clasificación de suelos AASHTO.....	119
ANEXO A-7.    Sistema de Clasificación de suelos SUCS .....	120
ANEXO A-8.    Proctor Estándar.....	121
ANEXO A-9.    Proctor Modificado.....	123
ANEXO A-10.   Relación Soporte California CBR.....	125
ANEXO A-11.   Compresión Simple.....	129
ANEXO B. Planilla de Ensayos del suelo-cemento.....	130
ANEXO B-1.    Proctor Estándar D-I.....	130
ANEXO B-2.    Compresión Simple D-I.....	132
ANEXO B-3.    Durabilidad por mojado y secado D-I.....	133
ANEXO B-4.    Proctor Modificado D-I .....	135
ANEXO B-5.    Relación Soporte California CBR D-I.....	137
ANEXO C. Planilla de Ensayos del suelo-ceniza de eucalipto-cemento.....	139
ANEXO C-1.    Proctor Estándar D-II.....	139
ANEXO C-2.    Compresión Simple D-II.....	141
ANEXO C-3.    Durabilidad por mojado y secado D-II .....	142
ANEXO C-4.    Proctor Estándar D-III .....	144
ANEXO C-5.    Compresión Simple D-III .....	146
ANEXO C-6.    Durabilidad por mojado y secado D-III.....	147
ANEXO C-7.    Proctor Estándar D-IV .....	149
ANEXO C-8.    Compresión Simple D-IV .....	151
ANEXO C-9.    Durabilidad por mojado y secado D-V .....	152
ANEXO C-10.   Proctor Estándar D-V.....	154

ANEXO C-11.	Compresión Simple D-V .....	156
ANEXO D.	Planilla de Ensayos del suelo-ceniza de eucalipto-cemento Dosificación óptima	157
ANEXO D-1.	Proctor Modificado .....	157
ANEXO D-2.	Relación Soporte California CBR.....	158
ANEXO D-3.	Proctor Estándar.....	160
ANEXO D-4.	Compresión Simple.....	162
ANEXO D-5.	Durabilidad por mojado y secado .....	163
ANEXO E.	Análisis de costos.....	165

# CAPITULO I

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Justificación General

#### 1.1.1 Problemática

El desarrollo social, económico y global del país se debe en gran parte a las obras civiles, como ser, vías de comunicación, construcción de edificaciones, proyectos hidráulicos, entre otros, teniendo en cuenta que todas las construcciones civiles se apoyan sobre el suelo, y además, se utiliza como elemento de construcción, en consecuencia, es de gran importancia el estudio de suelos, su estabilidad, el comportamiento funcional, entre otros factores, por el desempeño del material utilizado para la ingeniería. Por lo que, realizar los laboratorios de mecánicas de suelos es de gran importancia, ya que, permite obtener las características físicas y mecánicas, permitiendo así gestionar de forma adecuada el uso de suelos durante el diseño y la construcción, así mismo, identificar suelos inestables evitando con ello problemas que pueda afectar la estabilidad de las estructuras.

La infraestructura carretera proporciona una base esencial para el funcionamiento de todas las economías nacionales, por lo que, es imprescindible conservar y realizar adecuadamente obras viales. Estas infraestructuras requieren de una subrasante, subbase y base que cumplan con los requerimientos exigidos, ya que, son fundamentales para el pavimento.

Teniendo el conocimiento de que no todos los suelos son aptos como capas de pavimento, la necesidad de usar estos suelos, implican ejecutar estabilizaciones mediante procesos físicos, químicos o mecánicos, así también, se buscan incorporar nuevos materiales para este propósito. "Las nuevas técnicas de construcción en carreteras y la necesidad de contar con materiales durables y que respondan mejor a mayores sollicitaciones de tráfico, han llevado a buscar nuevas alternativas

en el uso de materiales convencionales empleados en las carreteras. Uno de los avances más significativos lo encontramos en el empleo de la técnica de estabilización de suelos” (Rodríguez et al., 2011). Los materiales más comunes para la estabilización de suelos son el cemento y la cal, los cuales para su realización liberan gases contaminantes.

El eucalipto es un arbusto de gran tamaño, debido a su madera dura esta es muy buena para ser utilizada como material combustible, tanto en ladrilleras artesanales como por la población rural que depende de la leña como principal combustible para su vida cotidiana al cocer alimentos, obteniendo de esta acción la ceniza de eucalipto que es desechada en su mayor parte. Además, tomando en cuenta que los árboles, ramas y hojas, suelen caerse de forma natural, debido a que en gran parte los árboles tanto en zonas rurales y urbanas no tienen un cuidado ni mantenimiento debido y estas se quedan en el medio ambiente como desechos vegetales y madera muerta las cuales no son aprovechadas.

### ***1.1.2 Justificación***

Al realizar proyectos carreteros es común la presencia de suelos que no cumplen con los requerimientos para ser utilizados como subrasante en las estructuras de pavimento, en medida de proseguir con la infraestructura se cambia los suelos o se realiza la estabilización de los mismos. “La estabilización persigue transformar los suelos de la traza que no reúnen las condiciones necesarias para su utilización como capas del paquete estructural... Para conseguirlo hay que recurrir a aditivos que modifiquen las propiedades de los suelos con dos fines principales: aumentar su capacidad portante y reducir su susceptibilidad al agua” (Rodríguez et al., 2011).

Teniendo en cuenta que el eucalipto es utilizado como material de combustible obtiene de ello ceniza, así también, tomando en cuenta que se genera desechos vegetales y madera muerta que no son utilizados, ni aprovechados y sabiendo que las cenizas obtenidas de la combustión de

madera tienen muy buen contenido de sílice y óxido de calcio, hablando específicamente del eucalipto y las referencias que existen de la composición química, se observa que tiene características similares a la del cemento, lo que es muy bueno para la estabilización de suelos.

Es evidente la necesidad de realizar investigaciones para la estabilización de suelos arenosos o arena limosos para su mejor aprovechamiento, proponiendo entonces la ceniza de eucalipto junto con cemento para este propósito, obteniendo el óptimo porcentaje de adición, que permita su estabilización para uso como capa de pavimento flexible, a su vez, promoviendo reciclar las cenizas y utilizar la madera muerta del eucalipto, implementando así la ceniza de eucalipto como un material inorgánico estabilizador de suelos que no cumplan con las características requeridas.

## **1.2 Fines**

En vista a la importancia que representa estabilizar suelos, se tiene como fin buscar el máximo aprovechamiento de suelos, por ello, se realizará la estabilización de un suelo arena limoso mediante la adición de ceniza de eucalipto y cemento en porcentajes diferentes, determinando así la proporción óptima que permita aumentar la capacidad portante del suelo, realizando los respectivos ensayos para cumplir con el objetivo del proyecto.

Se espera que el estudio realizado en este trabajo sea una buena alternativa de estabilización química de suelos, visto desde lo económico, físico y sobre todo cumpliendo requerimientos y normativas para uso en proyectos carreteros, debido a que, se presume que esta ceniza tenga características similares a la del cemento.

Así también, se busca aportar a la investigación en el área de estabilización química de suelos, permitiendo analizar y comparar los resultados con la información de los diferentes

artículos científicos e investigaciones realizadas con distintas alternativas para lograr mejorar las características del suelo.

### 1.3 Estado de arte

Las obras civiles como ser pavimentos, cimentaciones, terraplenes, estructuras, entre otros, se encuentran sobre el suelo de una u otra forma, y muchas de ellas, además, se utilizan como elementos de construcción, por lo que, tiene gran importancia la mecánica de suelos, su estabilidad, comportamiento funcional, entre otros factores, por el desempeño del material utilizado para la ingeniería. Las cenizas de combustión de madera presentan buenos componentes químicos que permiten una buena estabilización de suelos. “La ceniza de tronco de eucalipto “Eucalyptus Globulus” son desechados de manera improductiva, desperdiciando sus propiedades y desconociendo los múltiples usos, los cuales nos llevaron a analizar una considerable cantidad de alternativas en posibles soluciones sobre cómo aprovechar la materia prima” (Pérez, 2017, p. 4).

Las investigaciones más relevantes a citarse son los siguientes:

- Jiménez, I. (2016). Aplicación integral en construcción de materiales eco-eficientes con incorporación de cenizas de biomasa. España-Madrid.
- Pérez, Y. (2017). Resistencia del concreto  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> sustituyendo al cemento en 4% y 8% por la ceniza de tronco de Eucalipto. Chimbote-Perú
- Cristóbal, F. (2022). Estabilización de subrasante con cenizas de eucalipto, paraje turístico Piedra Parada, Concepción, Junín 2021. Huancayo-Perú.
- Soto, K. (2023). Estabilización de suelos a nivel de subrasante con ceniza de eucalipto de la carretera Batanchaca-Yarusyaycan, Pasco, 2022. Perú.
-

## **1.4 Objetivos del estudio**

### **1.4.1 Objetivo General**

Estabilizar un suelo areno limoso con la adición de ceniza de eucalipto y cemento para que este posteriormente pueda ser utilizado como capa subrasante.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo en su estado natural, de acuerdo a los respectivos procedimientos de laboratorio.
- Determinar la composición de elementos químicos de la ceniza de eucalipto.
- Determinar el porcentaje de cemento óptimo para la estabilización del suelo de estudio.
- Desarrollar el análisis comparativo de las propiedades del suelo areno limoso en su estado natural y del suelo con diferentes porcentajes de adición de ceniza de eucalipto y cemento que se utilizarán para la estabilización del suelo.
- Determinar la dosificación óptima de ceniza de eucalipto y cemento necesaria para estabilizar el suelo.

## **1.5 Alcance del proyecto**

El presente proyecto de grado se enfoca en hallar el óptimo porcentaje de ceniza de eucalipto y cemento para la estabilización de suelo areno limoso. Para ello se realizará lo siguiente:

- Extraer la toma de muestra de un suelo areno limoso necesario para realizar el proyecto, de acuerdo a las recomendaciones establecidas por la norma AASHTO, a una profundidad de excavación donde se encuentra el suelo, colocándolo en bolsas negras para tener muestras sin alteraciones.
- Desarrollar los laboratorios correspondientes para la caracterización física y mecánica del suelo en su estado natural, necesario en el estudio de estabilización.

- Cuidar el medio ambiente, reduciendo los desechos de troncos y ramas de eucalipto, para su posterior calcinación y obtención de ceniza de eucalipto. Para después determinar la composición de elementos químicos mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X, que se realizará a una muestra representativa de la ceniza de eucalipto.
- Para hallar el porcentaje óptimo de cemento, se seguirá los procedimientos de Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento, Normas de Dosificación de la Portland Cement Association (PCA), para después sustituir el cemento con la ceniza de eucalipto en porcentajes de 25%, 50%, 75% y 100% respecto a este, buscando el porcentaje óptimo de estabilización de suelo con adición de ceniza de eucalipto y cemento.
- Desarrollar los laboratorios de Compactación, CBR, Compresión simple y Durabilidad por mojado y secado en el suelo natural y suelo con adición de diferentes porcentajes de ceniza de eucalipto y cemento.
- Analizar las propiedades del suelo natural y de las combinaciones al añadir ceniza de eucalipto y cemento, con ello, obtener el porcentaje óptimo para la mejora de las características del suelo areno limoso.
- Realizar los ensayos de Compresión simple y Durabilidad por mojado y secado para la dosificación óptima con la adición de ceniza de eucalipto y cemento.
- Realizar un análisis comparativo de precios unitarios de la estabilización de suelos cemento y con la adición de ceniza de eucalipto y cemento.

A continuación, se muestra una tabla de los ensayos que se realizarán para la elaboración de presente proyecto de grado.

**Tabla 1***Laboratorios a realizar en la fase experimental*

<b>FASE EXPERIMENTAL</b>		
<b>Determinación de composición química de la ceniza de eucalipto</b>		
Fluorescencia de rayos X		Se realizará el ensayo a una muestra representativa
	<b>N° Ensayo</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Caracterización física y mecánica del suelo natural</b>		
Análisis	Por tamizado (AASHTO T88)	1
Granulométrico	Método del hidrómetro (ASTM D421-58)	1
Límite de	Límite líquido (AASHTO T 89)	1
Atterberg	Límite plástico (AASHTO T90-70)	1
Clasificación de suelo método AASHTO		1
Gravedad específica (AASHTO T100-70)		2
Compactación Proctor estandar (AASHTO T-199)		2
Compactación Proctor modificado (AASHTO T-180-90)		2
Relación Soporte California CBR (AASHTO T193)		2
Compresión simple		1
		El análisis se realiza en 3 muestras
<b>Estabilización de suelo-cemento</b>		
Compactación suelo-cemento		2
Compresión de probetas suelo-cemento		1
Durabilidad por mojado y secado		1
		Se realizará para una dosificación de suelo-cemento, siguiendo el metodo de Dosificación de Mezclas de Suelo-
<b>Estabilización de suelo-cemento-ceniza</b>		
Compactación		1
Relación Soporte California CBR (AASHTO T193)		1
Compresión simple		1
Durabilidad por mojado y secado		1
		4 Dosificaciones (Se reemplazará el cemento por la ceniza de eucalipto en proporciones de 25%, 50%, 75% y 100%) Se realizará para la dosificación óptima

*Nota:* Fuente propia.

## **CAPITULO II**

### **2. MARCO TEORICO**

#### **2.1 Mecánica de suelos**

La mecánica de suelos “es una rama de la mecánica, que se ocupa de la acción de las fuerzas sobre el suelo y del flujo de agua en el suelo. El alcance de la mecánica de suelos se limita al estudio del suelo, su comportamiento y su aplicación como material de ingeniería” (Terzaghi, 1925).

Mecánica de suelos es una disciplina de la ingeniería que estudia las propiedades físicas y el comportamiento de los suelos con el objeto de su uso en construcciones de ingeniería civil, de manera que las deformaciones y resistencia de este garantice seguridad, durabilidad y estabilidad a las estructuras. Así mismo, es la ciencia que estudia el comportamiento del agua sobre, debajo y en su interior, para determinar la viabilidad de su uso. Su aplicación es de gran importancia en obras carreteras, ya que, permite determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo, para el diseño estructural, el uso del material, entre otros.

#### **2.2 Suelo**

En ingeniería civil, “los suelos son los sedimentos no confinados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad como fuerza direccional y que pueden tener materia orgánica” (Pacosillo Ticona, 2019, p. 7).

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento.

## 2.3 Clasificación de suelos

Un sistema de clasificación de suelos proporciona un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada; consiste en categorizar y agrupar a los suelos junto con otros que posean características semejantes en cuanto a propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas similares (Angelone & Zapata, 2018, p. 3).

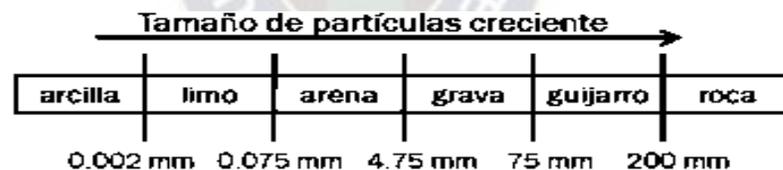
Los suelos se clasifican conforme a distintos criterios siendo estos; geológico, químico, según su estructura, por el tamaño de partículas, entre otros, permitiendo estudiar los mismo, en toda su extensión y composición.

### 2.3.1 Clasificación de suelos por el tamaño de partículas

Según la clasificación por el tamaño de las partículas podemos diferenciar los siguientes tipos de suelos:

**Figura 1**

*Clasificación de suelos por el tamaño de las partículas*



*Nota.* Tomado de *Mecánica de suelos* (p. 14), por Pacosillo, 2019.

#### 2.3.1.1 Suelo areno limoso

Los suelos arenosos están compuestos por partículas de diámetro 4.75mm a 0.075mm y estas partículas son de carácter silíceo, se saturan rápidamente y no son cohesivos.

“Los limos son sedimentos clásticos transportados en suspensión por los ríos o el viento, o bien resultantes de procesos de glaciación. Son suelos no cohesivos cuyas partículas de forma redondeada y el diámetro de las mismas varía entre 0,060mm y 0,002mm. Al no tener cohesión, es un terreno problemático para edificar sobre él, por lo que deben adoptarse sistemas especiales

de cimentación” (Angelone & Zapata, 2018, p. 20). Estos suelos son pegajosos, fáciles de moldear, de un color marrón oscuro, son muy compactos, tienen una muy baja filtración de agua. Estos suelos son producidos por la sedimentación de materiales finos arrastrados por las aguas o depositados por el viento, suelen estar presentes en los lechos de los ríos.

El suelo areno limoso está compuesto por arenas y un porcentaje de finos, siendo el material fino los limos, estos suelos son no cohesivos por la poca o nula plasticidad que tienen, además presentan propiedades intermedias entre los suelos arenosos y los suelos limosos, se caracterizan por tener una textura intermedia de modo que al estrujar un poco de suelo húmedo entre los dedos se nota como se enrolla al secarse, dejando la piel limpia.

### **2.3.2 Clasificación AASTHO**

El sistema de clasificación de suelos de la “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASTHO) es el más utilizado actualmente para la construcción de vías, en especial para manejo de subrasantes y terraplenes. Se basa en las prestaciones de suelos utilizados en la práctica para construir carreteras (Pacosillo Ticona, 2019, p. 41). Los dos parámetros determinantes para clasificar el suelo son la plasticidad y la granulometría, esta clasificación tiene un índice de grupo que permite determinar la calidad relativa del suelo, esta clasificación divide el suelo en 7 grupos los cuales son:

A-1: Fragmentos de roca, grava y arena

A-2: Grava y arena limosas o arenosas

A-3: Arena fina

A-4 y A-5: Suelo limosos

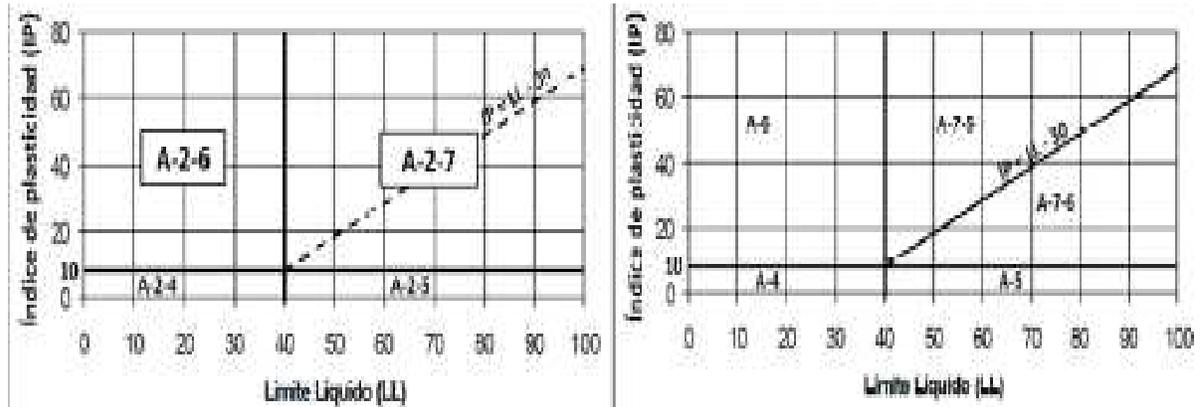
A-6 y A-7: Suelos arcillosos

A-8: Suelos orgánicos

Para subclasificar los grupos A-2 y A-7 se utiliza la Carta de Plasticidad de la AASHTO que se muestra a continuación.

**Figura 2**

*Carta de Plasticidad de la AASHTO (Divide grupo A-2 y A-7)*



*Nota:* Tomado de *Mecánica de suelos* (p. 41), por Pacosillo, 2019.

### 2.3.3 Clasificación Unificada de suelos S.U.C.S.

El sistema unificado de clasificación de suelos divide en dos amplias categorías:

#### 2.3.3.1 Suelo Grueso

Un suelo es considerado grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas (se retiene en el tamiz N°200), se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz N°4 (Pacosillo Ticona, 2019, p. 38). Estos suelos tienen como prefijo la letra G para grava o suelo gravoso y S para arena o suelo arenoso y están constituidos de partículas con textura granular, compuestos de fragmentos de roca y mineral, también, contiene material fino en menor cantidad, las partículas tienen forma angular y redondeada, son suelos no cohesivos que tienen mucha permeabilidad, además, que su asentamiento es instantáneo.

Los suelos de grano grueso se reconocen principalmente en función del tamaño de las partículas, la grava tiene partículas de diámetros mayores a 2 mm, mientras que la arena tiene diámetro de partícula entre 2mm y 0,075mm.

### **Figura 3**

*Suelos gruesos (grava y arena)*



*Nota.* Recuperado de la página web (<https://www.freepik.es/>)

#### **2.3.3.2 Suelos finos**

Los suelos finos se dividen en limos y arcilla y las mezclas de esto, un suelo es considerado fino si más del 50% de sus partículas son finas, pasan el tamiz N°200 (Pacosillo Ticona, 2019, p. 37). Por el tamaño fino de las partículas no se pueden observar a simple vista, su forma puede ser laminar, angular o redondeada, los suelos finos no son cohesivos además que su asentamiento es lento. “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” (Das, p. 39). Así también, se utilizan los siguientes prefijos 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)

#### **2.4 Eucalipto**

El eucalipto (*Eucalyptus globulus*) es una de las especies forestales más difundidas por la región occidental de nuestro país, debido a que se lo cultiva por su rápido crecimiento, su tamaño

y su madera (Ticona Cocarico, 2012, p. 1). En la actualidad, en Bolivia se cuenta con aproximadamente 20,000 ha. reforestadas de eucalipto, de las cuales en el departamento de Cochabamba se encuentra el 54%, en Chuquisaca 37%, y en los demás departamentos del país en porcentajes menores.

Los eucaliptos (*Eucalyptus globulus*) pertenecen a la familia botánica mirtáceas “En condiciones naturales es un árbol de gran tamaño, alcanza alturas de 45 a 60 m y en sitios óptimos de hasta 75 m. Su fuste es recto hasta unos dos tercios de la altura total y presenta una copa bien desarrollada. La corteza es rugosa y persistente en la parte baja del tronco y en la parte alta se desprende en largas tiras que dejan una superficie lisa color gris-azulado (Ticona Cocarico, 2012, p. 5), sus hojas son variables de longitudes de hasta 30cm , estrechas y curvadas en forma de hoz, teniendo un color verde con una cierta dureza, las flores que presenta el eucalipto son hermafroditas, no tiene pétalos, suelen estar solas o en grupos de tres; el fruto mide aproximadamente 10 a 15 mm de diámetro son cápsulas duras de aspecto leñoso, verde grisáceos, con 3 a 5 orificios triangulares por donde salen las semillas.

“La mayoría de las especies del género *Eucalyptus* son muy versátiles pudiendo utilizarse para destinos y usos diversos tales como: madera aserrada, laminada, flaqueada y aglomerada; pulpa y papel; postes cortos y largos; leña y carbón; miel; tanino; sombra y abrigo, y en sistemas agroforestales. La madera es dura, por lo que es utilizada para leña y en la fabricación de carbón vegetal” (Ticona Cocarico, 2012, p. 25). Estos árboles también son utilizados como material de combustión tanto para la fabricación de ladrillos en hornos artesanales, como para la leña con la que cocinan sus alimentos, por sus características los eucaliptos son considerados arboles ornamentales.

## Figura 4

### *Eucalipto (Eucalyptus Globulus)*



Nota. Fotografías obtenidas por fuente propias, arbustos de eucalipto en La Paz-Bolivia.

#### 2.4.1 Ceniza de eucalipto

La ceniza de eucalipto, es aquel resto inorgánico que se forma después del proceso de calcinación de madera del arbusto de eucalipto; los componentes químicos más comunes que contiene son los óxidos de calcio, potasio, aluminio, hierro, magnesio y tiene un porcentaje alto de sílice. Según Pérez (2017), idealmente se debe calcinar la madera de eucalipto a una temperatura de 400°C por un lapso de dos horas, además, nos dice que el porcentaje de reducción al culminar la calcinación es de 63.78 %.

Este autor, obtuvo la detección de los componentes químicos de la ceniza de eucalipto a través del ensayo de Espectrometría de fluorescencia, dando como resultado los componentes presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Composición química de ceniza de eucalipto*

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADO (%)	METODO UTILIZADO
OXIDO DE CALCIO	64.66%	
DIOXIDO DE SILICIO	15.92%	
TRIOXIDO DE AZUFRE	9.98%	
OXIDO DE MAGNESIO	5.35%	
OXIDO DE MANGANESO	1.78%	
TRIOXIDO DE ALUMINIO	1.31%	ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSA (EDS)
TRIOXIDO DE HIERRO	0.62%	
OXIDO DE BARIO	0.34%	
PENTOXIDO DE FOSFORO	0.19%	
OXIDO DE ZINC	0.02%	
OXIDO DE COBRE	0.02%	
TRIOXIDO DE CROMO	0.01%	

Nota: Tomado de Resistencia del concreto  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  sustituyendo al cemento en 4% y 8% por la ceniza de tronco de Eucalipto (p. 38), por Pérez, 2017.

Además, este autor sostiene que esta ceniza de eucalipto es un material cementante, debido a que, comparó la composición química del cemento tipo I con la ceniza de eucalipto, esta comparación de componentes químicos se muestra en la siguiente tabla, en la que se observa la semejanza que poseen estos componentes.

**Tabla 3**

*Composición química de ceniza de eucalipto y cemento tipo I*

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS %	
	CENIZA DE EUCALIPTO	CEMENTO TIPO I
Oxido de Calcio	64.66%	62.30%
Dióxido de Silicio	15.92%	24.70%
Trióxido de Aluminio	1.31%	5.52%
Oxido de Magnesio	5.35%	3.10%
Trióxido de Hierro	0.62%	3.41%

*Nota:* Los datos son tomados de *Resistencia del concreto  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> sustituyendo al cemento en 4% y 8% por la ceniza de tronco de Eucalipto* Pérez, 2017.

**Figura 5**

*Ceniza de eucalipto*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

## 2.5 Ensayo para determinar la composición química de ceniza

Uno de los ensayos que permite hallar la composición química de diversos materiales es: La fluorescencia de rayos X, Dirigido a la determinación y composición mineralógica de una muestra natural o de las fases cristalinas sólidas en materiales inorgánicos artificiales, es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos.

“Es una técnica analítica versátil que encuentra usos en un amplio espectro de industrias y campos científicos. Su adaptabilidad y precisión la han convertido en una herramienta indispensable para comprender y manipular la composición elemental de los materiales” (Malvern Panalytical, 2024).

## 2.6 Cemento

Los cementos son materiales de naturaleza inorgánica o mineral que al mezclarse con agua forman pastas que fraguan y endurecen en un lapso de tiempo. Se presenta en forma de un polvo muy fino, de color gris a gris verdoso. El cemento Portland por definición es un material aglutinante que al combinarse con el agua fragua y endurece adhiriéndose firmemente a otros materiales, como la roca y el acero, tanto bajo el agua como al aire.

Las propiedades que presenta el cemento Portland con Puzolana IP-40 son las siguientes:

- Alta Resistencia mecánica y mayor rendimiento.
- Menor fisuración.
- Mayor trabajabilidad y plasticidad en morteros y hormigones.
- Moderado calor de hidratación.
- Mayor impermeabilidad.
- Baja reacción álcali/agregado

**Figura 6**  
*Cemento Viacha IP-40*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Al momento de estabilizar el suelo con cemento, se tienen efectos inmediatos y efectos a largo plazo “la incorporación de cemento en cantidad suficiente a un suelo permite obtener

un material con una resistencia mecánica. La dotación mínima de conglomerante depende del tipo de suelo, siendo los más adecuados los de tipo granular con finos poco plásticos” (Jofré et al., 2008).

## **2.7 Estabilización de suelos**

La estabilización de suelos es el proceso al que se ven sometidos los suelos naturales para mejorar sus cualidades: aumentar su resistencia, reducir su plasticidad, facilitar los trabajos de construcción o aumentar su estabilidad reduciendo problemas en estructuras y pavimentos.

## **2.8 Tipos de estabilización**

### **2.8.1 Estabilización física**

Consiste en estabilizar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo, para aportarle características estructurales nuevas. Existen métodos siendo uno de este el siguiente:

Mezclas de Suelos, este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por sí sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre por lo menos la compactación como complemento. Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que le permite soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como capa de asiento del paquete estructural de una carretera ya que, al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino. Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad (Rodríguez et al., 2011).

### **2.8.2 Estabilización mecánica**

La estabilización mecánica es “mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de un suelo, mediante procedimientos mecánicos” (Pérez Droguet et al., 2011). Esta estabilización nos

permite lograr mejorar las propiedades de suelo sin alteración química de importancia, entre estas, podemos mencionar la compactación que se realiza principalmente en capa subbase, base y en carpetas asfálticas.

### **2.8.3 Estabilización química**

La estabilización química:

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son: cal (disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es una opción económica) y cemento (aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas). Tras un estudio geotécnico de todos los tipos de suelos que se vayan a emplear, se debe decidir qué conglomerante es el más adecuado. No sirve cualquier conglomerante para cualquier tipo de suelo. En general, puede afirmarse que los suelos plásticos, arcillosos, reaccionan bien con la cal. Y los suelos granulares, no plásticos, reaccionan bien con el cemento (Rodríguez et al., 2011).

A importancia de buscar alternativas al uso de cemento en aplicaciones geotécnicas, para poder reducir el impacto ambiental y costos se investigan otras alternativas.

### **2.8.4 Estabilización con cemento**

La incorporación de cemento mejora el suelo permitiendo aumentar la resistencia mecánica, la cantidad de adición de cemento depende del tipo de suelo.

La principal diferencia entre los suelos estabilizados con cemento para explanadas y los utilizados en capas radica en el contenido más elevado de cemento de los segundos, lo que traduce en una superior resistencia mecánica y en una mayor homogeneidad (Jofré et al., 2008).

En efecto, al fraguar e hidratarse los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros, une las partículas del suelo, reduce su sensibilidad al agua, disminuye la deformación del suelo estabilizado y proporciona cierta resistencia a tracción según la dosificación empleada. Se pueden estabilizar tanto los suelos granulares como los de grano fino, excepto si son muy plásticos o presentan mucha humedad. En este último caso, se podrían tratar previamente con cal. No se podrán utilizar suelos con material vegetal u orgánica, o cualquier otra sustancia que perjudiquen el fraguado del cemento.

### **Figura 7**

*Estabilización química de suelo con cemento*



*Nota.* Recuperado de la página web (<https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/01/23/la-estabilizacion-de-suelos>)

#### **2.8.4.1 Metodología de dosificación**

La metodología para obtener el porcentaje óptimo de cemento que se requiere para estabilizar un suelo es la Norma de Dosificación General y la Norma de Dosificación Simplificada de la Portland Cement Association (PCA).

La Norma General de dosificación de suelo cemento, nos indica que se debe realizar el laboratorio de durabilidad, el cual tiene una duración de más de un mes, lo que representa una

desventaja al momento de ejecutarla, por tanto, se plateó la Norma Simplificada de dosificación de suelo cemento que permite hallar el porcentaje óptimo de cemento en menor tiempo.

El fundamento de este método, comprobado por los ensayos realizados, es la constatación de que un suelo arenoso, con determinada granulometría y peso específico seco máximo aparente, requerirá, de acuerdo con el criterio de pérdida de peso en el ensayo de durabilidad, la misma cantidad de cemento para este indicado, desde que alcance resistencia a compresión, a los 7 días, superior a un cierto valor mínimo establecido estadísticamente en la serie de ensayos de comparación realizada. El procedimiento de ahí resultante fue materializado en ábacos de fácil y directa utilización.

El uso del método se restringe a suelos que contengan un máximo de 50 % de partículas con diámetro equivalente inferior a 0,05 mm (limo y arcilla) y un máximo de 20 % de partículas con diámetro equivalente inferior a 0,005 mm (arcilla).

La Norma Simplificada de Dosificación se divide en dos métodos distintos: Método A, usando material que pasa el tamiz de 4,8 mm este método será usado cuando toda la muestra original de suelo pase por el tamiz de 4,8 mm; Método B, usando material que pasa el tamiz de 19 mm este método será usado cuando parte de la muestra original del suelo sea retenido en el tamiz de 4,8 mm (Rocha, 2002, p. 20).

El procedimiento a seguir para realizar la dosificación de suelo cemento es el siguiente: realizar los ensayos preliminares del suelo; realizar el ensayo de compactación, con un porcentaje de cemento que se debe hallar con las gráficas respectivas al método a emplearse utilizando las características del suelo, hallando el peso específico seco máximo aparente y con este valor entrando a las gráficas para así hallar el porcentaje óptimo de cemento; realizar el ensayo de resistencia a compresión simple a los 7 días y comparar la resistencia media a la compresión simple

obtenida en las probetas de ensayo y la resistencia a compresión simple mínima admisible para el suelo de estudio.

Para determinar las características del suelo se toma en cuenta fracciones de dosificación de suelo cemento que son clasificadas según su propia escala, como indica Rocha (2002):

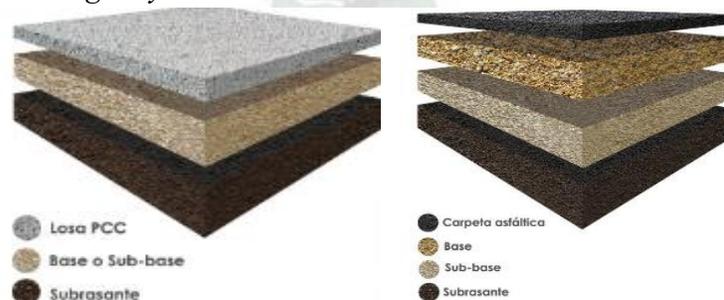
- **Grava gruesa**, partículas con diámetro de 4,8 mm a 76 mm;
- **Grava fina**, partículas con diámetro de 2,0 mm a 4,8 mm;
- **Arena gruesa**, partículas con diámetro de 0,42 mm a 2,0 mm;
- **Arena fina**, partículas con diámetro de 0,05 mm a 0,42 mm;
- **Limo**, partículas con diámetro equivalente de 0,005 mm a 0,05 mm;
- **Arcilla**, partículas con diámetro equivalente inferior a 0,005 mm (p. 28).

## 2.9 Estructura de pavimento

Los pavimentos están formados por capas de resistencia decreciente con la profundidad, se componen de: carpeta de rodamiento (que puede ser asfáltica o de hormigón), base y subbase apoyado todo este conjunto sobre la subrasante.

**Figura 8**

*Capa de pavimento Rígido y Flexible*



*Nota.* Tomado de <https://x.com/lgloria27/status/1081985022947667968>

### 2.9.1 Subrasante

Es la superficie de suelo terminada de la carretera luego de realizar el movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento. “El soporte proporcionado

por la subrasante al pavimento de suelo cemento es uno de los elementos más importantes en el procedimiento de diseño” (Rodríguez et al., 2011). “Es el plano superior del movimiento de tierras, que se ajusta a requerimientos específicos de geometría y que ha sido conformada para resistir los efectos del medio ambiente y las sollicitaciones que genera el tránsito. Sobre la subrasante se construye el pavimento y las bermas” (Pérez Droguet et al., 2011).

La capa subrasante permite transmitir y distribuir las cargas, resiste las cargas que soporta el pavimento, evita que el terraplén contamine al pavimento, facilita el drenaje, entre otros. La calidad de los suelos utilizados como capas subrasantes se puede relacionar, mediante parámetros como; el módulo de resiliencia, módulo de Poisson y valor de CBR.

**Figura 9**

*Porcentaje de CBR para la Subrasante*

<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>Soporte de la subrasante</b>	<b>Rango del CBR (%)</b>
Suelos de granulometría fina donde el tamaño de partículas de limo y arcilla predomina.	Bajo	3 a 6
Arenas pobremente graduadas y suelos predominantemente arenosos con cantidades moderadas de limo y arcilla.	Medio	7 a 10
Suelos granulares, arenas bien graduadas, y mezclas de grava-arena relativamente libre de finos plásticos	Alto	Más de 10

*Nota.* Tomado de *Manual de diseño de conservación vial* (p. 297), por Rodrigo et al., 2011.

### **2.9.2 Subbase**

La función principal de la subbase es de servir de capa de drenaje, así también, proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad, transmitir y distribuir las cargas a las terracerías. El material a emplearse para la capa subbase debe ser granular y la cantidad de material fino que pasa el tamiz No 200 no deberá ser mayor al 8%, además permite proteger a la base aislándola de la terracería, ya que, si el material de la terracería se introduce en la base, puede

sufrir cambios volumétricos generados al cambiarlas condiciones de humedad dando como resultado una disminución en la resistencia de la base. “En cuanto a las propiedades mecánicas, el material deberá tener un soporte CBR mayor o igual a 40%” (Pérez Droguet et al., 2011)

### **2.9.3 Base**

Es la capa de material que se construye sobre la subbase, los materiales con los que se construye deben ser de mejor calidad que los de la subbase y su función es la de tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos. Dependiendo de los esfuerzos que se esperan, la carretera se compone de varias capas para soportar diversas condiciones climáticas y permanecer útiles por muchas décadas.

Según el manual de especificaciones técnicas generales de construcción de la ABC no indica: El Índice Soporte de California (CBR) no deberá ser inferior a 90% para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5%.

**Base tratada con cemento**, es la mezcla constituida por suelo y cemento, el cual tiene mejor capacidad portante que simplemente el suelo, los criterios de estabilización son por durabilidad o durabilidad y resistencia. Deben de cumplir con el requerimiento máximo de porcentaje de pérdida en peso y la mínima resistencia a 7 días (varía en función al tipo de suelo).

### **2.10 Ensayos de caracterización de suelos**

Son ensayos de laboratorio que se realizan en el suelo para evaluar sus características físicas y mecánicas del mismo.

#### **2.10.1 Contenido de humedad natural (ASTM D2216-98)**

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno, su medición exacta se realiza con ensayos de laboratorio, pesando una muestra de suelo antes y después del secado.

La determinación de contenido de humedad es un ensayo rutinario de laboratorio para determinar la cantidad de agua presente en un determinado suelo, cuyo resultado es muy importante, especialmente en suelos cohesivos debido a que este parámetro da una idea del estado húmedo del suelo natural, para prever algunos cambios en las propiedades de los suelos cohesivos (Bermejo & Pacosillo, 2007). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\%h = \frac{P_w}{P_s} * 100$$

Siendo: %h Humedad en porcentaje, Pw Peso de agua y Ps Peso de suelo.

### 2.10.2 Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T27-82)

El análisis granulométrico proporciona información valiosa sobre la distribución de tamaños de partículas y sus propiedades mecánicas. Este ensayo permite determinar la distribución por tamaño de las partículas mayores a 0.075mm, mediante el ensayo de laboratorio, con tamices de diferentes tamaños de partículas que separan el suelo. Siendo los tamices un elemento con un marco metálico y una malla, con separaciones entre los alambres de diferentes tamaños.

**Figura 10**

*Tamaño de Tamices de laboratorio*

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	(3")
63	(2 1/2")
50	(2")
37,5	(1 1/2")
25	(1")
19	(3/4")
9,5	(3/8")
4,75	(Nº 4)
2	(Nº 10)
0,425	(Nº 40)
0,075	(Nº 200)

*Nota.* Tomado de *Manual de ensayos de suelos y materiales ABC* por Pérez Droguet et al., 2011.

**Figura 11**

*Serie gruesa de Tamices*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Una vez realizado el ensayo, se gráfica de la distribución granulométrica con porcentajes acumulado que pasa como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas de esta curva se obtiene los siguientes parámetros granulométricos:

- **Coefficiente de uniformidad.** Corresponde a la abertura del tamiz correspondiente a 60 % que pasa sobre la abertura del tamiz correspondiente a 10 %.
- **Coefficiente de curvatura.** Corresponde a la abertura del tamiz correspondiente a 30 % al cuadrado que pasa sobre la abertura del tamiz correspondiente a 10 % que pasa multiplicado por la abertura del tamiz correspondiente a 60 %

### 2.10.3 Gravedad específica (AASHTO T100-70)

Este ensayo tiene por objeto determinar la gravedad específica de los sólidos de una muestra de suelo cuyas partículas tienen un tamaño menor 4.75mm, por medio de una serie de mediciones y procedimientos normalizados de la norma AASHTO T100-70 (Pacosillo Ticona, 2019, p. 23). El peso específico o gravedad específica es la relación entre el peso unitario de una sustancia y su volumen. “El valor de gravedad específica es un parámetro básico para calcular la relación de vacíos de un suelo, se utiliza también en el análisis hidrométrico y es útil para predecir el peso unitario del suelo” (Pacosillo Ticona, 2019, p. 23).

**Figura 12**

*Valores de gravedad específica para algunos tipos de suelo*

Tipo de suelo		Gravedad específica (Gs)
Inorgánico	Grava	2,65
	Arena gruesa a media	2,65
	Arena fina (limosa)	2,65
	Polvo de piedra, limo arenoso	2,67
Inorgánico	Arena algo arenosa	2,65
	Limo Arenoso	2,66
	Limo	2,67 – 2,70
	Arena Arcillosa	2,67
	Limo arcillo arenoso	2,67
	Arcillas arenosa	2,70
	Arcilla limosa	2,75
	Arcilla	2,72 – 2,80

*Nota:* Tomado del libro *Experimental Soil Mechanics* por Bardet, 1997.

**Figura 13**

*Materiales para el ensayo (Picnómetro, agua destilada, termómetro y pipeta)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

#### **2.10.4 Análisis granulométrico por método del hidrómetro (AASHTO T88-93)**

Este ensayo es fundamental para estimar la distribución de tamaños de partículas más finas (0.075mm) que pasan por el tamiz N°200, con el cual se determina la proporción de arcillas en una muestra de suelo. “El análisis del hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrico de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz N°200 (0.075 mm) hasta alrededor de 0.001 mm” (Bermejo & Pacosillo, 2007, p. 33).

**Figura 14**

*Materiales y equipos para el ensayo*



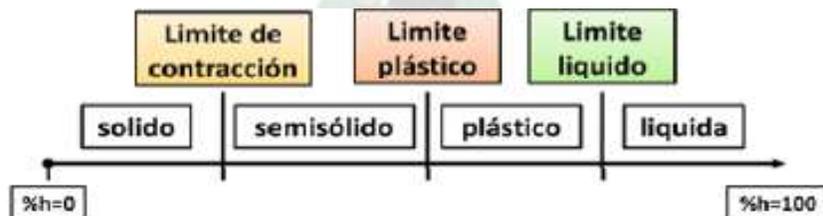
*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### 2.10.5 Límite de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia “son límites para los cuales los suelos pasan de un estado de consistencia a otro, se miden en porcentaje de humedad” (Pacosillo Ticona, 2019, p. 32). Este parámetro permite clasificar suelos finos además de analizar los resultados obtenidos para concluir las características del suelo estudiado. Los límites líquido y plástico han sido ampliamente utilizados en todas las regiones del mundo, principalmente con objetivos de identificación y clasificación de suelos. El límite de contracción se usa en varias áreas geográficas donde el suelo sufre grandes cambios de volumen entre su estado seco y su estado húmedo.

**Índice Plástico.** El índice de plasticidad se define como la diferencia numérica entre el límite de líquido y el límite de plástico de un suelo. Tanto el límite líquido como el límite plástico son números enteros. Si el límite líquido o el límite plástico no pueden ser determinados, o si este último es igual o mayor que el primero, el suelo se reporta como no plástico. En general, el índice de plasticidad depende sólo de la cantidad de arcilla existente e indica la finura del suelo y su capacidad para cambiar de configuración sin alterar su volumen.

**Figura 15**  
*Límite de consistencia*



*Nota.* Gráfica de límites de consistencia, tomado de *Mecánica de Suelos* (p. 32), por Pacosillo Ticona, 2019.

#### 2.10.5.1 Límite líquido (AASHTO T 89-81)

El límite líquido es el porcentaje de humedad cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse.

Para determinar este límite se utiliza la cuchara de Casagrande, usando la porción del material que pasa por la malla N°40, se debe humedecer el suelo añadiendo agua, teniendo mucho cuidado de que no queden vacíos o burbujas de aire, luego se coloca la muestra en la cuchara, obteniendo 1 cm de una abertura realizado con una pequeña herramienta especial denominada ranurador, al proporcionar un determinado número de golpes sobre la base del aparato.

**Figura 16**  
*Cuchara de Casagrande*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

#### **2.10.5.2 Límite plástico (AASHTO T90-70)**

El límite plástico es el porcentaje de humedad cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe. “La plasticidad es la capacidad del suelo de deformarse sin romperse y la humedad que representa la frontera para pasar del estado líquido al estado plástico” (Pacosillo Ticona, 2019, p. 32).

“El límite plástico se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se resquebraja, cuando se enrolla a un diámetro de 3 mm o aproximadamente 3 mm. Esta prueba es bastante subjetiva ya que depende del operador” (Bermejo & Pacosillo, 2007, p. 49). Es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, del suelo se elaboran rollitos de material para que este llegue al límite plástico. Se dice que el material está en el límite plástico cuando los rollitos empiezan a agrietarse, lo cual queda a juicio

del laboratorista, por lo que tiene una amplia variabilidad que influye en la obtención del índice plástico, en caso de que no se pueda realizar los rollitos con el material se dice que el suelo es no plástico.

### **2.10.6 Compactación**

La compactación es una prueba de laboratorio que consiste en compactar suelo por impacto variando el contenido de humedad, compactado en un molde, un pisón y a una caída libre normalizada, teniendo una energía específica de compactación dependiendo del método de compactación utilizando.

Con este ensayo se puede trazar la Curva de Compactación, que a su vez permite encontrar la Densidad Seca Máxima y la Humedad Óptima del suelo, este método desarrollado por Proctor es utilizado actualmente para realizar la Compactación de suelos. Existen varios métodos para realizar la compactación entre los cuales se encuentran el Proctor Estándar y el Proctor Modificado.

#### **2.10.6.1 Proctor estándar (AASHTO T-99)**

Se emplea para determinar la relación entre la densidad seca y la humedad de compactación de los materiales a utilizar tanto en explanadas como en capas granulares de firmes. “Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 2,5 Kg, en caída libre desde una altura de 305 mm, con una energía específica de compactación de  $0,59 \text{ J/cm}^3$ ” (Pérez Droguet et al., 2011).

**Tabla 4**  
*Métodos de Proctor Estándar*

CLASE DE PROCTOR		PROCTOR STANDARD			
METODO		A	B	C	D
CILINDRO	ALTURA	4,6"	4,6"	4,6"	4,6"
	DIÁMETRO	4,0"	6,0"	4,0"	6,0"
	VOLUMEN	947 cm <sup>3</sup>	2131 cm <sup>3</sup>	947 cm <sup>3</sup>	2131 cm <sup>3</sup>
MARTILLO	PESO	5,5 lb.	5,5 lb.	5,5 lb.	5,5 lb.
	CAÍDA	12"	12"	12"	12"
NUMERO DE CAPAS		3	3	3	3
NUMERO DE GOLPES		25	56	25	56
MATERIAL UTILIZADO					
PASA MALLA N°		4	4	3/4"	3/4"
OBJETIVO		HALLAR LA DENSIDAD MÁXIMA Y LA HUMEDAD ÓPTIMA			
UTILIZACIÓN		Para suelo cemento y terraplenes			

*Nota:* Fuente propia.

#### 2.10.6.2 Proctor modificado (AASHTO T-180-90)

Este método sirve para determinar el contenido de humedad y la densidad de los suelos cuando estos son compactados en un molde de tamaño dado con un apisonador de 5.5 pulg. (Bermejo & Flores, 2014).

**Figura 17**

*Molde de 6" (Proctor Modificado)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 18**

*Apisonador de 10 lb (Proctor Modificado)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Tabla 5***Métodos de Proctor Modificado*

CLASE DE PROCTOR		PROCTOR MODIFICADO			
METODO		A	B	C	D
CILINDRO	ALTURA	4,6"	4,6"	4,6"	4,6"
	DIÁMETRO	4,0"	6,0"	4,0"	6,0"
	VOLUMEN	947 cm <sup>3</sup>	2131 cm <sup>3</sup>	947 cm <sup>3</sup>	2131 cm <sup>3</sup>
MARTILLO	PESO	10 lb.	10 lb.	10 lb.	10 lb.
	CAÍDA	18"	18"	18"	18"
NUMERO DE CAPAS		5	5	5	5
NUMERO DE GOLPES		25	56	25	56
MATERIAL UTILIZADO					
PASA MALLA N°		4	4	3/4"	3/4"
OBJETIVO		HALLAR LA DENSIDAD MAXIMA Y LA HUMEDAD OPTIMA			
UTILIZACION		Para hallar el % de Compactación del terreno			

*Nota:* Fuente propia.

### **2.10.7 Relación Soporte California CBR (AASHTO T193)**

Mediante este ensayo se evalúa la capacidad portante de suelos principalmente para la construcción de carreteras en terraplenes en donde se considera la compactación y el porcentaje de humedad óptimo.

Este método de ensayo tiene la intención de determinar los valores de soporte de suelos y suelo agregado cuando estos últimos son compactados en un Laboratorio a contenidos óptimos de humedad para grados variables de densidad utilizando un pisón de 10 lb soltando desde una altura de 18 pulgadas. El ensayo es útil para evaluar suelos de terraplén (subrasante), y algunos materiales de cada base y súbbase que contengan pequeñas cantidades de material retenido en el tamiz de 19 mm (Bermejo & Flores, 2014, p. 36).

**Figura 19**

*Moldes del ensayo de CBR*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

**Figura 20**

*Aparato para medir la extensión*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

### **2.10.8 Moldeado de probetas**

Este método fija el modo por el cual se moldean las probetas de ensayo de suelo cemento que serán sometidas a los métodos SC-3 (Compresión Simple) y SC-4 (Durabilidad por mojado y secado). Dependiendo de la granulometría del suelo, dos métodos son empleados: método A y método B (Rocha, 2002, p. 34).

El procedimiento para preparar las probetas es con el molde y el pistón el ensayo de Proctor Estándar, con 25 golpes en tres capas, “con la precaución especial de escarificar las superficies de la primera y segunda capa antes de la colocación de las capas siguientes, de modo de remover los planos lisos formados por la compactación” (Rocha, 2002, p. 35), del molde se debe remover la

probeta de suelo cemento y colocar esta probeta en una cámara humedad de  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa del aire entre 90 % por 7 días y además se debe calcular la humedad del suelo.

### Figura 21

*Equipo para extraer probeta de suelo cemento*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### Figura 22

*Sitio de Curado Húmedo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

#### 2.10.9 Compresión simple

El ensayo a compresión simple nos permite hallar la resistencia a la compresión a 7 días, este ensayo se debe realizar en probetas de cilindro preparadas de suelo cemento, el procedimiento de este ensayo se encuentra descrito en las Normas de Dosificación de mezclas suelo cemento de la Portland Cement Association (PCA), el equipo para la ruptura de probetas es una prensa mecánica.

A fin de obtener mayor información del comportamiento de los suelos estabilizados con cemento, pueden realizarse otros ensayos tales como los de Resistencia a la Compresión. El ensayo de compresión no confinada permite conocer el ritmo de endurecimiento y comportamiento de la mezcla en el tiempo (Rodríguez et al., 2011).

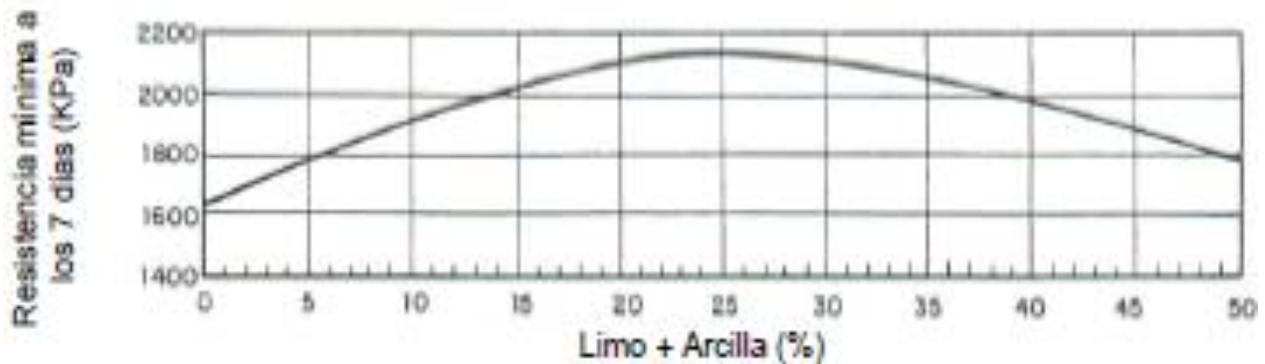
**Figura 23**  
*Prensa (Ruptura de las probetas)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

El valor de la resistencia a compresión mínima admisible de las probetas de ensayo, dependen del método que se utiliza y se definen en base a las características del suelo y a las siguientes gráficas:

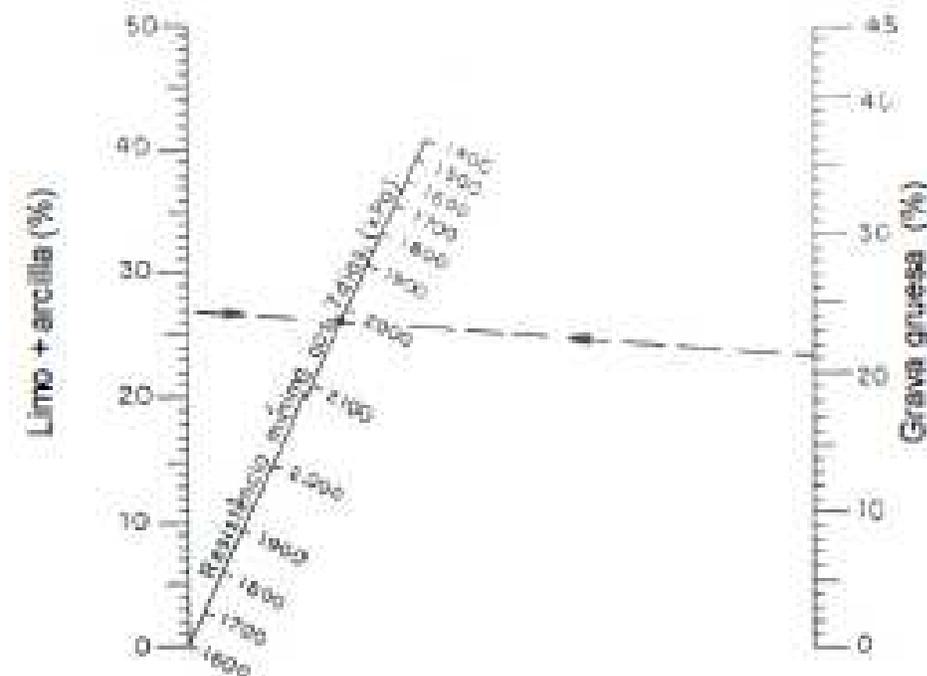
**Figura 24**  
*Resistencia mínima admisible - Método A*



*Nota.* Tomado de *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación* (p. 22), por Rocha, 2002.

**Figura 25**

*Resistencia mínima admisible - Método B*



*Nota.* Tomado de *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación* (p. 25), por Rocha, 2002.

#### **2.10.10 Durabilidad por mojado y secado**

Tal como lo indica la PCA en el documento Soil Cement Laboratory Handbook, “el principal requisito de un suelo cemento es resistir las variaciones de las condiciones climáticas. De este modo, el elemento base de comparación del suelo cemento, es la cantidad de cemento requerida para producir una mezcla que resista los esfuerzos inducidos en los ensayos de durabilidad por humedecimiento y secado” (Rodríguez et al., 2011).

Este ensayo al igual que el de compresión simple se debe hacer en probetas de cilindro preparadas de suelo cemento, después del curado húmedo por 7 días, las probetas deben ser colocadas en el agua en la cámara de curado durante 4 horas, posterior a ello se coloca en un horno a temperatura de 71 °C por un periodo de 42 horas, terminando el tiempo las probetas se sacan del horno y son cepilladas con un cepillo de cerdas de alambre, entre 18 a 20 veces de manera que

cubra por completa la superficie lateral y 4 pasadas en las dos bases de la probeta, este procedimiento compone en un ciclo de 48 horas, el laboratorio consiste en 12 ciclos, finalizando estos se debe colocar las probetas al horno hasta que tengan un peso constante.

“Este método fija el modo por el cual se determina la pérdida de peso de probetas de ensayo de suelo cemento cuando son sometidas a ciclos de mojado y secado” (Rocha, 2002, p. 36). El valor de la pérdida de peso del ensayo de Durabilidad por mojado y secado de las probetas después de 12 ciclo debería ser menor a los siguientes valores respecto al tipo de suelo estudiado:

**Tabla 6**

*Porcentaje de pérdida de peso*

Suelos A1, A2-4, A2-5 y A3	14 %
Suelos A2-6, A2-7, A4 y A5	10 %
Suelos A6 y A7	7 %

*Nota.* Tomado de *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación* (p. 17), por Rocha, 2002.

## CAPITULO III

### 3. MARCO PRACTICO Y METODOLOGIA

#### 3.1 Localización y extracción de muestra de suelo

En el presente proyecto se optó, por realizar la investigación de un suelo Areno Limoso, un suelo con estas características se encontró en la Comunidad Churalla Chico que se encuentra camino a Oruro.

La extracción de muestras de suelo se realizó, tomando en cuenta las precauciones debidas para no alterar el material en su estado natural, de esta manera tener muestras representativas inalteradas, así también, se tomaron muestras alteradas. Estas se colocaron en bolsas negras para su posterior almacenaje en el instituto de ensayo de materiales (IEM) de la Universidad Mayor de San Andrés.

#### **Figura 26**

*Ubicación del lugar de toma de muestra*



*Nota.* Suelo areno limoso extraído de la comunidad Churalla Chico. Fotografía obtenida por fuente propia.

#### **Figura 27**

*Extracción de muestra de suelo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Se realizó la extracción del suelo, considerando la cantidad de muestra necesaria para realizar los laboratorios correspondientes al proyecto. La cantidad aproximada de suelo extraída para cada laboratorio se observa en la siguiente tabla:

**Tabla 7***Cantidad de suelo necesaria para los laboratorios realizados*

Ensayo	Cantidad de suelo Aproximada		Cantidad	TOTAL
		Observaciones		
<i>Análisis Granulométrico por Tamizado</i>	6000 [g]		1	6000 [g]
<i>Análisis Granulométrico por Método del Hidrómetro</i>	100 [g]	Pasa Tamiz N°4	1	100 [g]
<i>Límite de Atterberg (Limite Líquido)</i>	100 [g]	Pasa Tamiz N°40	1	100 [g]
<i>Límite de Atterberg (Limite Plástico)</i>	100 [g]	Pasa Tamiz N°40	1	100 [g]
<i>Gravedad específica (AASHTO T100-70)</i>	40 [g]	Pasa Tamiz N°10	2	80 [g]
<i>Compactación Proctor modificado (AASHTO T-180)</i>	8000 [g]		5	40000 [g]
<i>Compactación Estandar (AASHTO T-99)</i>	4000 [g]		14	56000 [g]
<i>Relación Soporte California CBR (AASHTO T193)</i>	16000 [g]		4	64000 [g]
<i>Compresión Simple</i>	8000 [g]		7	56000 [g]
<i>Durabilidad por mojado y secado</i>	5000 [g]		8	40000 [g]
		<b>TOTAL</b>		<b>262.38 [Kg]</b>

Nota: Fuente propia.

### 3.2 Recolección y Calcinación para obtener ceniza de eucalipto

Para realizar esta investigación se procedió a la obtención de la ceniza de eucalipto, recolectando troncos y ramas de eucalipto que por causas naturales suelen caerse al suelo y se encuentran en el medio ambiente como desechos vegetales y como madera muerta, reduciendo de esta manera desechos de troncos y ramas de eucalipto. Estos se encontraron en el campus universitario de la Universidad Mayor de San Andrés, que se encuentra en Cota Cota en la ciudad de La Paz.

**Figura 28***Árbol caído (Eucalipto)*

Nota: Se encontró en el campus de Cota Cota, fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 29**

*Arboles, ramas y hojas de eucalipto caídas*



*Nota:* Se encontró madera muerta en el campus de Cota Cota, fotografía obtenida por fuente propia.

### 3.2.1 Recolección de troncos y ramas de eucalipto

Una vez localizado el lugar donde se encuentran los desechos de madera muerta se procedió a la recolección de los mismo, utilizando machete y serrucho para partir los troncos y ramas de eucalipto, posterior a ello se almacenó la materia prima en yutes, como se observa en las siguientes imágenes:

**Figura 30**

a) Corte de troncos y ramas b) y c) Acopio de troncos y ramas de eucalipto



*Nota:* Fotografías obtenidas por fuente propia.

Una vez recolectada la madera de eucalipto, se cortó con hacha para que quede trozos pequeños de madera lo que conocemos como leña, continuando luego con el secado a temperatura ambiente al aire libre de algunos que presentaban humedad, lo que facilita el proceso de calcinación y así obtener la ceniza de eucalipto.

**Figura 31**  
*Obtención de Leña*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.2.2 Calcinación y obtención de ceniza de eucalipto**

Ya recolectada la materia prima, siendo esta la madera de eucalipto, se quemó tomando en cuenta lo que menciona Pérez, (2017) la temperatura ideal para calcinar la ceniza del eucalipto es de 400°C por espacio de dos horas (p. 37), sabiendo que al quemar de forma artesanal en un horno se puede llegar a esta temperatura, se calcinó de forma artesanal los troncos y ramas de eucalipto utilizando el horno del Instituto de Ensayo de Materiales IEM-UMSA y también un horno de ladrillo armado de manera improvisado. Al momento de calcinar los troncos y ramas de eucalipto, se observó que la materia prima tiene un porcentaje de pérdida de 90% aproximadamente.

**Figura 32**  
*Calcínación en horno de ladrillo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 33**

*Calcinación de troncos y ramas de eucalipto en el horno de IEM*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

Disponiendo de la ceniza se la tamizó con un artefacto (ver Figura 32) semejante a la malla N°60 en las aberturas, teniendo de esta manera ceniza de eucalipto fina.

**Figura 34**

*Aparato para tamizar la ceniza*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

**Figura 35**

*Ceniza de eucalipto*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

### **3.3 Determinación de componentes químicos de ceniza de eucalipto**

Con la finalidad de obtener los componentes químicos de la ceniza de eucalipto se realizó el ensayo de Fluorescencia de Rayos X en el Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente IGEMA-UMSA, el cual realiza análisis de elementos químicos pesados y ligeros, análisis cualitativo de la composición de elementos químicos pesados de materiales naturales o

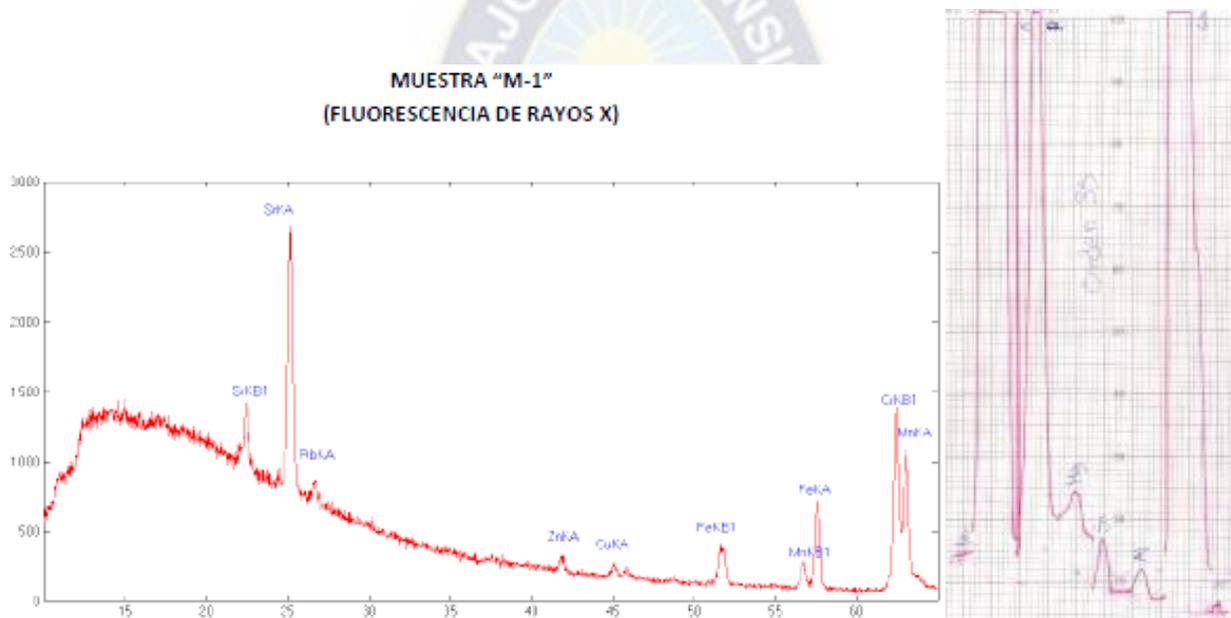
artificiales, presentes en fases cristalinas y/o amorfas, entre otros. El costo por el servicio fue de 300 Bs.

### 3.3.1 *Ensayo de Fluorescencia de Rayos X*

Se llevo 50 gramos de muestra de ceniza de eucalipto, cuidando que esta sea una muestra representativa, donde se encontraron los elemento mayoritarios Ca, K y P, minoritarios Si, Al, Mg, Fe y trazas Mn, Cu, Rb, Zn y Sr.

#### **Figura 36**

*Resultados del ensayo Fluorescencia de Rayos X en IGEMA*



*Nota:* Gráficas de Espectro de Espectrometría, tanto para elementos pesados como para elementos ligeros.

### 3.4 **Ensayo de caracterización del suelo natural**

#### 3.4.1 *Contenido de humedad natural (ASTM D2216-98)*

El contenido de humedad es un ensayo usual que se realiza al momento de analizar las características del suelo, en el proyecto se realizó la investigación sobre un suelo Arenoso Limoso (suelo no cohesivo) a dos muestras del suelo de estudio, cumpliendo con los requerimientos de la norma ASTM D2216-98. Las dos muestras se colocaron en cápsulas previamente pesadas y

posterior a ello se pesó la cápsula con la muestra humedad, una vez teniendo registro de estos datos se colocó al horno por 24 hrs a una temperatura de 110 °C, finalmente se pesó las capsulas con las muestras secas.

**Figura 37**  
*Muestras para el ensayo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

#### **3.4.2 Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T27-82)**

Se realizó este ensayo para saber la distribución de tamaño de las partículas mayores a 0.074 mm del suelo estudiado, que permite determinar la clasificación del suelo. Siguiendo el procedimiento según la norma AASHTO T17-82:

- La muestra para el ensayo fue de 6 Kg, se la hizo secar al horno durante 24 horas a una temperatura de 110 °C, una vez seca se procedió a disgregar la muestra.

**Figura 38**  
*Muestra de 6 Kg para el ensayo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Teniendo el suelo preparado para el ensayo, se hizo pasar por el Tamiz N°10, separando la muestra en dos porciones una que pasa y la otra que se retiene.

- La porción de muestra que se retiene fue casi nula, esta se hizo pasar por la serie de tamices gruesa, notando que esta se retiene en el tamiz N°4 y se procedió a registrar el peso.
- De la muestra que pasó el Tamiz N°10, se apartó una cantidad de 100 g, posterior se lavó con agua sobre el Tamiz N°200 de manera que el agua que inicialmente era turbia al momento del lavado se vuelva cristalina eliminado así los finos, este se colocó al horno por 24 horas a 110 °C. Una vez seca se hizo pasar por la serie de tamices fina (N°10, N°40, N°60, N°140 y N°200) finalmente se procedió a pesar las partículas retenidas en los tamices. Además, de este material se tomó una muestra de 100 g para hallar la humedad higroscópica.

**Figura 39**

*Desarrollo de tamizado de la muestra Fina*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

### 3.4.3 Gravedad específica (AASHTO T100-70)

Este ensayo se realizó dos veces para hallar el valor promedio de la gravedad específica, utilizando muestra de suelo que pasan por el tamiz N°4, siguiendo el procedimiento de la norma AASHTO T100-70:

- De la muestra que pasa el tamiz N°4 se apartó una cantidad de 40 g para realizar el ensayo.
- Se peso el picnómetro vacío y seco.

**Figura 40**  
*Peso del picnómetro*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- En un recipiente se colocó agua destilada del cuál se anotó la temperatura que tenía, posterior se colocó el agua al picnómetro hasta la marca de calibración y se pesó.

**Figura 41**  
*Proceso de colocado de agua y suelo al picnómetro*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Se quitó una cantidad de agua al picnómetro y se adicionó la muestra de suelo con ayuda de un embudo, de tal manera que se encuentre hasta la marca del picnómetro, luego se agitó para que quede homogénea y sin burbujas de aire, prosiguiendo se pesó el conjunto picnómetro, agua y suelo. Por último, se sacó en una cápsula el agua y suelo registrando su peso y metiéndolo al horno por 24 horas a 110 °C, una vez seca se registro su peso.

#### **3.4.4 *Análisis granulométrico por método del hidrómetro (AASHTO T88-93)***

Este ensayo se realizó fundamentalmente para completar el análisis de clasificación del suelo por el tamaño de partículas según la escala de la Portland Cement Association (PCA), y así disponer de datos que permitan hallar la dosificación óptima de suelo cemento para estabilizar el suelo de estudio, siguiendo lo que indica la Norma de Dosificación Simplificada de la PCA. Así también, este nos permite saber el contenido de limo y arcilla presente en el suelo, completando la curva granulométrica de las partículas que pasan el tamiz N°200 (0.075mm).

El ensayo se realizó siguiendo los requerimientos de la norma AASHTO T88-93:

- Debido a las características del suelo investigado, se utilizó una muestra de 100 gramos de suelo que paso por el tamiz N°4 y 5 gramos de Hexametáfosfato de sodio, para su posterior mezcla en un recipiente de vidrio, luego añadimos 125 ml de agua destilada en una barra de vidrio y mezclamos con movimientos circulares.
- Después se colocó este conjunto en el vaso metálico de la mezcladora hasta completar 250 ml y se bate por un lapso de 1 minuto en la batidora.
- Luego se vacía toda la mezcla con ayuda de la perilla en la probeta graduada y aumentamos agua destilada hasta llegar a 1000 ml y agitarla 60 veces durante 1 minuto.

**Figura 42**

*Mescla en la batidora*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Después se coloca la probeta en un baño maría a una temperatura de 20°C, registrando las lecturas con el picnómetro a la altura que se sumerge a diferentes tiempos de 1, 2, 4, 15, 30, 60, 240, 480 y 1440 minutos.

**Figura 43**

*Lectura del picnómetro colocado a baño maría*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.4.5 Límite de Atterberg**

Se realizó estos ensayos que permiten determinar la clasificación del suelo.

#### **3.4.5.1 Límite líquido (AASHTO T 89-81)**

Se realizó este ensayo cumpliendo la norma AASHTO T 89-81, realizando lo siguiente:

- Se toma una cantidad de suelo de 100 g aproximadamente que pasa el Tamiz N°40.

- Este suelo se mezcla con agua de manera que llegue a tener una consistencia pastosa.
- La mezcla se coloca en la copa de Cuchara de Casagrande con la espátula y se realiza un corte en el centro con el ranurador.

**Figura 44**

*Muestra de suelo colocado en el aparato de Cuchara de Casagrande*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Girando la manivela se levanta y deja caer la copa, de tal manera que el corte que se hizo entre en contacto a una distancia de 13 mm, registrando el número de golpes requerido para ese propósito.
- Por último, se retiró la muestra y colocó en un recipiente previamente pesado, luego se registro su peso, para colocarlo al horno durante 24hrs y pesar la muestra seca con el recipiente.

Debido a las características del suelo solo se repitió una vez este proceso.

**3.4.5.2 Límite plástico (AASHTO T90-70)**

Al realizar este laboratorio como indica la norma AASHTO T90-70, se notó que fue imposible hacer los rollitos con el suelo, concluyendo que el suelo no posee plasticidad.

### 3.4.6 Compactación

#### 3.4.6.1 Proctor estándar (AASHTO T-99)

Este ensayo permite hallar la densidad seca máxima y la humedad óptima para realizar los ensayos de compresión simple y durabilidad por mojado y secado, debido a que para estos ensayos se utilizó el molde de Proctor estándar como indica la PCA.

Según el método A de la norma AASHTO T-99 se realizó el siguiente procedimiento:

- El ensayo se realiza en un molde de 4" de diámetro y un apisonador de 5.5 lb. Se utilizó una muestra seca del suelo de 4 Kg del material que pasa el Tamiz N°4. Esta muestra se colocó en una bandeja y se le agrega 125 ml de agua aproximadamente para luego mezclarlo hasta que quede homogénea.

**Figura 45**

*Molde y apisonador (Proctor T-99)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 46**

*Muestra preparada para el ensayo T-99*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Con un mango se coloca cierta cantidad de suelo en el molde de compactación (a una altura de tal manera que se compacte 3 capas iguales) y se realizó la compactación con 25 golpes con el apisonador. Este proceso se repitió 2 veces más, para tener un espécimen compactado a 3 capas iguales.
- Luego se quitó la argolla y se enrazó con una regla metálica. Una vez enrazado se limpia el exterior del molde y se registro su peso.

**Figura 47**

*Espécimen compactado y enrazado*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 48**

*Registro del molde y suelo húmedo (T-99)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Teniendo el peso del molde y suelo compactado, se quitó el material del molde y se toma una muestra de suelo representativa mayor a 100 g para hallar su humedad.
- Este procedimiento se realizó 5 veces, adicionando 125 ml de agua en cada repetición.

**Figura 49**

*Cápsula y suelo con diferentes humedades*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Se realizó dos repeticiones de este ensayo para hallar el promedio de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

### **3.4.6.2 Proctor modificado (AASHTO T-180-90)**

Este ensayo se realizó para hallar la densidad seca máxima y la humedad óptima para el ensayo de Relación de Soporte California (CBR).

Según el método B de la norma AASHTO T-180 se realizó el siguiente procedimiento:

- El ensayo se realizó en un molde de 6" de diámetro y un apisonador de 10 lb. Se utilizó una muestra seca del suelo de 8 Kg del material que pasa el Tamiz N°4. Esta muestra se

colocó en una bandeja y se le agrega 250 ml de agua aproximadamente para luego mezclarlo hasta que quede homogénea.

**Figura 50**

*Muestra de suelo 8 Kg (T-180)*



**Figura 51**

*Mezcla homogénea del suelo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Con un mango se coloca cierta cantidad de suelo en el molde de compactación (a una altura de tal manera que se compacte 5 capas iguales) y se realizó la compactación con 56 golpes con el apisonador. Este proceso se repitió 4 veces más, para tener un espécimen compactado a 5 capas iguales.

**Figura 52**

*Proceso de compactación*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Luego se quitó la argolla y se enrazó con una regla metálica. Una vez enrazado se limpió el exterior del molde y se registró su peso.

**Figura 53**

*Enrazado con regla metálica*



**Figura 54**

*Peso del molde y suelo húmedo (T-180)*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

- Teniendo el peso del molde y suelo compactado, se quitó el material del molde y se tomó una muestra de suelo representativa mayor a 100 g para hallar su humedad.
  - Este procedimiento se realizó 5 veces, adicionando 250 ml de agua en cada repetición.
- Se realizó dos repeticiones de este ensayo para hallar el promedio de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

### **3.4.7 Relación Soporte California CBR (AASHTO T193)**

Se hizo este ensayo cumpliendo la norma AASHTO T193, realizando lo siguiente:

- Para este laboratorio se utilizó 16 Kg de suelo que pasa por el tamiz N°4, esta muestra se colocó en una bandeja, se le añadió agua previamente calculada con la humedad óptima

considerando la humedad higroscópica y el porcentaje de pérdida en el ensayo, después se mezcló hasta que quede homogénea.

- Se colocó en el primer molde un disco separador, y un papel filtro y con un mango se procedió a colocar cierta cantidad de suelo para compactar cinco capas de 12 golpes. Luego se quitó la argolla y se enrazó.
- El molde se dio la vuelta, para remover el disco espaciador y colocar un papel filtro grueso en la placa base perforada, invertir el molde con el suelo compactado y colocarlo sobre papel filtro de manera que el suelo compactado esté en contacto con el papel filtro, se aseguró el molde, se limpió y se registro su peso. Después se colocó la argolla y se tomó una muestra de suelo representativa mayor a 100 g para hallar su humedad.
- Se repitió el procedimiento de compactación, a 25 golpes y a 56 golpes.

**Figura 55**

*Espécimen compactado y enrazado de molde C.B.R.*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Ya compactado los tres moldes se coloca discos espaciadores en la parte superior del molde para luego introducirlo en una fuente con agua y medir con un indicador de dial la lectura inicial de expansión. Remojar las probetas por 4 días.
- Después de los 4 días se dio una lectura final a las probetas sumergidas y se escurrió el agua de las probetas colocándolos hacia abajo durante 15 minutos aproximadamente.

**Figura 56**

*Inmersión y registro de lectura con deformímetro*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

- Finalmente se realizó el ensayo de penetración a los tres moldes, aun velocidad de penetración normalizada, registrando las lecturas del anillo de carga PR-70 para 30s, 1 min, 1.5 min, 2 min, 4 min, 6 min, 8 min y 10 min y se tomó una muestra de cada molde compactado para realizar el análisis de humedad.

**Figura 57**

*Ensayo de penetración en molde de C.B.R.*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

**Figura 58**

*Muestra de suelo ya ensayada*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

Se realizó dos repeticiones de este ensayo obteniendo entonces el valor promedio de CBR.

### 3.4.8 Moldeado de probetas

Este ensayo previo se realizó para moldear las probetas, que serán sometidos al laboratorio de compresión simple y durabilidad por mojado y secado, se realizó tres probetas para el ensayo de compresión y dos para el ensayo de durabilidad.

Debido a que el 100 por ciento del suelo pasa por el tamiz N°4 se utilizó el método A como indica la norma de dosificación simplificada de la PCA, siguiendo los siguientes pasos:

- Se utiliza 2 Kg de suelo (para preparar una probeta) y se le añadió agua previamente calculada con la humedad óptima determinada en el ensayo de Proctor Estándar, así también, se tomó en cuenta la humedad higroscópica y el porcentaje de pérdida por el ensayo, luego se mezcla hasta que quede homogénea.
- El proceso de compactación se realizó de la misma manera que el ensayo Proctor T-99, con la diferencia de escarificar la superficie de la primera y segunda capa para que no quede una superficie lisa. Se tomó una muestra del suelo para análisis del contenido de humedad.
- Una vez compactado se registro su peso y se extrae la probeta de ensayo del molde con ayuda de una gata hidráulica. Ya lista la probeta se coloca en curado húmedo a una temperatura de 21°C y humedad relativa 90% por un lapso de siete días.

**Figura 59**

*Probeta compactada y gata hidráulica*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 60**

*Proceso de extracción de la probeta*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.4.9 Compresión simple**

Este ensayo se realizó a tres probetas moldeadas como indica en el acápite 3.4.8, siguiendo el procedimiento de la norma PCA:

- Después del curado húmedo durante siete días, se debe colocar las probetas en inmersión completamente al agua durante 4 horas. Al momento de realizar la inmersión de la primera probeta al agua esta se comenzó a disgregar como se observa en la Figura 63, quedando simplemente un suelo disgregado bajo el agua. Por ello para realizar este ensayo con el suelo natural, se realizó sin la inmersión, solo contemplando el curado húmedo por 7 días, registrando el peso, el diámetro y la altura de las probetas.

**Figura 61**

*Curado húmedo de probetas*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 62**

*Proceso de inmersión de probetas*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 63**

*Probeta de suelo natural disgregado*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Las caras superior e inferior de la probeta deberían de estar lisas. Para después colocarlas al equipo de la prensa ajustando el eje de la probeta al centro del bloque de apoyo y el que se encuentra en la parte superior. Una vez puesta la probeta al equipo se someten a compresión, hasta que se rompan, obteniendo de esa manera el esfuerzo máximo a la falla de la probeta.

**Figura 64**

*Probeta posicionada correctamente antes del ensayo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 65**

*Falla de probeta al esfuerzo máximo*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### 3.4.10 Durabilidad por mojado y secado

Se hizo este ensayo cumpliendo la norma simplificada de la PCA, realizando lo siguiente:

- Después de los 7 días de curado húmedo, las probetas se deben de colocar en inmersión al agua durante 5 horas. Sabiendo que al realizar este proceso la probeta de suelo natural se disgrega, entonces no se hizo este paso y para poder tener una idea de la pérdida que presenta la probeta, después de los 7 días de curado húmedo, se pesó y fue sometido a 18 cepilladas verticales de modo que cubre la superficie lateral y 4 cepilladas a las bases de la probeta y se registro su peso, este proceso se realizó una unica vez.

**Figura 66**

*Cepillado en probeta de suelo natural*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

### 3.5 Dosificación de suelo-cemento

Como ya se mencionó la metodología a seguir para estabilizar el suelo, es la que nos indica la PCA. Para desarrollar este proceso se realizó lo siguiente:

- Teniendo las características del suelo y con la gráfica correspondiente del método, se estimó el peso específico seco máximo, en función a este se estimó la cantidad de cemento necesaria.
- Posterior a ello se realizó el ensayo de Proctor estándar, encontrando el verdadero valor del peso específico máximo y con este determinar el porcentaje en peso de cemento para estabilizar el suelo.

- Con el porcentaje indicado (9%) se realizó el ensayo de compresión simple a los 7 días, para verificar si la resistencia es superior a la resistencia mínima que indica la figura 24.
- Así también, se realizó el ensayo de durabilidad, reafirmando valor del porcentaje de cemento que estabiliza el suelo de estudio.
- Finalmente se hizo el ensayo de Relación Soporte California, con el fin de hallar el valor de CBR.

Los ensayos realizados para este propósito son los siguientes:

### **3.5.1 Proctor estándar (AASHTO T-99)**

Este ensayo se realizó para hallar: la densidad seca máxima, valor que se necesita al momento de determinar la dosificación óptima en la estabilización de suelo cemento; también, permite hallar la humedad óptima para realizar los ensayos de compresión simple y durabilidad por mojado y secado, debido a que para estos ensayos se utilizó el molde de Proctor estándar como indica la PCA. El procedimiento a seguir fue el mismo como se describe en el acápite 3.4.6.1, siendo la única modificación el sustituir un porcentaje de peso del suelo natural por cemento. Este porcentaje se obtuvo con las gráficas respectivas al método de la PCA, utilizando características del suelo. Se realizó dos repeticiones de este ensayo obteniendo el promedio de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

### **3.5.2 Compresión simple suelo-cemento**

Se realizó este ensayo para verificar si el porcentaje de cemento hallado estabiliza el suelo y esto se verifica con la gráfica de la metodología (ver figura 24). Se hizo este ensayo con el siguiente procedimiento:

- Se moldeó tres probetas de igual manera como se describe en el acápite 3.4.8.

**Figura 67**

*Moldeado de probetas Suelo-Cemento (Ensayo compresión)*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

- Después de los 7 días de curado húmedo, se procedió a colocar las probetas en inmersión completa al agua durante un periodo de 4 horas. Pasado el tiempo de inmersión se sacó y seco superficialmente con un trapo, luego se registrando el peso, el diámetro y la altura de las probetas.

**Figura 68**

*Inmersión de probetas suelo-cemento*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

**Figura 69**

*Proceso de medida de diámetro y altura de las probetas*



*Nota: Fotografía obtenida por fuente propia.*

- Se verificó que las bases de la probeta estén lisas, después se colocó a la prensa, ajustando el eje de la probeta al centro del bloque de apoyo y el que se encuentra en la parte superior, luego se someten a compresión hasta que presente fallas, registrando el esfuerzo máximo de falla de la probeta.

**Figura 70**

*Probetas suelo-cemento sometida a compresión*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.5.3 Durabilidad por mojado y secado suelo-cemento**

Se realizó este ensayo para confirmar si el porcentaje de cemento hallado, estabiliza el suelo. El procedimiento que se hizo es el siguiente:

- Se moldeó dos probetas de igual manera como se describe en el acápite 3.4.8.
- Después de 7 días de curado húmedo la probeta N°1 se pesa y mide diámetro y altura, luego las probetas de ensayo se colocaron en la cámara de inmersión al agua durante 5 horas, pasado el tiempo se registro el peso y midió la probeta N°1, continuando se colocó las probetas en un horno a una temperatura de 100 °C, donde permanecen por 42 horas.

**Figura 71**

*Proceso de poner las probetas al horno a 100 °C*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

- Al final de este periodo la probeta N°2 debe ser cepillada. “La escoba debe ser aplicada en el sentido de la generatriz de la probeta de ensayo y paralelamente a las bases, de manera de cubrir toda la superficie de la probeta de ensayo. Se dan 20 cepilladas verticales en la superficie lateral y 4 en las bases de la probeta de ensayo. El enfriamiento y la operación de cepillado deben durar máximo 1 hora” (Rocha, 2002). Se registro el peso de las probeta al final del proceso.
- Este proceso constituye un ciclo de mojado y secado de 48 horas aproximadamente, luego se sumergió al agua nuevamente, realizando un total de 12 ciclos.
- Cuando se terminó los 12 ciclos, las probetas se colocaron al horno hasta que alcanzó un peso constante y se registro el peso.

**Figura 72**

*Probetas suelo-cemento sometida a Durabilidad por mojado y secado*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.5.4 Relación Soporte California CBR (AASHTO T193) Suelo-Cemento**

Este ensayo se pretendió realizar para obtener el valor de CBR con el porcentaje de cemento adoptado. Para ello se realizó el ensayo de Proctor T-180 como indica en el acápite 3.4.6.2 del cual se obtuvo el valor de humedad óptima.

**Figura 73**

*Proceso de Compactación Suelo-Cemento*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Después, se realizó el ensayo de CBR siguiendo el procedimiento del acápite 3.4.7, al momento de realizar el ensayo de penetración con el primer molde, se tuvo el inconveniente, donde el anillo de carga no soportaría la dureza del espécimen, por tanto, no se concluyó con este ensayo.

**Figura 74**

*Ensayo de penetración CBR Suelo-Cemento*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 75**

*Muestra de suelo ya ensayada Suelo-Cemento*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### 3.6 Ensayo experimental de suelo-ceniza de eucalipto-cemento

Con objeto de hallar el porcentaje óptimo de adición de ceniza de eucalipto y cemento, inicialmente se planteó la elaboración de ensayos de CBR, compresión simple y durabilidad por mojado y secado, con diferentes mezclas de suelo con adición de ceniza de eucalipto y cemento, reemplazando el porcentaje óptimo de cemento, por la ceniza de eucalipto en proporciones de 25%, 50%, 75% y 100%. Sin embargo, como ya se comentó no es posible realizar el ensayo de CBR debido a que el anillo de carga no soporta la dureza del suelo con cemento, por tanto, se realizó los siguientes ensayos:

**Tabla 8**

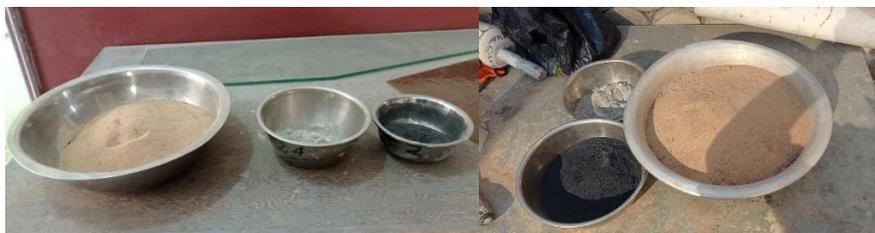
*Ensayos suelo ceniza de eucalipto y cemento*

ENSAYO	Nº	DOSIFICACION	ABREVIATURA
<i>Proctor Estandar</i>	D-II	2.25 % Ceniza de eucalipto y 6.75% Cemento	SN+2.25%CE+ 6.75% C
	D-III	4.5% % Ceniza de eucalipto y 4.5%% Cemento	SN+4.50%CE+4.50% C
	D-IV	6.75 % Ceniza de eucalipto y 2.25% Cemento	SN+6.75%CE +2.25% C
	D-V	9 % Ceniza de eucalipto	SN + 9% CE
<i>Compresión Simple</i>	D-II	2.25 % Ceniza de eucalipto y 6.75% Cemento	SN+2.25%CE+ 6.75% C
	D-III	4.5% % Ceniza de eucalipto y 4.5%% Cemento	SN+4.50%CE+4.50% C
	D-IV	6.75 % Ceniza de eucalipto y 2.25% Cemento	SN+6.75%CE +2.25% C
	D-V	9 % Ceniza de eucalipto	SN + 9% CE
<i>Durabilidad</i>	D-II	2.25 % Ceniza de eucalipto y 6.75% Cemento	SN+2.25%CE+ 6.75% C
	D-III	4.5% % Ceniza de eucalipto y 4.5%% Cemento	SN+4.50%CE+4.50% C
	D-IV	6.75 % Ceniza de eucalipto y 2.25% Cemento	SN+6.75%CE +2.25% C
	D-V	9 % Ceniza de eucalipto	SN + 9% CE

*Nota:* D-i=Dosificación numero i, SN=suelo natural, CE=ceniza de eucalipto y C=cemento.  
Fuente propia.

**Figura 76**

*Muestra de suelo, ceniza de eucalipto y cemento (Diferentes dosificaciones)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.6.1 Proctor estándar (suelo-ceniza de eucalipto-cemento)**

Se hizo este ensayo para hallar la humedad óptima con este dato realizar los ensayos de compresión simple y durabilidad por mojado y secado. El procedimiento a seguir fue el mismo como se describe en el acápite 3.4.6.1, realizando dos ensayos para cada dosificación hallando así el promedio de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

**Figura 77**

*Proceso de enrasado (Suelo-Ceniza de eucalipto-Cemento)*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### **3.6.2 Compresión simple (suelo-ceniza de eucalipto-cemento)**

Para hacer este ensayo se moldeó tres probetas para cada dosificación como se describe en el acápite 3.4.8.

**Figura 78**

*Proceso de extracción de la probeta suelo-ceniza de eucalipto-cemento*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Teniendo las probetas se procedió a realizar el ensayo a compresión simple como indica en el acápite 3.5.2. Sin embargo, se tuvo problema con la dosificación con 9 % Ceniza de eucalipto (D-V), puesto que, al realizar la inmersión de la primera probeta, esta se comenzó a disgregar lentamente, en consecuencia, se realizó el ensayo de compresión de las dos probetas restantes sin realizar la inmersión al agua.

**Figura 79**

*Ensayo de compresión simple*



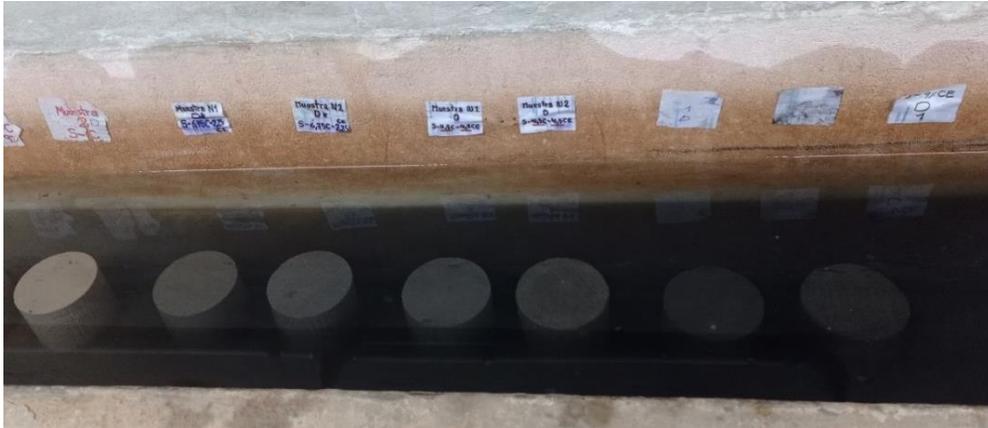
*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### 3.6.3 Durabilidad por mojado y secado (suelo-ceniza de eucalipto-cemento)

Se moldeó dos probetas de igual manera como se describe en el acápite 3.4.8. Y estas fueron sometidas al ensayo de durabilidad como se indica en el acápite 3.5.3.

**Figura 80**

*Proceso de inmersión probetas suelo-ceniza de eucalipto-cemento*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

**Figura 82**

*Cepillado de probeta suelo-ceniza de eucalipto-cemento*

**Figura 81**

*Secado de las probetas a 110 °C*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

### Figura 83

*Probetas sometidas al ensayo de durabilidad*



*Nota:* Fotografía obtenida por fuente propia.

Teniendo en cuenta la limitación de proceso de inmersión al agua de la dosificación D-V, este ensayo no se pudo realizar.



## CAPITULO IV

### 4. CALCULOS Y RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de la ceniza de eucalipto

Según los resultados obtenidos en el ensayo de fluorescencia de rayo X, se tiene como elementos mayoritarios al Calcio, Fosforo y Potasio; elementos minoritarios al Silicio, Aluminio, Magnesio, Hierro entre otros, tal que, estos elementos son fundamentales para formar los componentes cementantes, entonces se concluye que la ceniza de eucalipto tiene comportamientos similares a la del cemento.

Así también, es importante mencionar que, en el proceso de calcinación de los troncos y ramas de eucalipto, se observó que tiene un porcentaje de pérdida en peso de 94%.

#### 4.2 Análisis de propiedades del suelo

##### 4.2.1 Humedad Natural

Mediante este ensayo se determinó el contenido de humedad del suelo de estudio, los resultados de las dos repeticiones son:

**Tabla 9**

*Contenido de humedad suelo natural*

Muestra Nº :	1	2
Porcentaje de Humedad :	8.88	8.82
Promedio	%h = 8.85	

*Nota:* Fuente propia.

La planilla de Contenido de Humedad (ASTM D2216-98) se encuentra en el Anexo A-1.

##### 4.2.2 Peso específico

Por medio del ensayo de Gravedad específica de los sólidos se calculó este valor, que es importante para la caracterización de la muestra de suelo, así también, para realizar el cálculo de granulometría por el método del hidrómetro.

**Tabla 10**

*Gravedad específica de suelo natural*

Muestra N°	1	2
Gravedad Específica del suelo: $G_{s20^{\circ}\text{C}}[\text{g}/\text{cm}^3]$	2.647	2.650
Gravedad Específica promedio : $G_s=$	2.65	

Nota: Fuente propia.

De acuerdo con los valores de gravedad específica para algunos tipos de suelo (ver Figura 13), el valor de la gravedad específica del suelo pertenece a suelos inorgánicos Arena fina (limosa).

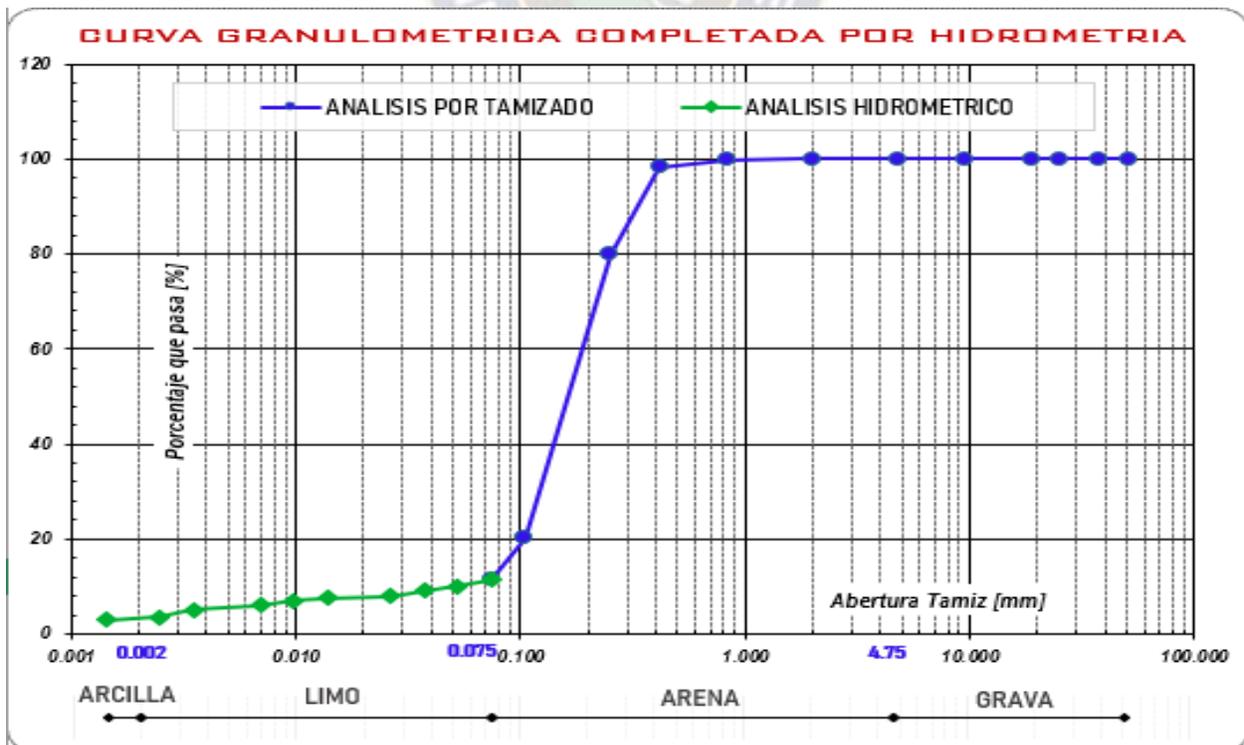
La planilla de Gravedad Específica (AASHTO T100-70) se encuentra en el Anexo A-3.

#### 4.2.3 Granulometría del suelo y características granulométricas del suelo

Por medio de los ensayos análisis granulométrico por tamizado y por método del hidrómetro, se analizó la distribución granulométrica del suelo natural, elaborando la curva granulométrica del mismo, el cual se muestra en la siguiente figura.

**Figura 84**

*Curva granulométrica del suelo natural*



Nota: Fuente propia.

A su vez, permite determinar la composición porcentual de gravas, arenas y finos por el ensayo granulometría por tamizado y la composición de limos y arcillas con el ensayo de hidrometría, que se encuentran presentes en el suelo de estudio.

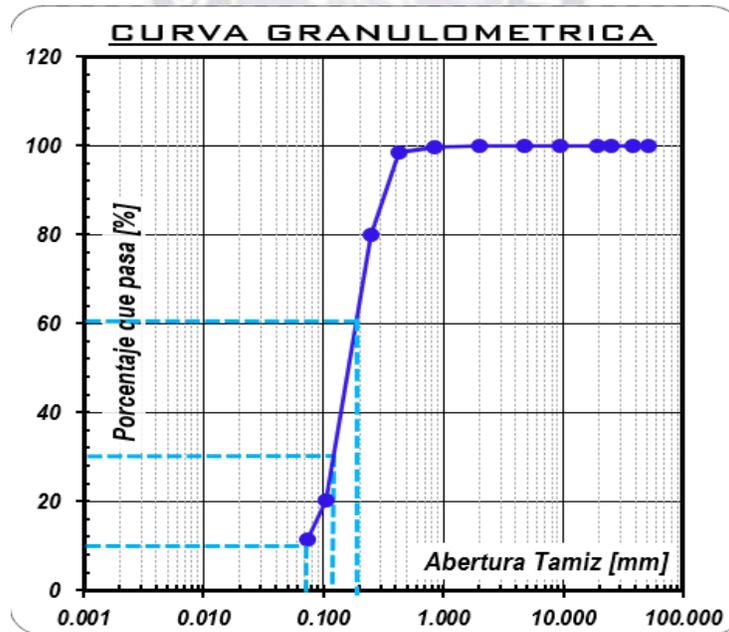
**Tabla 11**  
*Composición porcentual de suelo natural*

<b>Grava %</b>	<b>0.07</b>
<b>Arena %</b>	<b>88.56</b>
<b>Limo %</b>	<b>8.11</b>
<b>Arcilla %</b>	<b>3.27</b>

*Nota:* Fuente propia.

Además, mediante esta curva se determinó los diámetros de partícula para porcentajes que pasan el 10%, 30% y 60%, como se muestra a continuación.

**Figura 85**  
*Curva granulométrica por tamizado*



*Nota:* Fuente propia.

Siendo estos valores  $D_{10} = 0.075\text{mm}$ ,  $D_{30} = 0.13\text{mm}$  y  $D_{60} = 0.19\text{mm}$ , por último, con estos datos, se calculó los parámetros granulométricos coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y coeficiente de curvatura ( $C_c$ ).

**Tabla 12**

*Parámetros granulométricos Cu y Cc*

<i>Coefficiente de Uniformidad : Cu =</i>	<b>3.80</b>
<i>Coefficiente de Curvatura : Cc =</i>	<b>1.78</b>

*Nota:* Fuente propia.

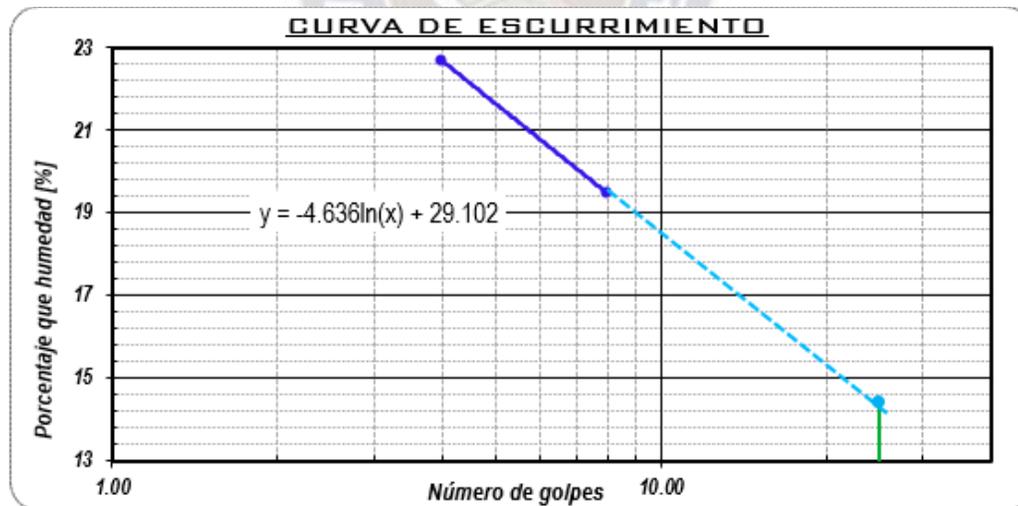
Las planillas de Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T27-82) y Análisis granulométrico por el método del hidrómetro (AASHTO T88-93) se encuentran en el Anexo A-2 y A-4 respectivamente.

#### 4.2.4 Límites de consistencia

A través del ensayo Límite líquido se elaboró la curva de escurrimiento (ver figura 86) y se determinó el límite de consistencia líquido, así también, este valor sirve para clasificar la muestra de suelo.

**Figura 86**

*Curva de escurrimiento del suelo natural*



*Nota:* Fuente propia.

**Tabla 13**

*Valor de límite líquido*

<i>Límite Líquido : LL=</i>	<b>14.18</b>	<i>Para 25 N° de golpes</i>
-----------------------------	--------------	-----------------------------

*Nota:* Fuente propia.

Al ser irrealizable el ensayo límite plástico por las características que presentaba el suelo al no presentar plasticidad, se concluye que es no plástico (NP).

La planilla de Límite Líquido (AASHTO T89-81) y Límite Plástico (AASHTO T90-70) se encuentran en el Anexo A-5.

#### 4.2.5 Clasificación de suelo

Se realizó la clasificación del suelo mediante el Sistema de Clasificación de suelos por los métodos AASHTO y SUCS, en base a los datos obtenidos por los laboratorios granulometría y límites de consistencia que se muestran a continuación:

**Tabla 14**

*Características del suelo para AASHTO*

DATOS DEL SUELO DE ESTUDIO	
<b>Porcentaje que pasa:</b>	
Nº 10 (2mm)	99.93
Nº 40 (0,425mm)	98.29
Nº 200 (0,075mm)	11.38
<b>Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40</b>	
Límite líquido	14.18
Índice de plasticidad	0.00
Índice de grupo (Es 0 por No Plástico)	0

Nota: Fuente propia.

**Tabla 15**

*Características del suelo para SUCS*

DATOS DEL SUELO DE ESTUDIO	
<b>Porcentaje que:</b>	
Nº 4 (4.76mm)	<b>Pasa</b> 99.93
Nº 40 (0,425mm)	98.29
Nº 200 (0,075mm)	11.38
<b>Porcentaje que:</b>	
Nº 4 (4.76mm)	<b>Retenido</b> 0.07
Nº 200 (0,075mm)	88.62
<b>Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40</b>	
Cu=	3.80
Cc=	1.78
Límite líquido	14.18
Índice de plasticidad	0
Índice de grupo	0

Nota: Fuente propia.

##### 4.2.5.1 Sistema de clasificación AASHTO

Se realizó la Clasificación AASHTO, con los datos ya mencionados (ver tabla 14) y en función a la siguiente tabla:

**Tabla 16**

*Clasificación AASHTO*

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2-4			A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6				
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- -	- -	35 máx	- -	- -	36 min	
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40  Límite líquido Índice de plasticidad	- 6 máx	- NP (1)	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo			

Nota: Fuente propia.

Se observa que el valor del porcentaje que pasa el tamiz N°10 y el porcentaje que pasa el tamiz N°40 es mayor a 50, entonces el suelo no pertenece al grupo A-1, así también, debido a que el valor del porcentaje que pasa el tamiz N°200 es mayor a 10 y menor a 36, entonces tampoco pertenece al grupo A-3, A-4, A-5, A-6 ni al grupo A-7, entonces se observa que las características del suelo si cumple con el grupo A-2 y para sub clasificar se utilizó la siguiente figura.

**Figura 87**

*Carta de plasticidad de AASHTO*



Nota: Fuente propia.

Con el valor del límite líquido e índice de plasticidad tanto en la Tabla 16 y la Figura 87 se afirma que según la clasificación AASTHO el suelo es:

### **Material granular A-2-4 (O) Arena con partículas finas limosas**

La planilla de Clasificación por AASHTO se encuentra en el Anexo A-6.

#### **4.2.5.2 S.U.C.C.**

Se realizó la Clasificación SUCS, con los datos ya mencionados (ver tabla 15) y en función a la siguiente tabla:

**Tabla 17**  
*Clasificación S.U.C.S.*

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolo del grupo	NOMBRES DEL GRUPO	
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz N° 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos) $Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW Gravas bien graduadas.	
		Gravas limpias (sin o con pocos finos) $Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP Gravas mal graduadas.	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos) $IP < 4$ o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM Gravas limosas.	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos) $IP > 7$ o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC Gravas arcillosas.	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias Menos del 5% pasa tamiz $Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW Arenas bien graduadas.	
		Arenas limpias Menos del 5% pasa tamiz $Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP Arenas mal graduadas.	
		Arenas con finos Mas del 12% pasa tamiz N°200 $IP < 4$ o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM Arenas limosas.	
		Arenas con finos Mas del 12% pasa tamiz N°200 $IP > 7$ o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC Arenas arcillosas.	
	SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Inorgánicos Limite líquido menor de 50	$IP > 7$ y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL Arcilla de baja plasticidad
			$IP < 4$ y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML Limo de baja plasticidad
		Limos y arcillas: Inorgánicos Limite líquido mayor de 50	Limite líquido - secado al horno $< 0.75$	OL Arcillas orgánicas.
			limite líquido - no secado $< 0.75$	OL Limos inorgánicos.
		Limos y arcillas: Inorgánicos Limite líquido mayor de 50	$IP > 7$ y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH Arcilla de alta plasticidad
			$IP < 4$ y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH Limo de alta plasticidad
Suelos muy orgánicos	Limite líquido - secado al horno $< 0.75$	OH Arcillas inorgánicas.		
	limite líquido - no secado $< 0.75$	OH Limos orgánicas.		
Suelos muy orgánicos		Principalmente materia orgánica	PT Turba.	

Nota: Fuente propia.

Según la clasificación SUCS el suelo es:

SP-SM                      Arena mal graduada con limo

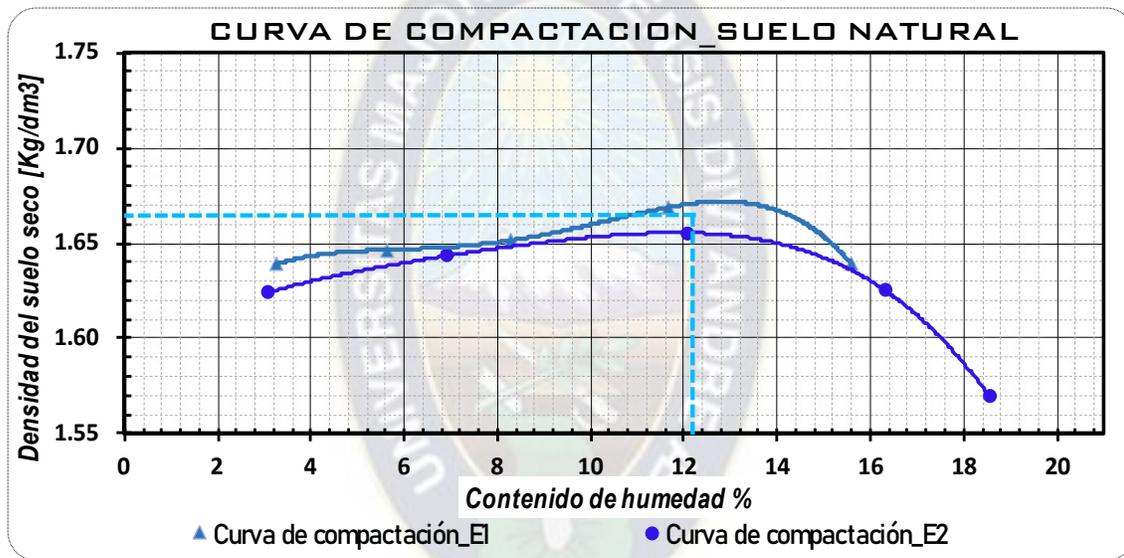
La planilla de Clasificación por SUCS se encuentra en el Anexo A-7.

#### 4.2.6 Compactación

A través del ensayo Compactación Proctor T-99 se elaboró la curva de compactación para el suelo natural (ver Figura 88).

**Figura 88**

*Curva de compactación Proctor T-99 Suelo natural*



*Nota:* Fuente propia.

Debido a que se realizó dos repeticiones del ensayo, mediante la gráfica se determinó los valores promedios de humedad óptima y densidad seca máxima.

**Tabla 18**

*Valores promedio del ensayo Proctor T-99*

**Densidad seca máxima = 1.664 kg/dm<sup>3</sup>**

**Humedad óptima = 12.25 %**

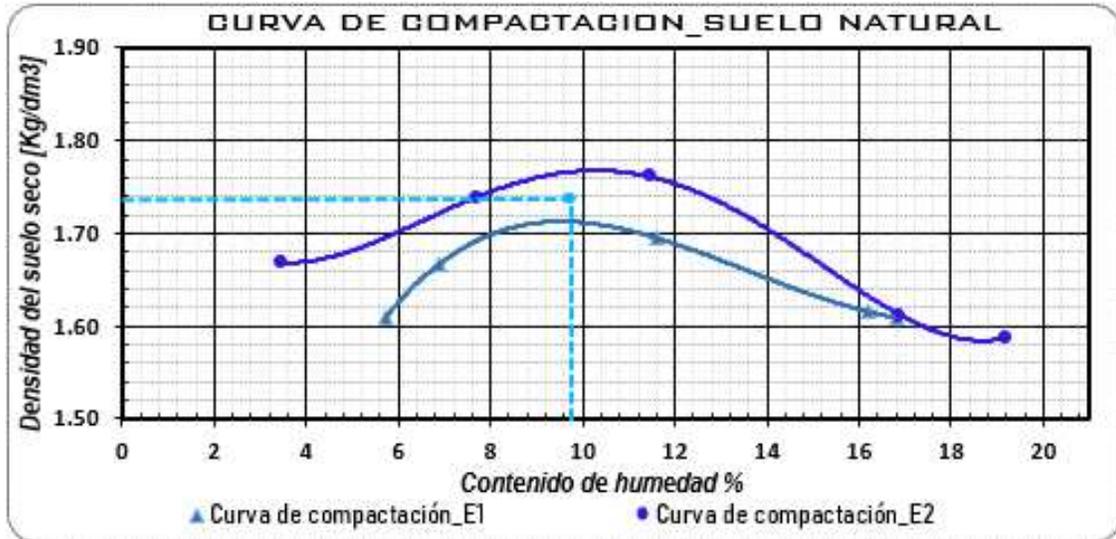
*Nota:* Fuente propia.

Las planillas de Proctor Estándar se encuentran en el Anexo A-8.

A través del ensayo Compactación Proctor T-180 se elaboró la curva de compactación para el suelo natural (ver Figura 89).

**Figura 89**

*Curva de compactación Proctor T-180*



*Nota:* Fuente propia.

Debido a que se realizó dos repeticiones del ensayo, mediante la gráfica se determinó los valores promedios de humedad óptima y densidad seca máxima.

**Tabla 19**

*Valores promedio del ensayo Proctor T-180*

*Densidad seca máxima = 1.738 kg/dm<sup>3</sup>*

*Humedad óptima = 9.96 %*

*Nota:* Fuente propia.

Las planillas de Proctor Modificado se encuentran en el Anexo A-9.

#### 4.2.7 CBR

Teniendo los datos del ensayo de compactación Proctor T-180, se realizó dos repeticiones de este laboratorio, de los cuales se calculó la expansión (ver Tabla 20) y se observó que el suelo de estudio solo presentó una expansión de 0.03% en el molde N°1 del primer ensayo, entonces se puede afirmar que el suelo areno limoso no es expansivo.

**Tabla 20***Cálculo de expansión CBR (Ensayo 1)*

Fecha	Hora	Tiempo Trans en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
			Lectur a	Expansión		Lectura Extens.	Expansión		Lectur a	Expansión	
				1"x10 <sup>3</sup>	%		1"x10 <sup>3</sup>	%		1"x10 <sup>3</sup>	%
4-abr	11:00	0	193	0.193		32	0.032		10	0.010	
5-abr	11:00	1	194	0.194		32	0.032		10	0.010	
6-abr	11:00	2	-	-		-	-		-	-	
7-abr	11:00	3	-	-		-	-		-	-	
8-abr	11:00	4	194	0.194	<b>0.02</b>	32	0.032	<b>0</b>	10	0.010	<b>0</b>

Nota: Fuente propia.

Así también, se cálculo el valor de CBR para una penetración de 0.1 plg y 0.2 plg, con la siguiente fórmula, hallando así la carga aplicada en libras (fórmula para el anillo de carga PR-70, el cual se utilizó al momento de realizar el ensayo):

$$Carga(Lb) = (0.17457 * X + 0.20729) * 225$$

Donde: X=lectura del anillo de carga.

**Tabla 21***Valor promedio de CBR*

PROMEDIO		
%	Ds <sub>max</sub> kg/dm <sup>3</sup>	CBR
100%	1.714	42.0
97%	1.663	35.5
95%	1.628	28.5

Nota: Fuente propia.

Las planillas de CBR se encuentran en el Anexo A-10.

Se observa que el valor de CBR al 95% de su densidad seca del suelo natural, cumple con el requerimiento para ser utilizado como una capa subrasante de acuerdo a la Figura 9, por lo tanto, debido a que la investigación trata de la estabilización del suelo para su uso como capa subrasante y el suelo de estudio ya cumple con los requerimientos anteriormente indicados, se decidió continuar con la investigación a fin de estudiar el comportamiento de la ceniza de eucalipto como agente estabilizador puesto que tiene características puzolánicas (similares a la del cemento), a fin de establecer su utilidad en la estabilización en un suelo areno limoso a nivel de capa subbase o

base, lo que significaría la reducción de espesores de diseño que implicaría un efecto significativo en el aspecto económico de un proyecto carretero.

#### 4.2.8 *Compresión Simple*

Este ensayo se realizó para tener una idea de la resistencia que tiene el suelo natural, siendo preparado las probetas con la humedad óptima, teniendo un curado húmedo de 7 días y sin ser sumergido antes de realizar la compresión. El ensayo se realizó dos veces, se verificó las condiciones del moldeado de las probetas, donde todas las probetas cumplieron con la tolerancia de 1% y 0.048 kg/dm<sup>3</sup> en humedad y densidad seca respectivamente, entonces no fueron descartadas ninguna de ellas y se cálculo la resistencia, teniendo un valor promedio de resistencia.

**Tabla 22**

*Valor promedio de la resistencia a compresión (7 días)*

<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>		
<b>Resistencia promedio :</b>	<b>Mpa</b>	<b>0.228</b>

*Nota:* Fuente propia.

Se puede ver que no cumple con el valor mínimo de resistencia (ver Figura 95), por tanto, se debe estabilizar.

La planilla de Compresión Simple se encuentra en el Anexo A-11.

#### 4.2.9 *Durabilidad*

Para tener una idea del porcentaje de pérdida en peso del suelo natural, se realizó el ensayo de la siguiente manera, teniendo la probeta moldeada, se dejó en curado húmedo por 7 días y se realizó las cepilladas a la probeta sin sumergirlas al agua, y solo por una única vez, se calculó el porcentaje de pérdida con las siguientes fórmulas:

$$P_{sc} = \frac{P_f}{A+100} * 100$$

$$\%P = \frac{P_{si} - P_{sc}}{P_{si}} * 100$$

Donde:  $P_{sc}$  = Peso seco final corregido,  $P_f$  = Peso seco a 110°C,  $A$  = porcentaje de agua retenida,  $P_{si}$  = Peso seco inicial calculado,  $\%P$  = Porcentaje de pérdida en peso.

El valor de A se adoptó de la Tabla 23 considerando el tipo de suelo, luego se halló el porcentaje de pérdida para un ciclo.

**Tabla 23**  
*Porcentaje de agua retenido*

Clasificación de suelos según AASHTO (M 145)	Agua retenida (%)
A1, A3	1,5
A2	2,5
A4, A5	3,0
A6, A7	3,5

*Nota:* Fuente propia.

**Tabla 24**  
*Porcentaje de pérdida en peso suelo natural (1 Ciclo)*

CALCULO DE PORCENTAJE DE PERDIDA EN PESO	
<i>Peso húmedo inicial : PH=</i>	1763.0
<i>Humedad : H =</i>	13.02
<i>Peso seco inicial : Psi =</i>	1559.92
<i>Peso seco final : Pf=</i>	1444.90
<i>Porcentaje de agua retenida:</i>	2.5
<i>Porcentaje seco corregido Psc :</i>	1409.66
<i>Porcentaje de pérdida %P:</i>	9.63 %

*Nota:* Fuente propia.

Se tiene 3.59 de porcentaje pérdida de solo un ciclo, considerando que se perdería este porcentaje en cada ciclo, entonces al realizar los 12 se tendría una pérdida la cual no cumpliría con el máximo porcentaje de pérdida admitida para este tipo de suelo 14% como indica la tabla 6, entonces se debe de estabilizar el suelo mejorando la durabilidad al mojado y secado.

#### 4.3 Análisis de la dosificación de estabilización de suelo-cemento

La metodología de dosificación que se siguió en el presente proyecto para obtener el porcentaje óptimo de cemento que se requiere para estabilizar el suelo de estudio es la PCA, para ello se determinó las características del suelo donde se tomó en cuenta su propia escala de clasificación de suelo como se observa a continuación:

**Tabla 25**

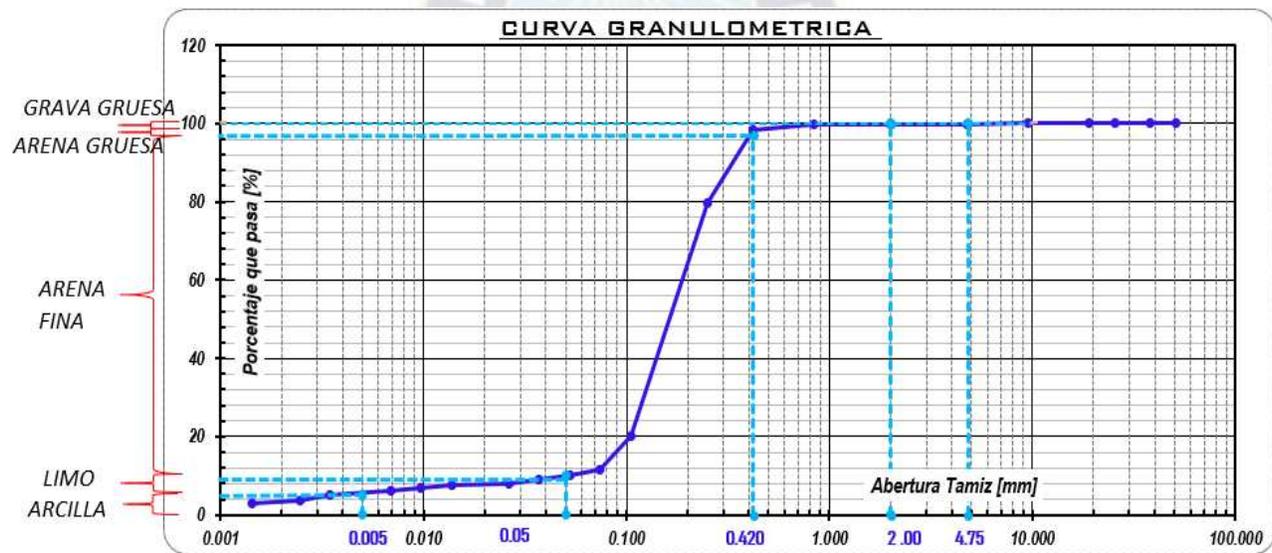
*Composición porcentual del suelo natural según la PCA*

<b>GRAVA</b> =	<b>0.07</b>	% pasa 3" (75 mm) y retiene en la malla N° 10 (2 mm)
<b>GRAVA GRUESA</b> =	0.07	% pasa 3" (75 mm) y retiene en la malla N° 4" (4.76 mm)
<b>GRAVA FINA</b> =	0.00	% pasa N°4" (4.76 mm) y retiene en la malla N°10 (2 mm)
<b>ARENA</b> =	<b>90.00</b>	% pasa la malla N° 4 (4.75 mm) y menor (0.05 mm)
<b>ARENA GRUESA</b> =	1.64	% pasa la malla N° 10 (2 mm) y retiene en la malla N° 40 (0.42 mm)
<b>ARENA FINA</b> =	88.36	% pasa la malla N° 40 (0.420 mm) y menor (0.05 mm)
<b>LIMO Y ARCILLA</b> =	<b>9.93</b>	% con diámetro equivalente de 0.05 e inferior a 0.005 mm
<b>LIMO</b> =	4.43	% con diámetro equivalente de 0.005 mm a 0.05 mm
<b>ARCILLA</b> =	5.50	% con diámetro equivalente inferior a 0.005 mm

Nota: Fuente propia.

**Figura 90**

*Clasificación del suelo según la PCA*



Nota: Fuente propia.

Teniendo la clasificación del suelo según la escala de la PCA, se optó por usar la Norma de Dosificación Simplificada de la Portland Cement Association (PCA), ya que cumple con lo que menciona Rocha “El uso del método se restringe a suelos que contengan un máximo de 50 % de partículas con diámetro equivalente inferior a 0,05 mm (limo y arcilla) y un máximo de 20 % de partículas con diámetro equivalente inferior a 0,005 mm (arcilla)” (2002, p. 20).

Siendo estos porcentajes los siguientes:

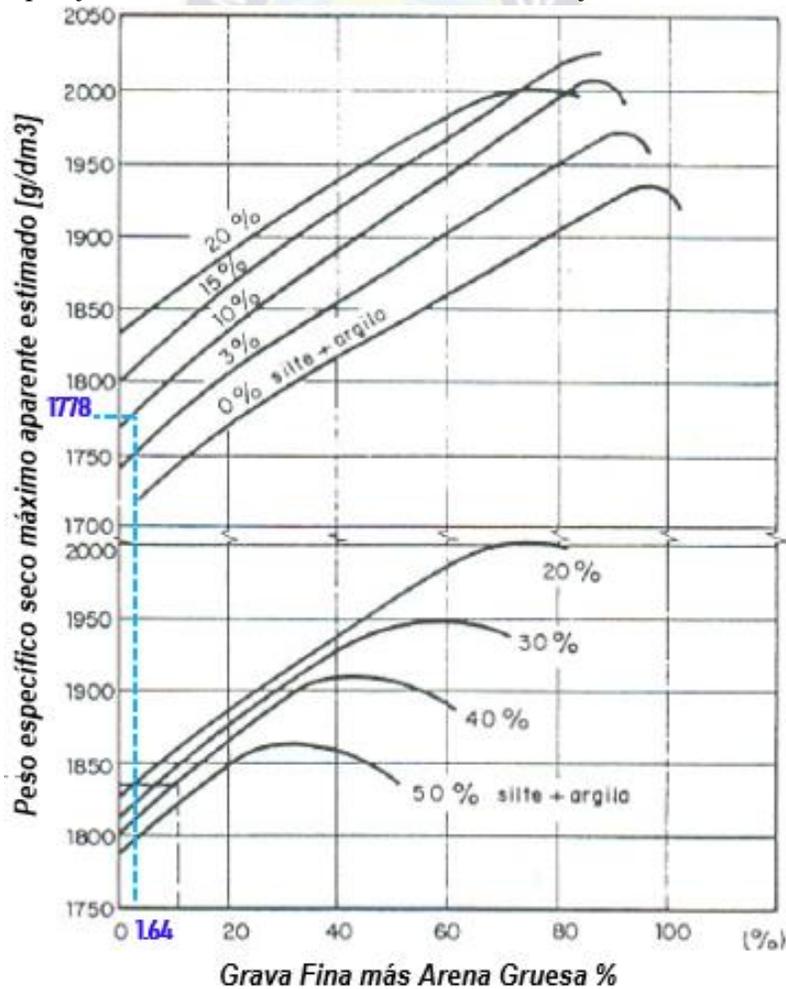
*Limo y Arcilla* = **9.93** % con diámetro equivalente de 0.05 e inferior a 0.005 mm  
*Arcilla* = **5.50** % con diámetro equivalente inferior a 0.005 mm

Posterior a ello como indica la norma, se estimó el peso específico seco máximo aparente de la mezcla suelo cemento, según la siguiente gráfica (ver Figura 91), considerando el porcentaje de limo más arcilla y el porcentaje de grava fina más arena gruesa, siendo estos valores los siguientes:

**Porcentaje de Limo + Arcilla = 9.93 %**  
**Porcentaje de Grava Fina + Arena Gruesa = 1.64 %**

**Figura 91**

*Peso específico seco máximo estimado vs %Grava fina más Arena gruesa*



*Nota:* Gráfica Tomado de *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación* (p. 21), por Rocha, 2002. Fuente propia.

De la Figura 29 se estimó que el Peso específico seco máximo aparente: 1778 [g/dm<sup>3</sup>]

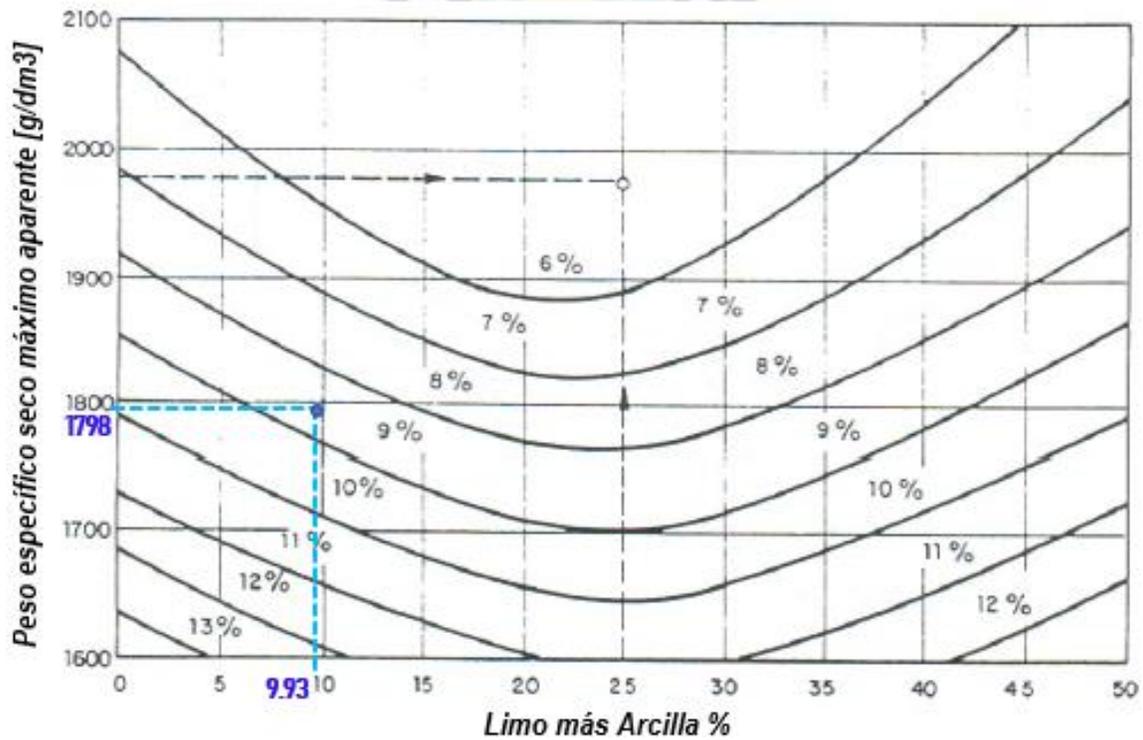
Teniendo este valor estimado, se utilizó la siguiente gráfica (Ver Figura 92) para estimar la cantidad de cemento, considerando el porcentaje de limo más arcilla y el peso específico seco máximo aparente, siendo estos valores los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de Limo + Arcilla} &= & \mathbf{9.93 \%} \\ \text{Peso específico aparente estimado} &= & \mathbf{1778.00 \text{ [g/dm}^3\text{]}} \end{aligned}$$

Según la figura se observa que el % de cemento recomendado es: 9%

**Figura 92**

*Cantidad de cemento en peso indicado*

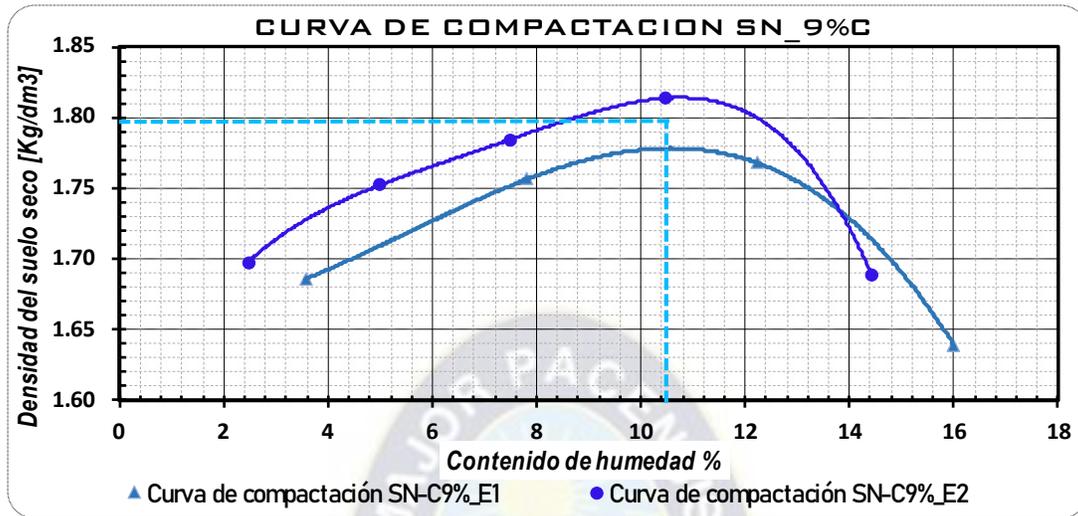


*Nota:* Gráfica Tomado de *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación* (p. 22), por Rocha, 2002. Fuente propia.

Con un porcentaje de cemento de 9%, se realizó dos repeticiones del ensayo de compactación Proctor Estándar T-99 del cual se elaboró la siguiente curva de compactación.

**Figura 93**

*Curva de compactación Proctor T-99 Suelo-Cemento (D-I)*



*Nota:* Donde D-I = Dosificación 1 (Suelo Cemento 9%). Fuente propia.

Mediante la gráfica se determinó los valores promedios de humedad óptima y se determinó el verdadero peso específico máximo.

**Tabla 26**

*Valores promedio del ensayo Proctor T-99 Suelo-Cemento (D-I)*

$$\text{Densidad seca máxima} = 1.796 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Humedad óptima} = 10.50 \%$$

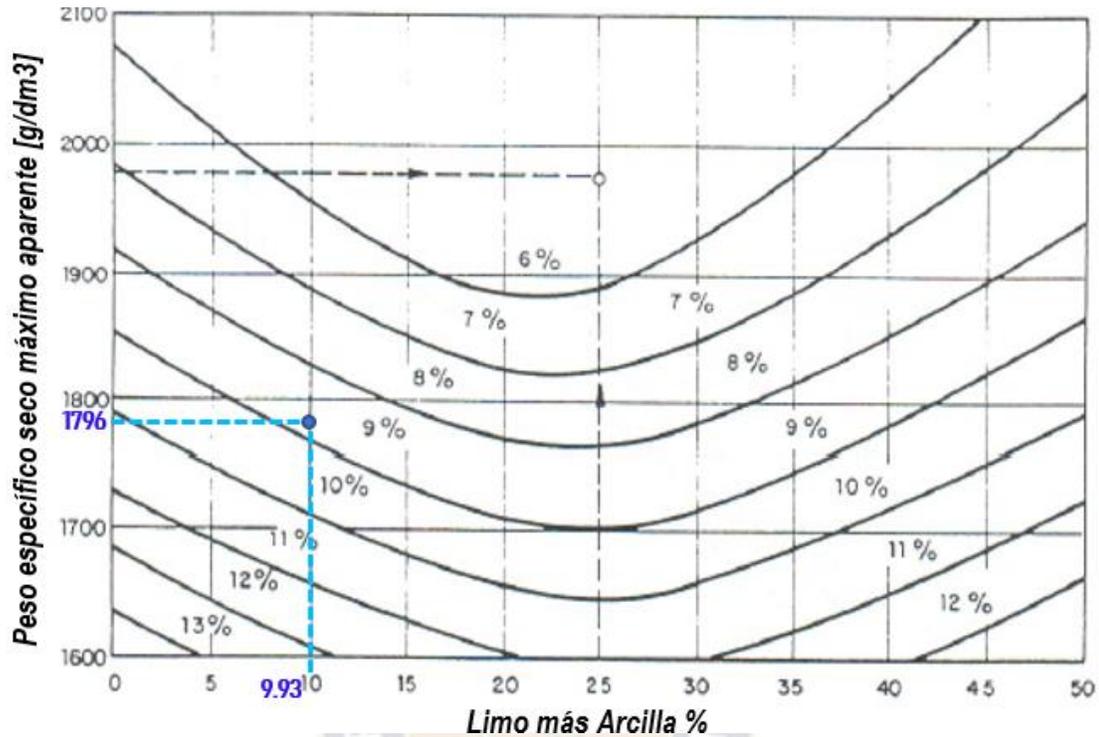
*Nota:* Fuente propia.

Las planillas de Proctor Estándar para suelo cemento 9% (D-I), se encuentran en el Anexo B-1.

Teniendo el valor verdadero del peso específico, se utilizó la Figura 92 para determinar la cantidad de cemento en peso que estabiliza el suelo de estudio, considerando el porcentaje de limo más arcilla y el peso específico seco máximo real.

**Figura 94**

*Cantidad de cemento en peso (Verdadero valor peso específico máximo)*



*Nota:* Fuente propia.

Finalmente se verificó si es adecuado el porcentaje de 9%, para ello se realizó el ensayo de Compresión simple como indica el acápite 3.5.2, hallando el valor promedio de resistencia (Ver Tabla 27) que debe estar por encima de la curva de la siguiente gráfica (Ver Figura 95) a un porcentaje de limo más arcilla.

**Tabla 27**

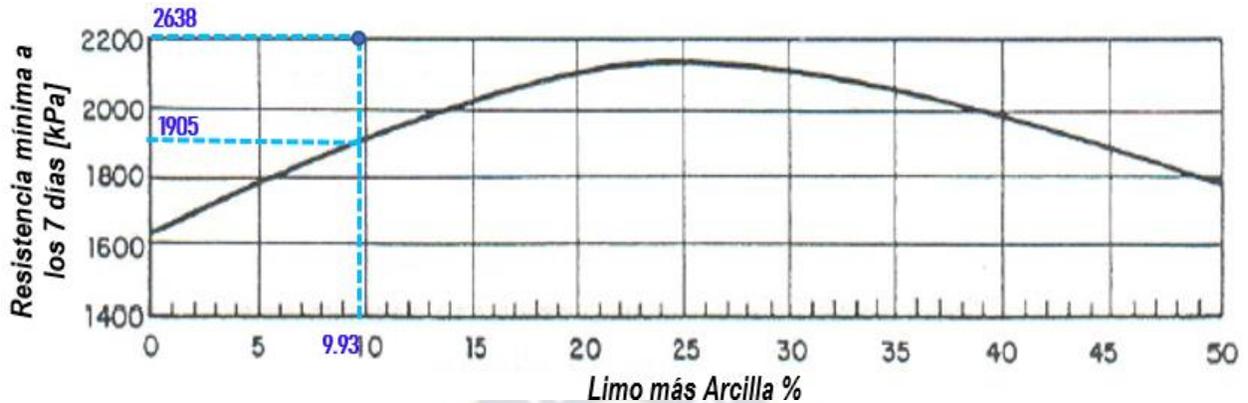
*Valor promedio de la resistencia a compresión (7 días) Suelo-Cemento*

COMPRESION A 7 DIAS				
Especimen N°		M1_C	M2_C	M3_C
Diametro :	D [cm]	10.240	10.220	10.125
Altura :	H [cm]	11.550	11.620	11.495
Area :	cm <sup>2</sup>	82.35	82.03	80.52
Carga total de fatiga :	KN	22.00	21.60	21.00
Resistencia :	Mpa	2.671	2.633	2.608
Resistencia promedio :	Mpa		2.638	

*Nota:* Fuente propia.

**Figura 95**

*Resistencia a compresión mínima admisible ensayadas a los 7 días*



*Nota:* Gráfica Tomado de *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación* (p. 22), por Rocha, 2002. Fuente propia.

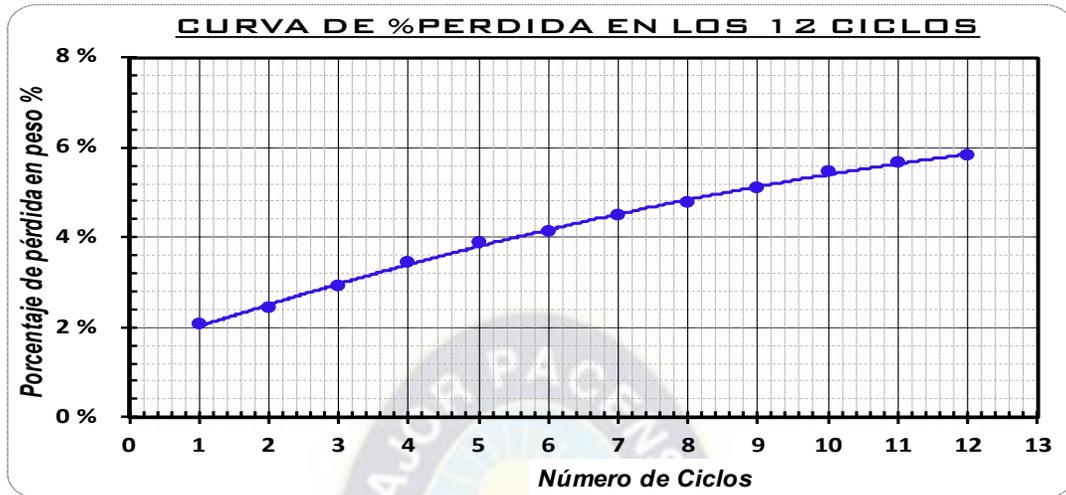
De la figura se observa que, para el suelo de estudio el valor de resistencia mínima es 1905 kPa y la resistencia promedio hallado del ensayo de compresión fue 2638 kPa, entonces se puede afirmar que este porcentaje de cemento es óptimo para la estabilización del suelo.

La planilla del ensayo Compresión Simple de suelo cemento 9% (D-I) se encuentran en el Anexo B-2.

Para verificar el porcentaje se realizó el ensayo de durabilidad por mojado y secado como indica el acápite 3.5.3 en donde la tolerancia de durabilidad según el suelo de estudio A-2-4, se observa en la Tabla 6 que el porcentaje máximo admisible de pérdida de peso de la muestra de ensayo es 14%.

**Figura 96**

*Curva de %pérdida en 12 Ciclo Suelo-Cemento (D-I)*



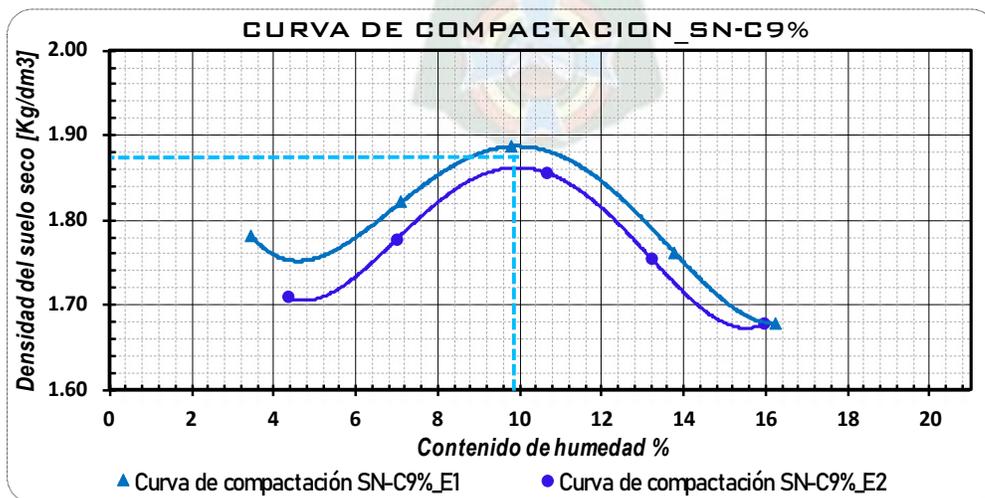
Nota: Fuente propia.

El valor de porcentaje de pérdida después de los 12 ciclos fue de 5.89% siendo menor al máximo admisible, entonces se afirma el % de cemento estabiliza el suelo. La planilla del ensayo Durabilidad por mojado y secado de suelo cemento 9% (D-I) se encuentran en el Anexo B-3.

Además, se realizó el ensayo de compactación Proctor T-180 para el suelo con 9% de cemento determinando la humedad óptima.

**Figura 97**

*Curva de compactación Proctor T-180 Suelo-Cemento (D-I)*



*Nota:* Donde D-I = Dosificación 1, Ei = Ensayo N<sup>o</sup>i. Fuente propia.

**Tabla 28**

*Valores promedio del ensayo Proctor T-180 Suelo-Cemento (D-I)*

$$\begin{aligned} \text{Densidad seca máxima} &= \mathbf{1.875 \text{ kg/dm}^3} \\ \text{Humedad óptima} &= \mathbf{9.90 \%} \end{aligned}$$

*Nota:* Fuente propia.

Las planillas de Proctor T-180 suelo cemento 9% (D-I) se encuentran en el Anexo B-4.

Por último, se realizó el ensayo de CBR teniendo la limitación por el anillo de carga como se mencionó, solo se determinó el valor de CBR al 94% = 150.8. Este valor de CBR es apto para su uso como capa subbase y base.

La planilla de CBR suelo cemento 9% (D-I) se encuentran en el Anexo B-5.

#### **4.4 Análisis comparativo de ensayos suelo-ceniza de eucalipto-cemento**

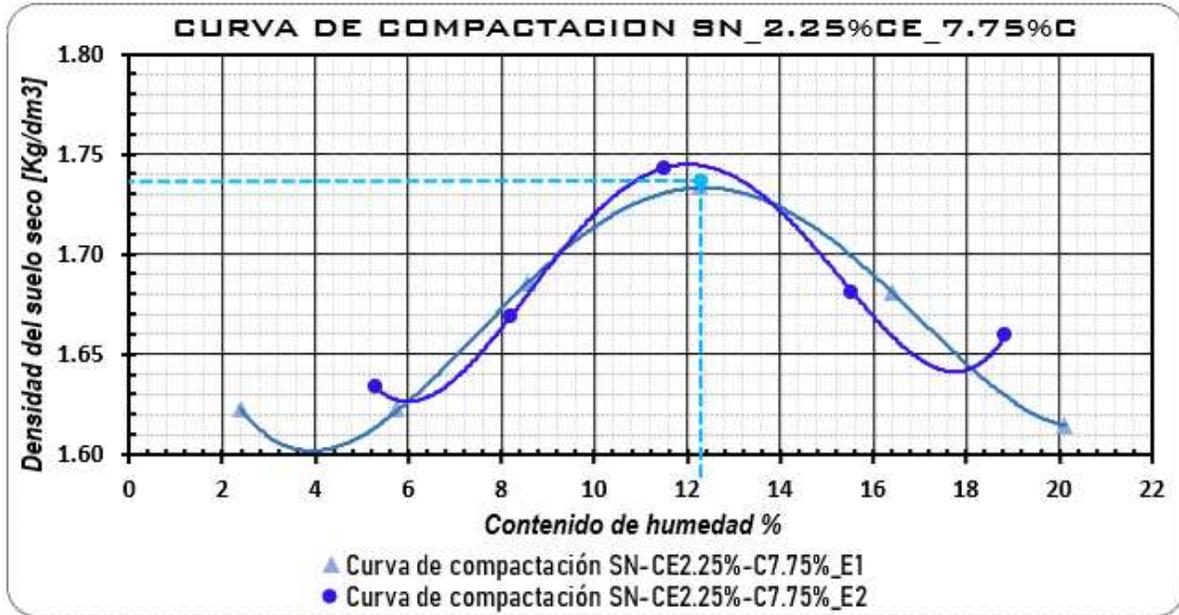
Se realizó ensayos de compactación Proctor T-99, Compresión simple y Durabilidad para las combinaciones como se indica en la Tabla 8, para hallar el valor óptimo de ceniza de eucalipto y cemento que cumplan con el valor mínimo admisible de resistencia de 1905 KPa y el máximo porcentaje de pérdida 14%.

##### **4.4.1 Compactación**

Se realizó dos repeticiones por cada dosificación, a través de los resultados se elaboró las curvas de compactación y se halló el valor promedio de la humedad óptima y densidad seca máxima como se muestra en las siguientes figuras:

**Figura 98**

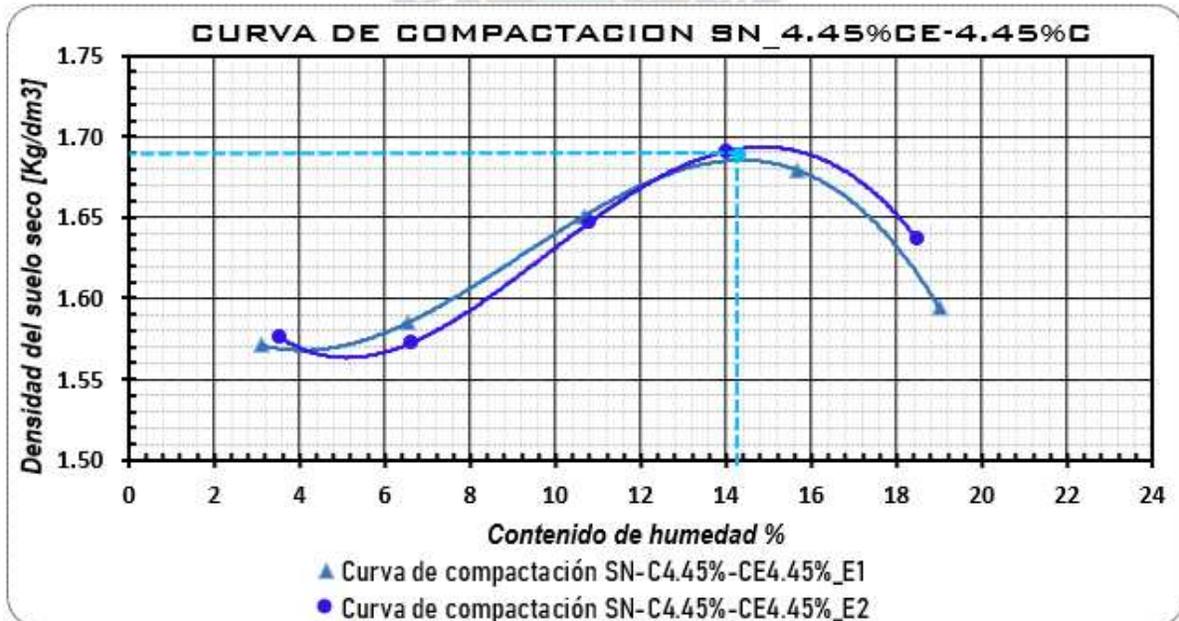
*Curva de compactación Proctor T-99 Ceniza de eucalipto-Cemento (D-II)*



Nota: Donde D-II = Dosificación 2, Ei = Ensayo N°i. Fuente propia.

**Figura 99**

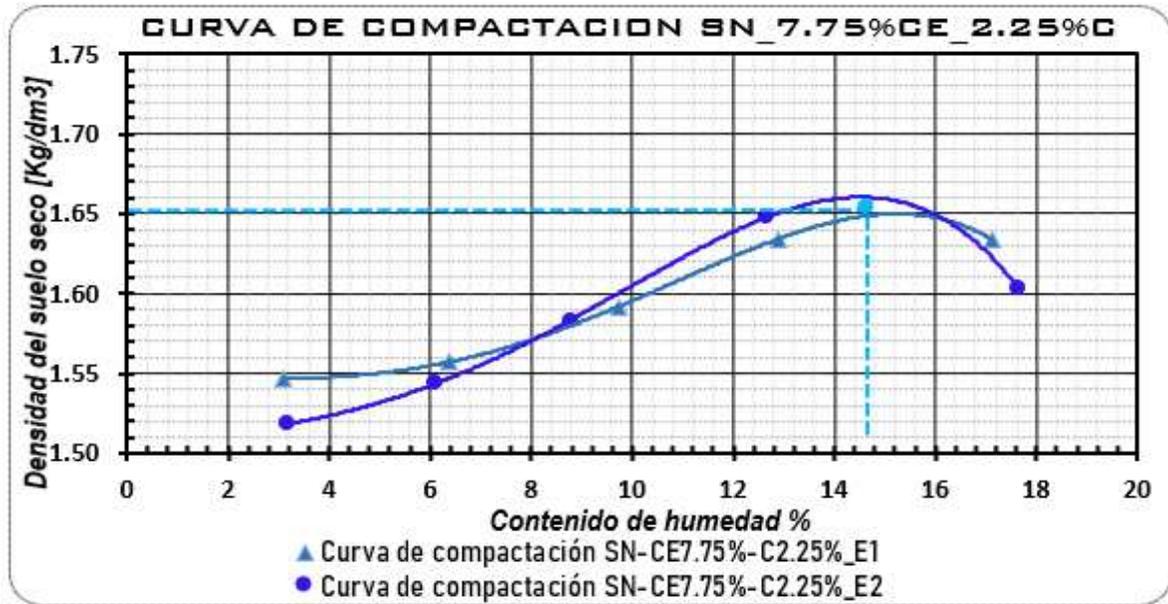
*Curva de compactación Proctor T-99 Ceniza de eucalipto-Cemento (D-III)*



Nota: Donde D-III = Dosificación 3, Ei = Ensayo N°i. Fuente propia.

**Figura 100**

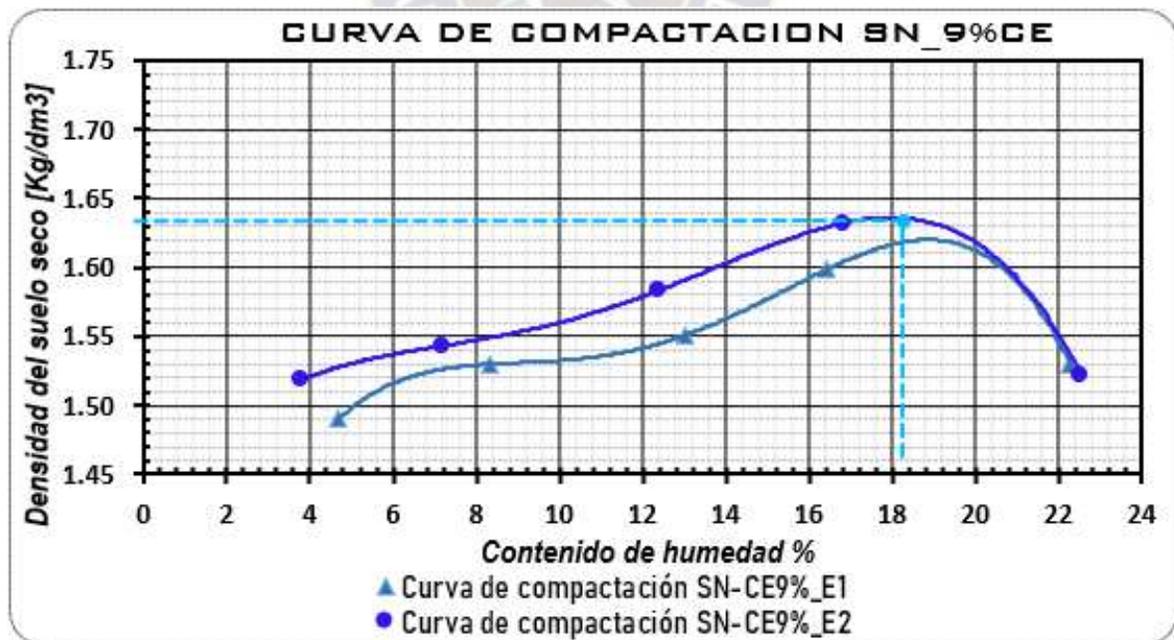
*Curva de compactación Proctor T-99 Ceniza de eucalipto-Cemento (D-IV)*



Nota: Donde D-IV = Dosificación 4, Ei = Ensayo N<sup>o</sup>i. Fuente propia.

**Figura 101**

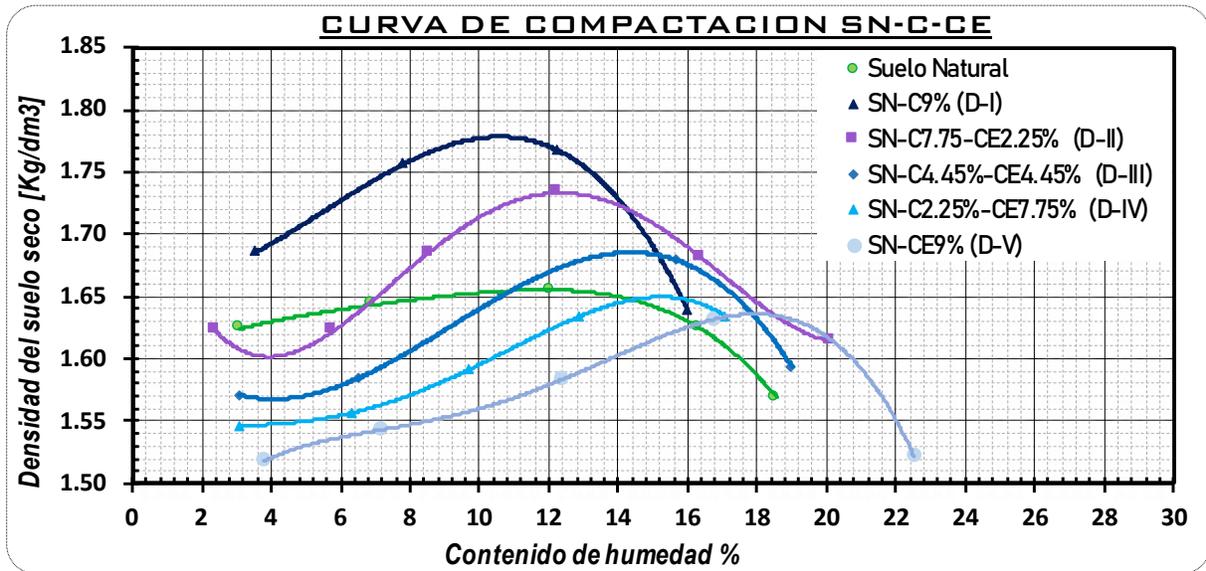
*Curva de compactación Proctor T-99 Suelo-Ceniza de eucalipto-Cemento (D-V)*



Nota: Donde D-V = Dosificación 5, Ei = Ensayo N<sup>o</sup>i. Fuente propia.

**Figura 102**

*Curvas de compactación*



Nota: Fuente propia

**Tabla 29**

*Valor promedio Hop y Ds max para diferentes % de ceniza de eucalipto y cemento*

DOSIFICACIONES	%Hop	Ds max Kg/dm <sup>3</sup>
SN	12.25	1.66
SN +9% C	10.50	1.80
SN+2.25%CE+ 6.75%C	12.15	1.74
SN+4.50%CE+4.50%C	14.10	1.69
SN+6.75%CE +2.25%C	15.00	1.66
SN + 9% CE	18.30	1.63

Nota: Fuente propia.

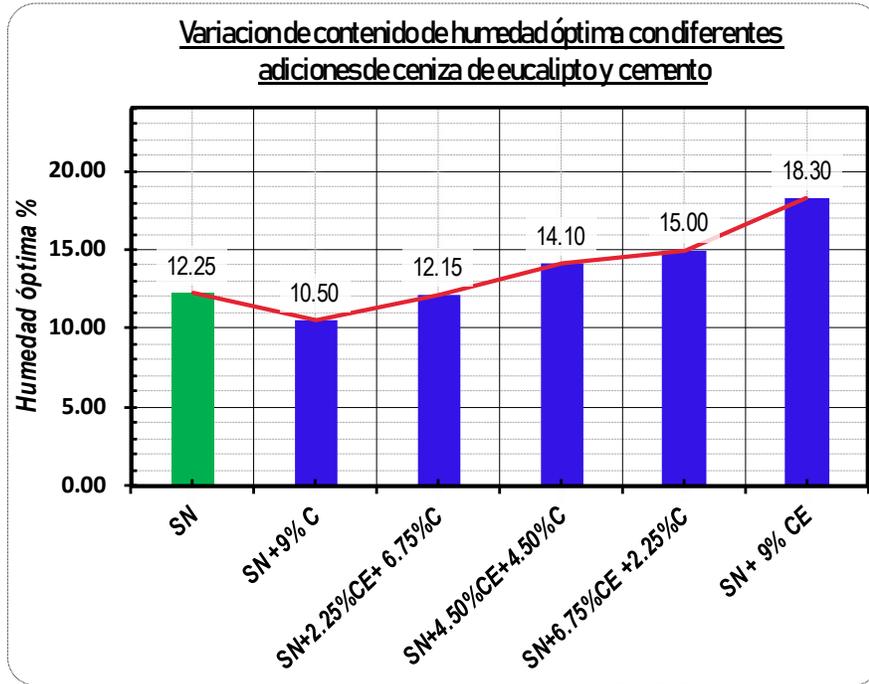
Las planillas del ensayo Proctor T-99 de las dosificaciones D-II, D-III, D-IV y D-V se encuentran en el Anexo C-1, Anexo C-4, Anexo C-7 y Anexo C-10 respectivamente.

#### 4.4.1.1 Análisis de humedad óptima y densidad seca máxima

Se realizó el análisis de la variación que presentó la humedad óptima en las diferentes dosificaciones de suelo, ceniza de eucalipto y cemento, como se observa en la figura 103 se muestra la variación que presenta el contenido de humedad.

**Figura 103**

*Análisis de contenido de humedad óptima*



*Nota:* Fuente propia.

**Tabla 30**

*Variación de %Hop respecto a la dosificación D-I*

DOSIFICACIONES	%Hop	% Variación
SN	12.25	-1.750
SN + 9%C	10.50	-
SN+2.25%CE+ 6.75%C	12.15	+1.650
SN+4.50%CE+4.50%C	14.10	+3.600
SN+6.75%CE+2.25%C	15.00	+4.500
SN + 9% CE	18.30	+7.800

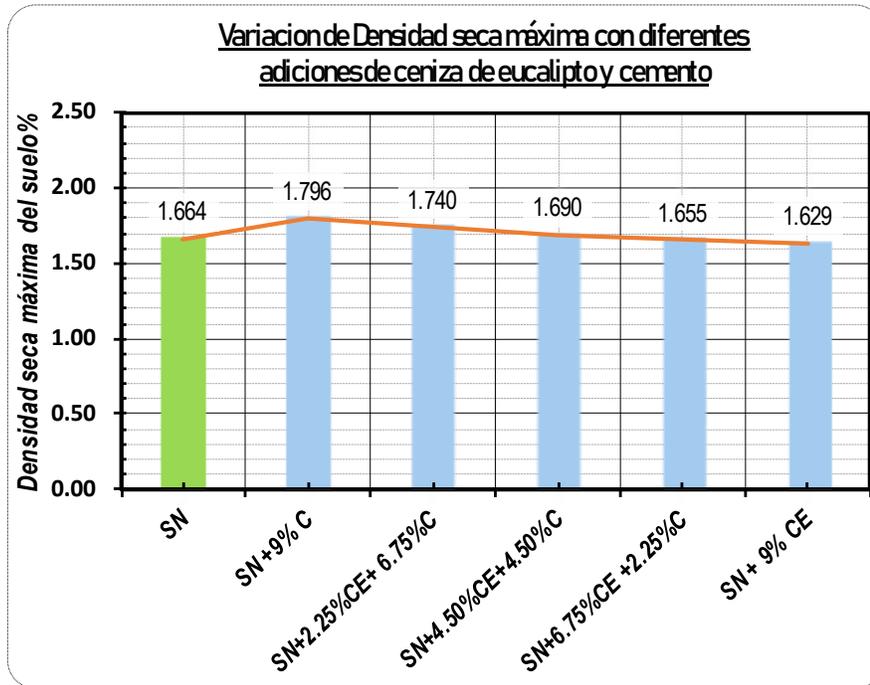
*Nota:* Fuente propia.

De la Figura 103 y la Tabla 30 se puede observar, que a medida que se va adicionando la ceniza de eucalipto y disminuyendo cantidad de cemento, el valor de la humedad óptima va aumentando respecto a la mezcla suelo cemento, esto se debe a que el cemento y la ceniza de eucalipto son materiales finos y presenta más absorción de humedad, por tanto, se debe tener ciertas consideraciones en cuanto al valor de humedad óptima, debido a que se sabe que las

propiedades favorables del cemento no son bien aprovechadas con la presencia de abundante agua y como se supone que la ceniza de eucalipto presenta algunas similitudes, entonces si la humedad óptima es muy alta se debe corregir restando en un por ciento a este valor.

**Figura 104**

*Análisis de densidad seca máxima suelo-ceniza de eucalipto-cemento*



Nota: Fuente propia.

**Tabla 31**

*Variación de Ds max respecto a la dosificación D-I*

DOSIFICACIONES	Ds max	% Variación
SN	1.66	+0.132
SN +9% C	1.80	-
SN+2.25%CE+ 6.75%C	1.74	-0.056
SN+4.50%CE+4.50%C	1.69	-0.106
SN+6.75%CE +2.25%C	1.66	-0.141
SN + 9% CE	1.63	-0.167

Nota: Fuente propia.

Como se observa en la Figura 104 y la Tabla 31 la variación de la densidad seca máxima respecto a la dosificación suelo cemento es de forma descendente, tal que su valor va disminuyendo a medida que se va adicionando ceniza y reduciendo la cantidad de cemento esto se debe a que la ceniza de eucalipto es un material liviano, por tanto, reduce el peso total a usar al momento de realizar el laboratorio.

#### 4.4.2 Compresión Simple

Se realizó tres probetas por cada dosificación, a través de los resultados se verificó el moldeado de probetas y se cálculo el valor promedio de resistencia a compresión para cada dosificación como se muestra en las siguientes Tablas:

**Tabla 32**  
*Resistencia promedio a 7 días (D-II)*

<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>				
<i>Especimen N°</i>		<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>
<i>Diametro :</i>	<b>D [cm]</b>	10.135	10.185	10.195
<i>Altura :</i>	<b>H [cm]</b>	11.520	11.580	11.545
<i>Area :</i>	<b>cm<sup>2</sup></b>	80.67	81.47	81.63
<i>Carga total de fatiga :</i>	<b>KN</b>	16.60	16.40	17.50
<i>Resistencia :</i>	<b>Mpa</b>	<b>2.06</b>	<b>2.01</b>	<b>2.14</b>
<i>Resistencia promedio :</i>	<b>Mpa</b>	<b>2.07</b>		

*Nota:* Fuente propia.

**Tabla 33**  
*Resistencia promedio a 7 días (D-III)*

<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>				
<i>Especimen N°</i>		<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>
<i>Diametro :</i>	<b>D [cm]</b>		10.160	10.155
<i>Altura :</i>	<b>H [cm]</b>		11.405	11.495
<i>Area :</i>	<b>cm<sup>2</sup></b>	-	81.07	80.99
<i>Carga total de fatiga :</i>	<b>KN</b>		12.40	13.20
<i>Resistencia :</i>	<b>Mpa</b>		<b>1.53</b>	<b>1.63</b>
<i>Resistencia promedio :</i>	<b>Mpa</b>		<b>1.58</b>	

*Nota:* Fuente propia.

**Tabla 34***Resistencia promedio a 7 días (D-IV)*

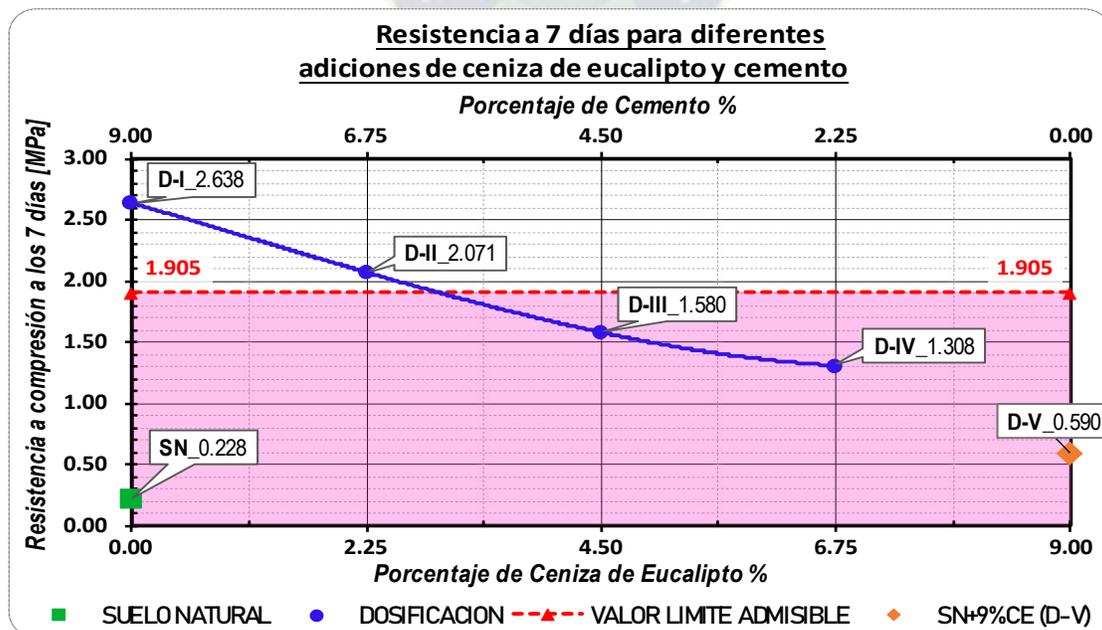
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>				
Especimen N°		M1_C	M2_C	M3_C
Diametro :	D [cm]	10.165	10.18	10.175
Altura :	H [cm]	11.485	11.515	11.495
Area :	cm <sup>2</sup>	81.15	81.39	81.31
Carga total de fatiga :	KN	10.80	10.70	10.40
Resistencia :	Mpa	1.33	1.31	1.28
Resistencia promedio :	Mpa	1.31		

Nota: Fuente propia.

**Tabla 35***Resistencia promedio a 7 días (D-V)*

<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>				
Especimen N°		M1_C	M2_C	M3_C
Diametro :	D [cm]	10.120	10.135	
Altura :	H [cm]	11.490	11.515	
Area :	cm <sup>2</sup>	80.44	80.67	
Carga total de fatiga :	KN	4.80	4.70	
Resistencia :	Mpa	0.60	0.58	
Resistencia promedio :	Mpa	0.59		

Nota: Fuente propia.

**Figura 105***Variación de resistencia a 7 días*

Nota: Fuente propia.

**Tabla 36**

*Resistencia a 7 días*

DOSIFICACIÓN	RESISTENCIA A 7 DIAS MPa
SUELO NATURAL	0.228
D-I: SN +9% C	2.638
D-II: SN+2.25%CE+ 6.75%C	2.071
D-III: SN+4.50%CE+4.50%C	1.580
D-IV: SN+6.75%CE +2.25%C	1.308
D-V: SN+9%CE	0.590

*Nota:* Fuente propia.

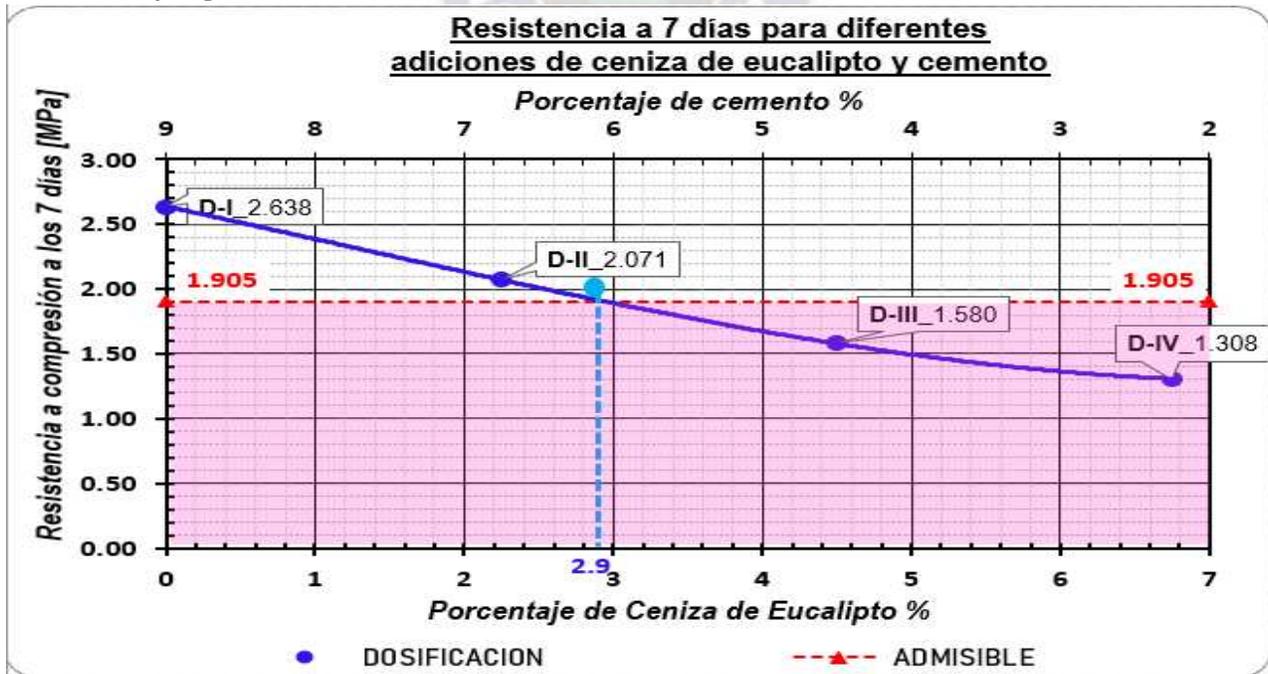
Las planillas del ensayo Compresión Simple de las dosificaciones D-II, D-III, D-IV y D-V se encuentran en el Anexo C-2, Anexo C-5, Anexo C-8 y Anexo C-11 respectivamente.

#### 4.4.2.1 Análisis de resistencia a compresión a 7 días

Como se observa en la Figura 105 la mezcla SN + 9%CE (D-V) se representa como un punto debido a que el procedimiento para hallar la resistencia fue sin sumergir al agua.

**Figura 106**

*Porcentaje óptimo en base a la resistencia*



*Nota:* Fuente propia.

Además, se observa que el valor de la resistencia a 7 días va disminuyendo a medida que se aumenta la cantidad de ceniza de eucalipto y reduce el cemento. En todas las combinaciones el valor de la resistencia es mayor a la del suelo natural y solo las combinaciones D-I y D-II son las que cumplen con la resistencia mínima admisible de 1.905 KPa.

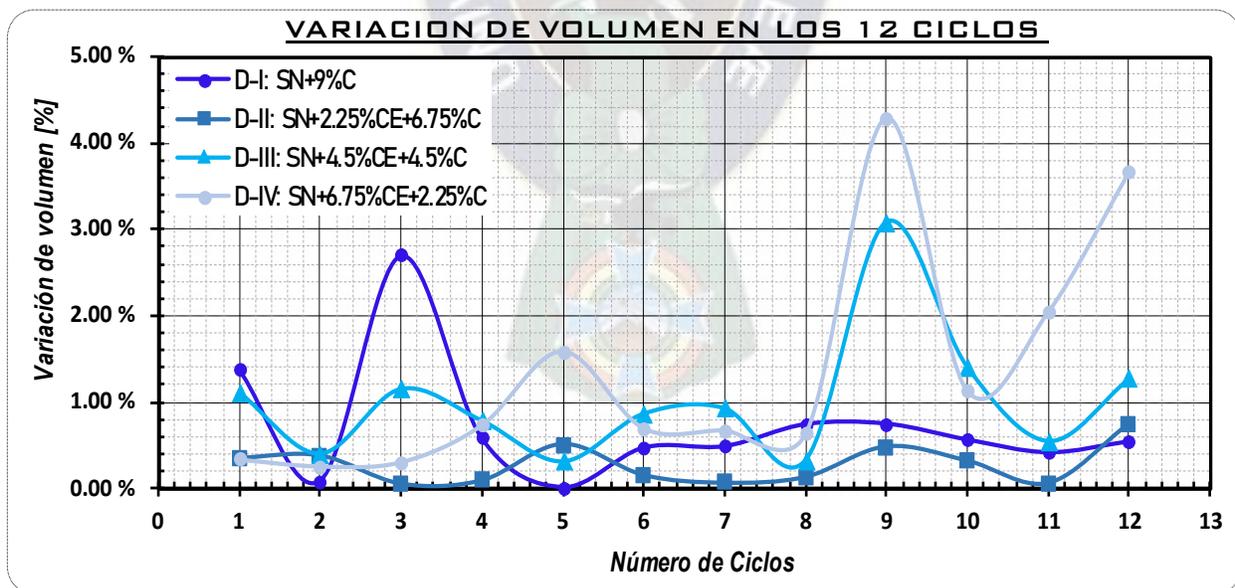
Para hallar el porcentaje óptimo de ceniza y cemento, se realizó una curva de resistencia con las dosificaciones D-I, D-II, D-III y D-IV y se observa que la dosificación que cumple con la resistencia mínima es: 2.9% de ceniza de eucalipto y 6.1% de cemento, como se observa en la Figura 106.

#### 4.4.3 Durabilidad

Se realizó dos probetas por cada dosificación, en la N°1 se calculó la variación de volumen y en la N°2 se calculó el porcentaje de pérdida, además, se verificó el moldeado de probetas.

**Figura 107**

*Variación Volumétrica en 12 ciclos, para diferentes dosificaciones*



Nota: Fuente propia.

En la Figura 107 se muestran los resultados de la probeta N°1 en diferentes dosificaciones, donde se analiza la variación volumétrica de la probeta al ser sometida al proceso de

sumergimiento al agua y secada al horno, la variaciones que se presentan son muy irregular, con una tendencia a tener más variabilidad cuando se aumenta cantidad de ceniza de eucalipto y reduciendo el cemento, esto se debe al desgaste que tenían las probetas al momento de medir sus dimensiones con el venir y las que tienen menos resistencia sufrían más desgaste lo que representa mayor variación de volumen.

En la probeta N°2, se realizó el análisis del % de pérdida siguiendo los procedimientos correspondientes al ensayo, el porcentaje de pérdida en 12 ciclos se observa en la Figura 108.

**Figura 108**

*Porcentaje de pérdida en los 12 ciclos, para diferentes dosificaciones*



*Nota:* Fuente propia.

Para la dosificación con adición de 9% de ceniza de eucalipto (D-V) se tuvo el problema de que al momento de sumergirlo al agua este se disgregaba lentamente, entonces se decidió realizar el ensayo sin el sumergimiento al agua, cepillando solo por un ciclo y se calcula el porcentaje de pérdida, como se observa en la Tabla 37:

**Tabla 37**

Porcentaje de pérdida D-V: SN+9%CE (1 Ciclo)

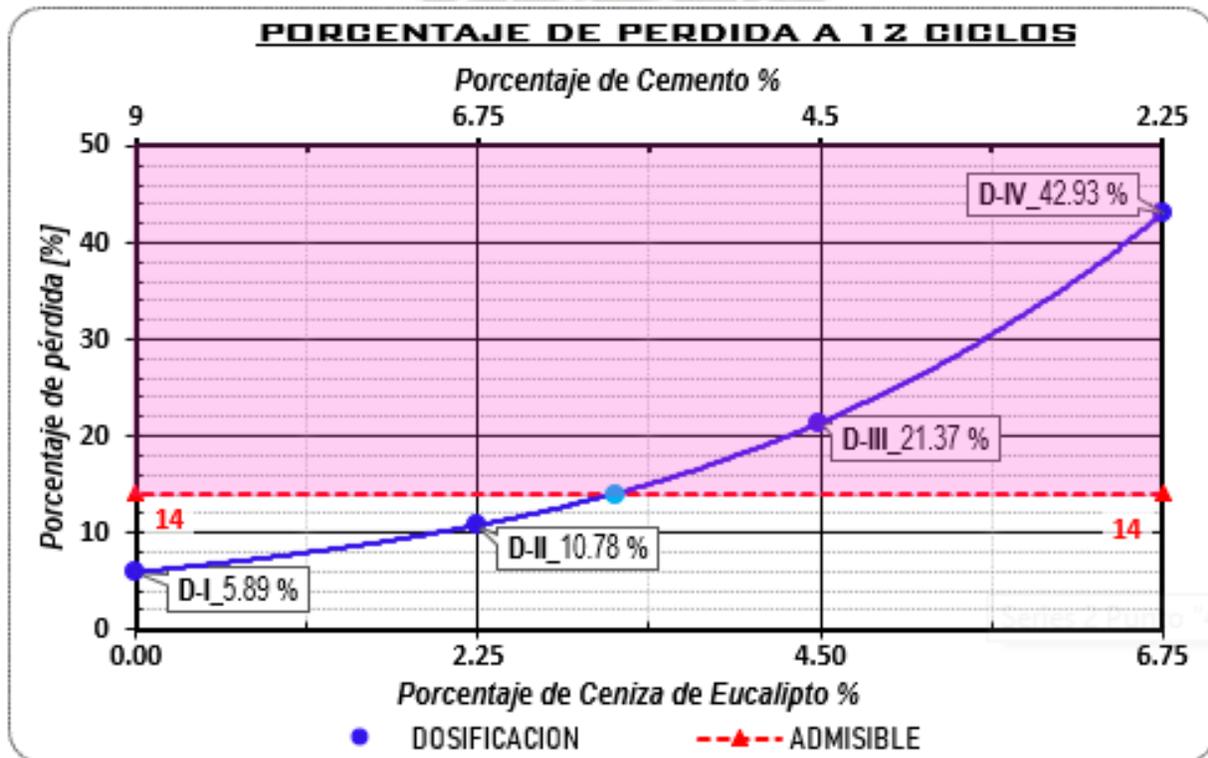
CALCULO DE PORCENTAJE DE PERDIDA EN PESO	
Peso húmedo inicial : <b>PH</b> =	1789.0
Humedad : <b>H</b> =	18.67
Peso seco inicial : <b>Psi</b> =	1507.53
Peso seco final : <b>Pf</b> =	1450.80
Porcentaje de agua retenida:	2.5
Porcentaje seco corregido <i>P<sub>sc</sub></i> :	1415.41
Porcentaje de pérdida <b>%P</b> :	<b>6.11 %</b>

Nota: Fuente propia.

En la Figura 109 se muestra la curva de porcentaje de pérdida después de los 12 ciclos de las diferentes adiciones de ceniza de eucalipto y cemento y en la Tabla 38 se muestra el resumen de los resultados a 12 ciclos.

**Figura 109**

Porcentajes de pérdida a 12 ciclos



Nota: Fuente propia.

**Tabla 38**

Valor de % de pérdida a 12 ciclos

DOSIFICACIÓN	PORCENTAJE DE PÉRDIDA EN 12 CICLOS
D-I: SN +9% C	<b>5.89 %</b>
D-II: SN+2.25%CE+ 6.75%C	<b>10.78 %</b>
D-III: SN+4.50%CE+4.50%C	<b>21.37 %</b>
D-IV: SN+6.75%CE +2.25%C	<b>42.93 %</b>

Nota: Fuente propia.

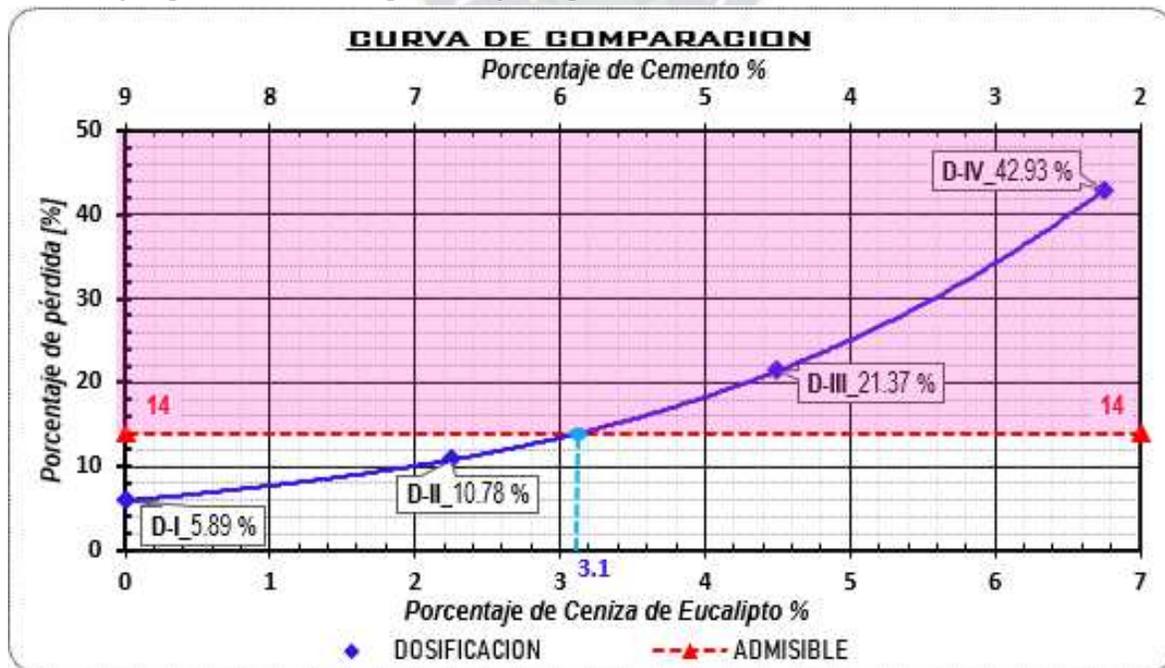
Las planillas del ensayo Durabilidad de las dosificaciones D-II, D-III, D-IV y D-V se encuentran en el Anexo C-3, Anexo C-6, Anexo C-9 y Anexo C-12 respectivamente.

#### 4.4.3.1 Análisis de durabilidad

En la Figura 110 se observa que el valor del porcentaje de pérdida va aumentando a medida que se aumenta la cantidad de ceniza de eucalipto y reduce el cemento. Solo las combinaciones D-I y D-II son las que cumplen con el máximo % admisible.

**Figura 110**

Porcentaje óptimo en base al porcentaje de pérdida



Nota: Fuente propia.

Para hallar el porcentaje óptimo de cantidad ceniza de eucalipto y cemento, se realizó una curva de porcentaje de pérdida (12 Ciclos) con las dosificaciones D-I, D-II, D-III y D-IV y se observa que la dosificación que cumple con el máximo porcentaje de pérdida es: 3.1% de ceniza de eucalipto y 5.9% de cemento, como se observa en la Figura 110.

#### 4.5 Análisis de dosificaciones dosificación óptima

Basándonos en los resultados del ensayo de Compresión Simple y Durabilidad por Mojado y Secado, tenemos dos dosificaciones óptimas con diferentes criterios admisibles respectivos a la variable analizada, siendo estos los siguientes:

**Tabla 39**

*Dosificación óptima según Ensayo de Compresión y Durabilidad*

DOSIFICACION OPTIMA		
ENSAYO	%Ceniza de eucalipto	%Cemento
COMPRESION SIMPLE	2.9	6.1
DURABILIDAD POR MOJEDO Y SECADO	3.1	5.9

*Nota:* Fuente propia.

Se decidió adoptar como Dosificación óptima 2.9% de ceniza de eucalipto y 6.1% de cemento basado en el criterio de Resistencia, debido a que con esta dosificación también cumpliría con el requerimiento de porcentaje de pérdida del ensayo de Durabilidad por mojado y secado.

##### 4.5.1 Compresión simple suelo-cemento (Dosificación óptima)

Se realizó previamente el ensayo Proctor T-99 de cual se halla el valor promedio de humedad óptima y densidad seca como se muestra (ver Tabla 40) y en la siguiente Figura 111:

**Tabla 40**

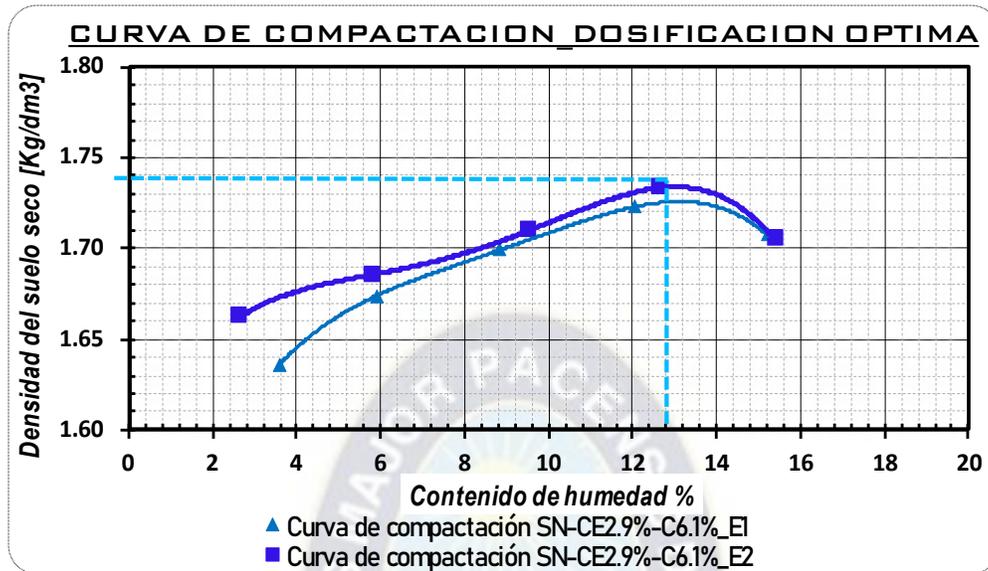
*Valor Promedio Hop y Ds max (Dosificación óptima)*

PROMEDIO	
<i>Densidad seca máxima</i>	<b>1.731 kg/dm<sup>3</sup></b>
<i>Humedad óptima</i>	<b>13.10 %</b>

*Nota:* Fuente propia.

**Figura 111**

*Proctor T-99, curva de compactación (Dosificación óptima)*

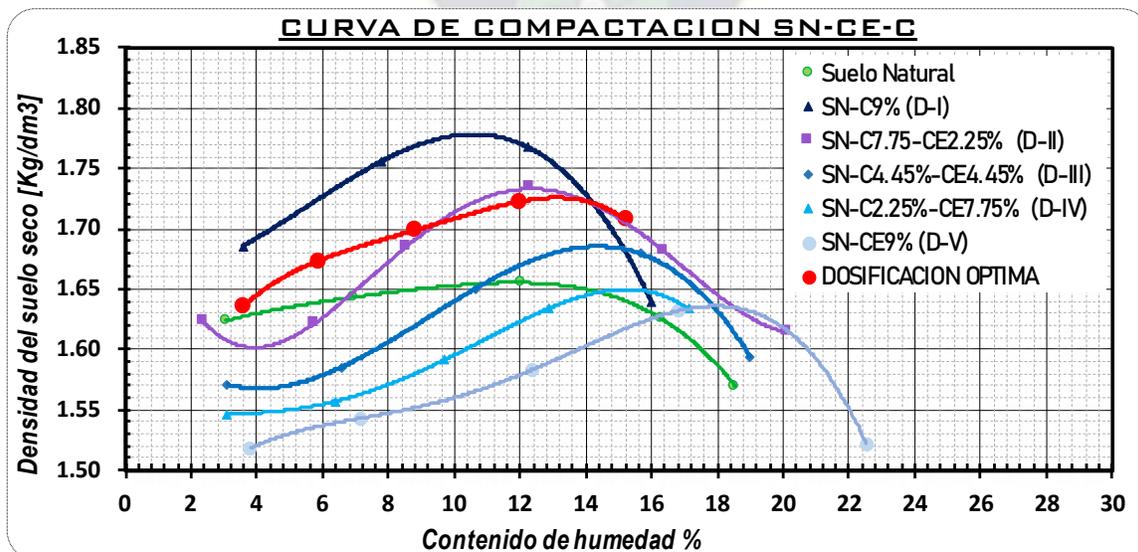


Nota: Fuente propia.

Como se observa en la Figura 112 la curva de dosificación óptima presenta resultados de humedad óptima y densidad seca, intermedia entre las demás dosificaciones.

**Figura 112**

*Curva de compactación con dosificación óptima*



Nota: Fuente propia.

La resistencia promedio fue de 1.911 [MPa] como se ve en la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Resistencia promedio a 7 días (Dosificación óptima)*

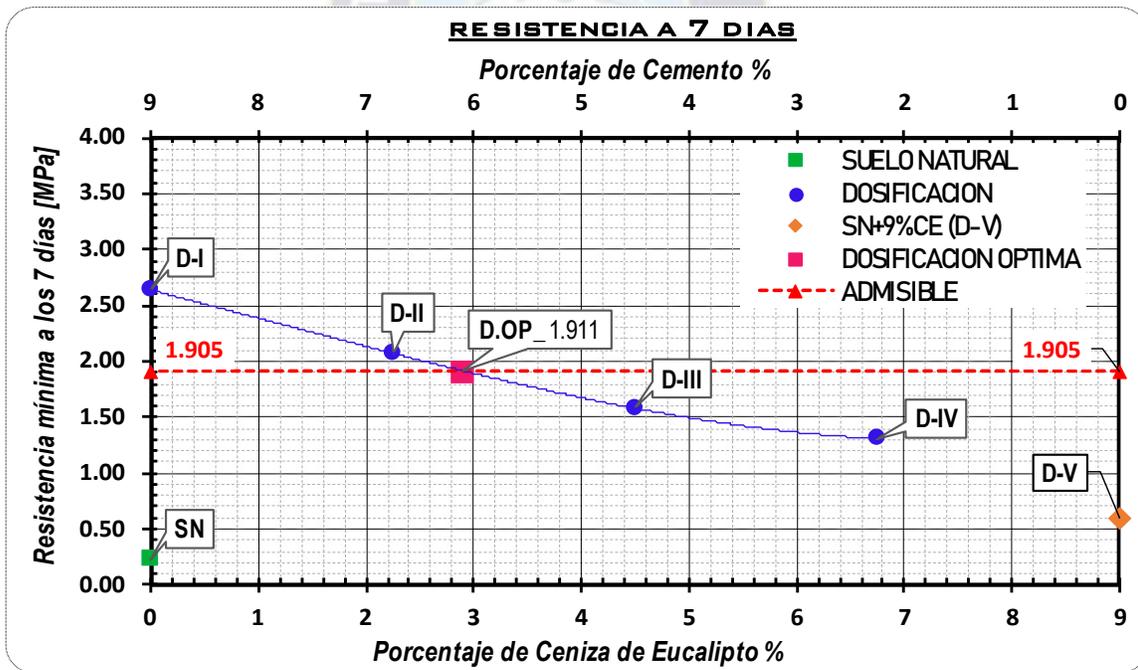
COMPRESION A 7 DIAS				
Especimen N°		MI_C	M2_C	M3_C
Diametro :	D [cm]	10.170	10.170	10.180
Altura :	H [cm]	11.685	11.675	11.665
Area :	cm <sup>2</sup>	81.23	81.23	81.39
Carga total de fatiga :	KN	15.50	15.60	15.50
Resistencia :	Mpa	1.908	1.920	1.904
Resistencia promedio :	Mpa	1.911		

Nota: Fuente propia.

En la Figura 113 se verifica que la resistencia obtenida de la dosificación óptima es superior a 1.905 MPa, por tanto, cumple con el requerimiento de la resistencia.

**Figura 113**

*Resistencia a 7 días Dosificación óptima*



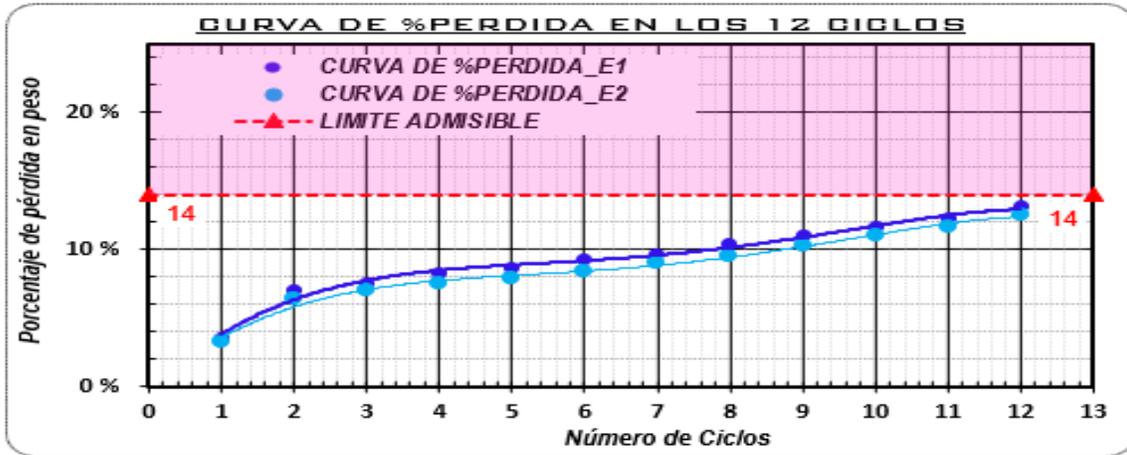
Nota: Fuente propia.

#### 4.5.2 Durabilidad por mojado y secado suelo-cemento (Dosificación óptima)

Se realizó dos ensayos para el análisis del porcentaje de pérdida, siendo el porcentaje de pérdida promedio 12.83 %, como se observa en la Figura 114 y la Tabla 42.

**Figura 114**

*Curva de %perdida en los 12 ciclos*



Nota: Fuente propia.

**Tabla 42**

*Promedio de porcentaje de pérdida (Dosificación óptima)*

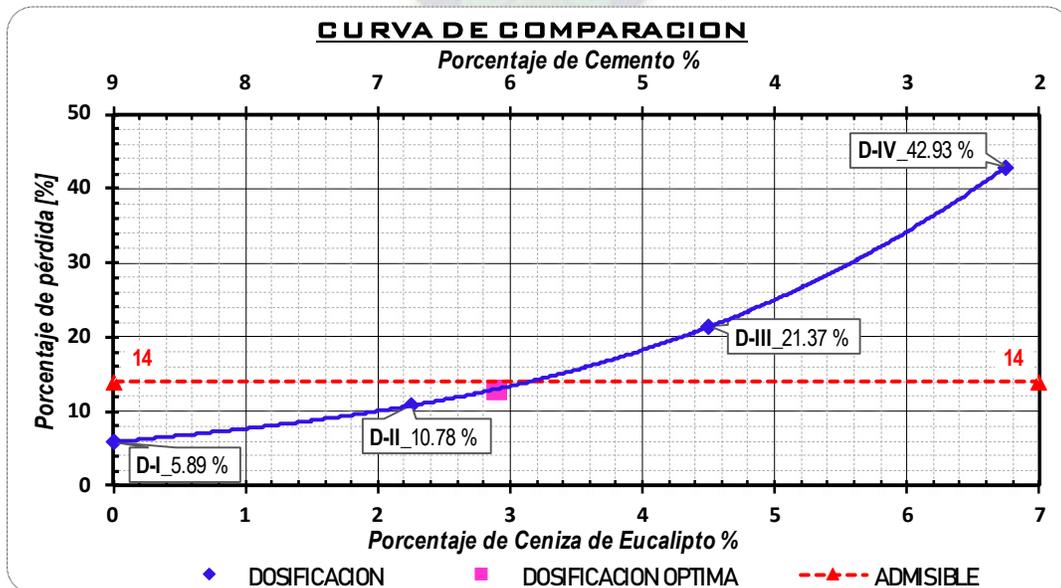
PROMEDIO ENSAYO DURABILIDAD	
Porcentaje de pérdida	12.83 %

Nota: Fuente propia.

En la Figura 115 se demuestra que el % de pérdida en peso obtenida de la dosificación óptima es menor al máximo admitido, por tanto, cumple con el requerimiento de la durabilidad.

**Figura 115**

*Curva de porcentaje de pérdida en peso (Dosificación óptima)*



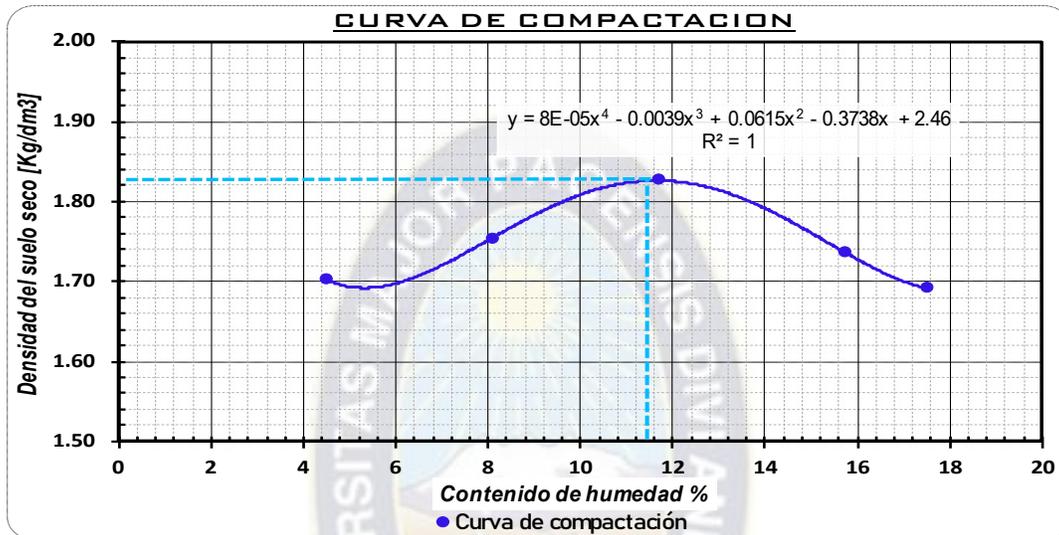
Nota: Fuente propia.

### 4.5.3 Relación Soporte California CBR (AASHTO T193)

Se elaboró previamente el ensayo Proctor T-180 para graficar la curva de compactación (ver Figura 116) y hallar la humedad óptima y densidad seca como se muestra en la Tabla 43.

**Figura 116**

*Proctor T-180, Curva de compactación (Dosificación óptima)*



Nota: Fuente propia.

**Tabla 43**

*%Hop y Ds max (Dosificación óptima)*

**Densidad seca máxima : 1.826 kg/dm<sup>3</sup>**

**Humedad óptima = 11.50 %**

Nota: Fuente propia.

En la Tabla 44 se muestra el valor de CBR.

**Tabla 44**

*Valor de CBR (Dosificación óptima)*

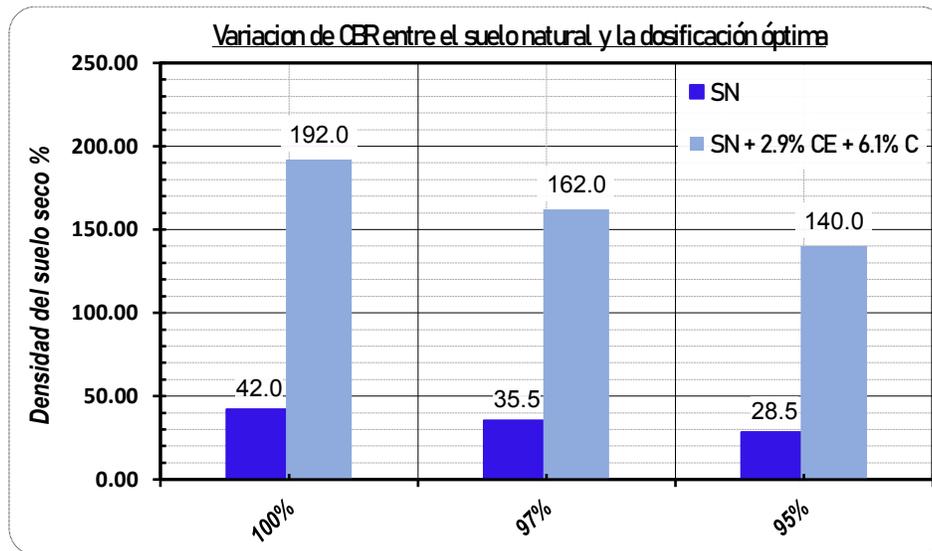
%	Ds <sub>max</sub> kg/dm <sup>3</sup>	CBR
<b>100%</b>	1.826	<b>192.0</b>
<b>97%</b>	1.771	<b>162.0</b>
<b>95%</b>	1.735	<b>140.0</b>

Nota: Fuente propia.

En la figura 117, se observa que la dosificación óptima mejoró el valor de CBR de 28.5 % a 140% al 95% de la densidad máxima.

**Figura 117**

*Valor de CBR Suelo natural y Dosificación óptima*



Nota: Fuente propia.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- En el presente proyecto se concluye que la ceniza de eucalipto junto con el cemento es una alternativa para la estabilización de un suelo areno limoso de tipo SP-SM, debido a que mejora el valor de CBR e incrementa la resistencia a la compresión del suelo a 7 días, en consecuencia, la ceniza de eucalipto puede utilizarse como material estabilizador.
- A través de los ensayos de laboratorio, se determinó que el suelo en estado natural no presenta plasticidad, su gravedad específica es igual a 2.65; la distribución granulométrica por tamaños de partículas evidencia que el material está compuesto por 0.07% de grava, 88.56% de arena, 8.11% de limo y 3.27% de arcilla, así también, se determinó que el suelo es un material granular de tipo A-2-4(0) de acuerdo al sistema de clasificación AASHTO y SP-SM (arena mal graduada con limo) según el sistema SUCS. Este suelo tiene un CBR de 28.5% al 95% de su densidad máxima, con una expansión nula para una humedad óptima de 9.96% y una densidad seca máxima de 1.74 kg/dm<sup>3</sup>; tiene una resistencia a compresión a siete días de 0.228 MPa y un porcentaje de pérdida en un ciclo del ensayo de durabilidad de 9.63% para una humedad óptima de 12.25% y una densidad seca máxima de 1.66 kg/dm<sup>3</sup>.
- Se evidenció que el suelo en estado natural puede ser utilizado como subrasante, debido a que satisface el requerimiento mínimo de CBR. Sin embargo, como el objetivo de la investigación es estabilizar el suelo para su uso como capa subrasante y el suelo de estudio ya cumple con el requisito de CBR, entonces se decidió continuar con la investigación para

analizar el comportamiento de la ceniza de eucalipto como agente estabilizador, para su empleo en la estabilización en un suelo areno limoso en proyecto viales como capa base.

- Con el ensayo de Fluorescencia de Rayos X, se determinó cualitativamente la composición química de la ceniza de eucalipto, encontrándose como elementos mayoritarios al calcio, fósforo y potasio; elementos minoritarios al silicio, aluminio, magnesio y hierro y trazas de manganeso, cobre, rubidio, zinc y estroncio. El calcio, silicio y aluminio son elementos fundamentales para formar los componentes cementantes, por tanto, la ceniza de eucalipto presenta propiedades puzolánicas.
- Mediante la Norma de Dosificación Simplificada de la Portland Cement Association (PCA) se calculó un 9% de cemento en peso como porcentaje óptimo para la estabilización del suelo areno limoso de estudio. Considerando que la cantidad de cemento es alta, la estabilización no resultaría muy económica, en consecuencia, la adición de ceniza de eucalipto ha permitido disminuir el porcentaje de cemento.
- Se determinó la resistencia y porcentaje de pérdida por durabilidad, sustituyendo el porcentaje total de cemento por diferentes porcentajes de ceniza de eucalipto (25%, 50%, 75% y 100% respecto al 9% de cemento), como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 45**

*Tabla resumen (Resistencia, durabilidad, Hop y Ds max)*

<b>DOSIFICACIÓN</b>	<b>RESISTENCIA A 7 DIAS MPa</b>	<b>PORCENTAJE DE PÉRDIDA</b>	<b>H op</b>	<b>Ds max</b>
D-I: SN +9% C	2.638	<b>5.89 %</b>	10.50	1.80
D-II: SN+2.25%CE+ 6.75%C	2.071	<b>10.78 %</b>	12.15	1.74
D-III: SN+4.50%CE+4.50%C	1.580	<b>21.37 %</b>	14.10	1.69
D-IV: SN+6.75%CE+2.25%C	1.308	<b>42.93 %</b>	15.00	1.66
D-V: SN+9%CE	0.590	<b>6.11 %</b>	18.30	1.63

*Nota:* Fuente propia.

- A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de Compresión Simple y Durabilidad por mojado y secado, se determinó la dosificación que permite cumplir con los requerimientos, siendo el porcentaje óptimo de 2.9% de ceniza de eucalipto y 6.1% de cemento siguiendo el criterio de resistencia y de 3.1% de ceniza de eucalipto y 5.9% de cemento por el criterio de durabilidad.
- Se optó por el criterio de resistencia, puesto que este cumplía también el requerimiento de durabilidad. Por tanto, la dosificación óptima elegida fue de 2.9 % ceniza de eucalipto y 6.1 % cemento.
- La dosificación considerada óptima permitió obtener una resistencia a la compresión a 7 días de 1.91 MPa y un porcentaje de pérdida en peso de 12.83% en doce ciclos; además, se halló que el valor de CBR al 95% de la densidad máxima incrementa de 29% (suelo natural) a 140% (suelo estabilizado) logrando una significativa mejoría de este.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda el uso del suelo areno limoso estudiado como capa subrasante en proyectos carreteros. Para capa subbase y base será recomendable realizar un estudio de estabilización particular.
- Con el objetivo de determinar una dosificación óptima para aplicarlo en un proceso de construcción considerando factores económicos, se evaluó la mezcla que alcanza un valor de CBR igual o superior al 90% requerido para la capa base de un pavimento flexible. Realizando una interpolación los resultados indican que una proporción de 3.2% de cemento y 5.8% de ceniza de eucalipto cumple con este criterio, esta dosificación presenta una ventaja económica al utilizar menos cemento, sin embargo, se recomienda verificar y validar esta dosificación en un laboratorio para confirmar su viabilidad.

- Con la finalidad establecer el comportamiento resistente del suelo con adición de ceniza de eucalipto y cemento, será conveniente efectuar los ensayos de compresión simple a 28 días y 90 días, observando de esta manera la evolución de la resistencia a compresión con el tiempo.
- Resultará conveniente ampliar la presente investigación para otros suelos areno limosos estabilizados con ceniza de eucalipto y cemento y solo con ceniza de eucalipto, con la finalidad establecer rangos de dosificación que incrementen el valor de CBR, la resistencia a compresión simple y la durabilidad del suelo.
- Se recomienda tomar en cuenta que, para elaborar las probetas destinadas al ensayo de Durabilidad por mojado y secado, se debe disponer de adiciones de cemento no muy bajas (no menores al 3%), debido a que, en el proceso de inmersión de las probetas, éstas se disgregan al entrar en contacto con el agua, impidiendo proseguir el ensayo de acuerdo al procedimiento indicado en la norma. Por tanto, se debe tener en cuenta esta limitación al momento de desarrollar cualquier investigación que requiera la realización de este ensayo.
- Se sugiere obtener la ceniza de eucalipto a la temperatura óptima de calcinación, debido a que esto permite disponer de una ceniza con mejores características para ser utilizada como material estabilizante, considerando que en la presente investigación se obtuvo la ceniza sin controlar estrictamente la temperatura de calcinación y aun así se obtuvieron resultados favorables.
- Se recomienda realizar los ensayos bajo condiciones similares a las existentes en el proceso constructivo de una carretera.
- Al momento de realizar las mezclas, es conveniente mezclar primero el suelo con la ceniza en partes, para lograr una mejor mixtura y adicionando luego el agua. Este proceso resulta

también adecuado cuando se incorpora el cemento, a fin de reducir la pérdida de estos materiales finos.

- Se debe tomar en cuenta que la madera de eucalipto al momento de calcinarla y obtener su ceniza tiene un porcentaje de pérdida en peso del 94% aproximadamente, esto depende mucho de la humedad que presente la madera.
- Habiendo obtenido resultados favorables con el presente proyecto de grado, se sugiere considerar a la ceniza de eucalipto como un material estabilizador alternativo que junto con el cemento puede proporcionar una mejora significativa de las propiedades mecánicas y de deformabilidad de suelos arena limosos, promoviendo de esta manera el uso de la ceniza de eucalipto existente en las ladrilleras y a su vez incentivar el reciclado de la madera muerta de eucalipto.
- Finalmente, será recomendable continuar con la realización de investigaciones en la línea de la estabilización de suelos para su uso como capa subrasante, capa subbase y capa base, con otros materiales alternativas, que permitan reducir el impacto ambiental e incentivar su mejor aprovechamiento.

## **CAPITULO VI**

### **6. BIBLIOGRAFIA**

- Angelone, S., & Zapata, R. (2018). *Características de suelos arcillosos y limosos*.
- Bermejo, V., & Flores, H. (2014). *Guia de laboratorio Mecanica de suelos II*. La Paz.
- Bermejo, V., & Pacosillo, L. (2007). *Laboratorio de mecanica de suelos I (CIV-219)*. La Paz.
- Cristóbal, F., & Quinte, M. (2022). *Estabilización de subrasante con cenizas de eucalipto, para je turístico Piedra Parada, Concepción, Junín 2021*. Huancayo-Perú.
- Das, B. (s.f.). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. California.
- Jofré, C., Kraemer, C., Atienza, M., Díaz, J., Rueda, R., & Salas, M. (2008). *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal*. España-Madrid: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).
- Malvern Panalytical*. (2024). Obtenido de <https://www.malvernpanalytical.com>
- Pacosillo Ticona, L. (2019). *Mecanica de suelos I*. La Paz.
- Pérez Droguet, C., Durán, N., Fernández Aguilera, R., Monroy, F., Pantaleón Prieto, M. J., & Caballero, J. (2011). *Manual de ensayos de suelos y materiale ABC*. Bolivia.
- Pérez, Y. (2017). *Resistencia del concreto  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> sustituyendo al cemento en 4% y 8% por la ceniza de tronco de Eucalipto*. Chimbote-Perú.
- Rocha, M. (2002). *Dosificación de Mezclas de Suelo-Cemento Normas de Dosificación*. La Paz.
- Rodríguez, G., Salinas, M., García Gutierrez, F., Guiroga, P., Alvarez, C., & Guitierrez, A. (2011). *Manual de Diseño de Conservación Vial ABC*. Bolivia.
- Terzaghi. (1925). *Erdbaumechanick auf Bodenphysikalischer Grundlage*.
- Ticona Cocarico, O. (2012). *Evaluación del eucalipto (Eucalyptus globulus), bajo el efecto de dos tratamientos pregerminativos y tres sustratos en la comunidad de Chumisa*. La Paz.

## 7. ANEXOS

ANEXO A. Planilla de Ensayos del suelo natural

ANEXO A-1. Contenido de Humedad Natural

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>	
<b>PROYECTO:</b>	Estabilización	<b>REALIZADO POR:</b>	Hilda Veronica Quenta Ninachoque
<b>PROCEDENCIA:</b>	Churalla Chico	<b>NORMA:</b>	ASTM D2216-98
<b>Nº MUESTRA:</b>	I	<b>FECHA:</b>	6-mar-24
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM D2216-98)</b>			
<p><i>Fórmula :</i> <math display="block">\%h = \frac{P_a}{P_s} * 100\%</math></p>			
<b>HUMEDAD SUELO NATURAL</b>			
<i>Muestra N° :</i>		<b>1</b>	<b>2</b>
<i>Pozo Número :</i>		<b>I</b>	<b>I</b>
<i>Cápsula Número :</i>		<b>20</b>	<b>35</b>
<i>Suelo húmedo + cápsula :</i>	<b>P<sub>1</sub></b>	<b>1261.98</b>	<b>1175.35</b>
<i>Suelo Seco + Cápsula :</i>	<b>P<sub>2</sub></b>	<b>1175.58</b>	<b>1097.88</b>
<i>Peso del agua :</i>	<b>P<sub>a</sub> = P<sub>1</sub> - P<sub>2</sub></b>	<b>86.40</b>	<b>77.47</b>
<i>Peso de Cápsula :</i>	<b>P<sub>c</sub></b>	<b>202.21</b>	<b>219.81</b>
<i>Peso suelo seco :</i>	<b>P<sub>s</sub> = P<sub>2</sub> - P<sub>c</sub></b>	<b>973.37</b>	<b>878.07</b>
<i>Porcentaje de Humedad :</i>		<b>8.88</b>	<b>8.82</b>
<b>%h = (Pa / Ps)*100 [%]</b>			
<i>Porcentaje de Humedad</i>		<b>%h =</b>	<b>8.85</b>

ANEXO A-2. Análisis granulométrico por tamizado

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL		INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M. LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A			
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque		
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T27-82		
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	6-mar-24		
GRANULOMETRIA POR TAMIZADO (AASHTO T27-82)					
HUMEDAD		Natural	Higroscóp	PESO SECO DE LA MUESTRA	
Cápsula Nº :		20	2	Cápsula Nº :	1
Suelo húmedo+Cápsula :	P <sub>1</sub> [g]	1261.98	169.22	Muestra total humedad :	Ph [g] 4919.00
Suelo Seco + Cápsula :	P <sub>2</sub> [g]	1175.58	169.19	Peso Retenido en el Tamiz Nº 10 : Pr [g]	3.42
Peso del agua :	Pa [g]	86.40	0.03	Peso pasa Tamiz Nº10 Húmedo : Mh [g]	4915.58
Peso de Cápsula :	Pc [g]	202.21	69.22	Peso de agua :	Pa [g] 1.47
Peso suelo seco :	Ps [g]	973.37	99.97	Peso Pasa Nº10 Seco : Ms [g]	4914.11
Porcentaje de Humedad :		8.88	0.03	Muestra Total Seca : PTs = Pr + Ms [g]	4917.53
% h = (Pa / Ps)*100 [%]					
ANÁLISIS DEL AGREGADO GRUESO					
Tamices	Abertura [mm]	Peso Retenido	% Parcial Retenido	Acumulado %Retenido	% Pasa
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.10	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 4	4.76	3.25	0.07	0.07	99.93
Nº 10	2.00	0.17	0.00	0.07	99.93
<b>Total :</b>		<b>3.42</b>			
ANÁLISIS MECANICO DEL MORTERO DE SUELO					
Peso muestra húmeda :		Sh [g]	100.0	Nº18	
Peso muestra seca :		S [g]	99.97		
ANÁLISIS DEL AGREGADO FINO					
Tamices	Abertura [mm]	Peso Retenido	%Retenido Mortero	% Acumulado Pasa Mortero	Total
Nº 10	2.000	0.00	0.00	0.00	99.93
Nº 20	0.840	0.20	0.20	0.20	99.73
Nº 40	0.420	1.44	1.44	1.64	98.29
Nº 60	0.250	18.43	18.44	20.08	79.87
Nº 140	0.105	59.67	59.69	79.76	20.22
Nº 200	0.074	8.85	8.85	88.62	11.38
<b>Total :</b>		<b>88.59</b>			
CURVA GRANULOMETRICA					
CARACTERISTICAS DE GRANULOMETRIA					
D <sub>10</sub> =		0.05			
D <sub>30</sub> =		0.13			
D <sub>60</sub> =		0.19			
Coeficiente de Uniformidad :		Cu = 3.80			
Coeficiente de Curvatura :		Cc = 1.78			
COMPOSICION PORCENTUAL DEL SUELO					
Grava %		0.07			
Arena %		88.56			
Fino %		11.38			

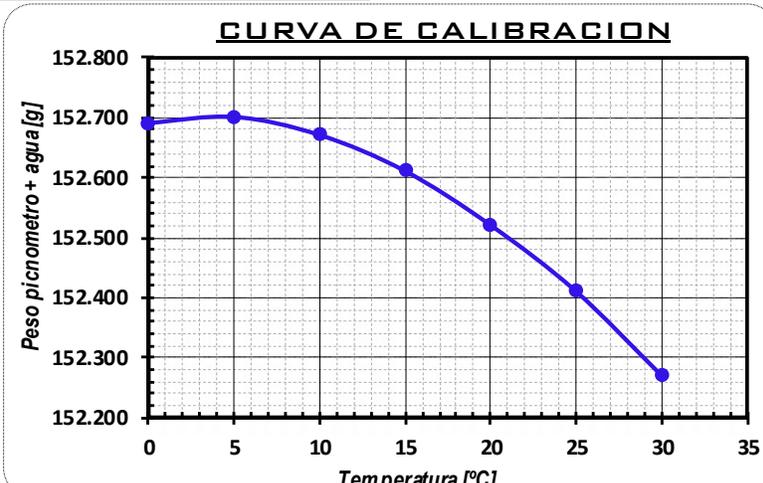
ANEXO A-3. Gravedad específica

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>	
<b>PROYECTO:</b> Estabilización <b>PROCEDENCIA:</b> Churalla Chico <b>Nº MUESTRA:</b> I	<b>REALIZADO POR:</b> Hilda Veronica Quenta Ninachoque <b>NORMA:</b> AASHTO T100-70 <b>FECHA:</b> 11-mar-24		

**GRAVEDAD ESPECIFICA (AASHTO T100-70)**

**CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO**  
 Picnómetro N°: 1  
 Peso del Picnómetro :  $W_B [g] = 52.91$

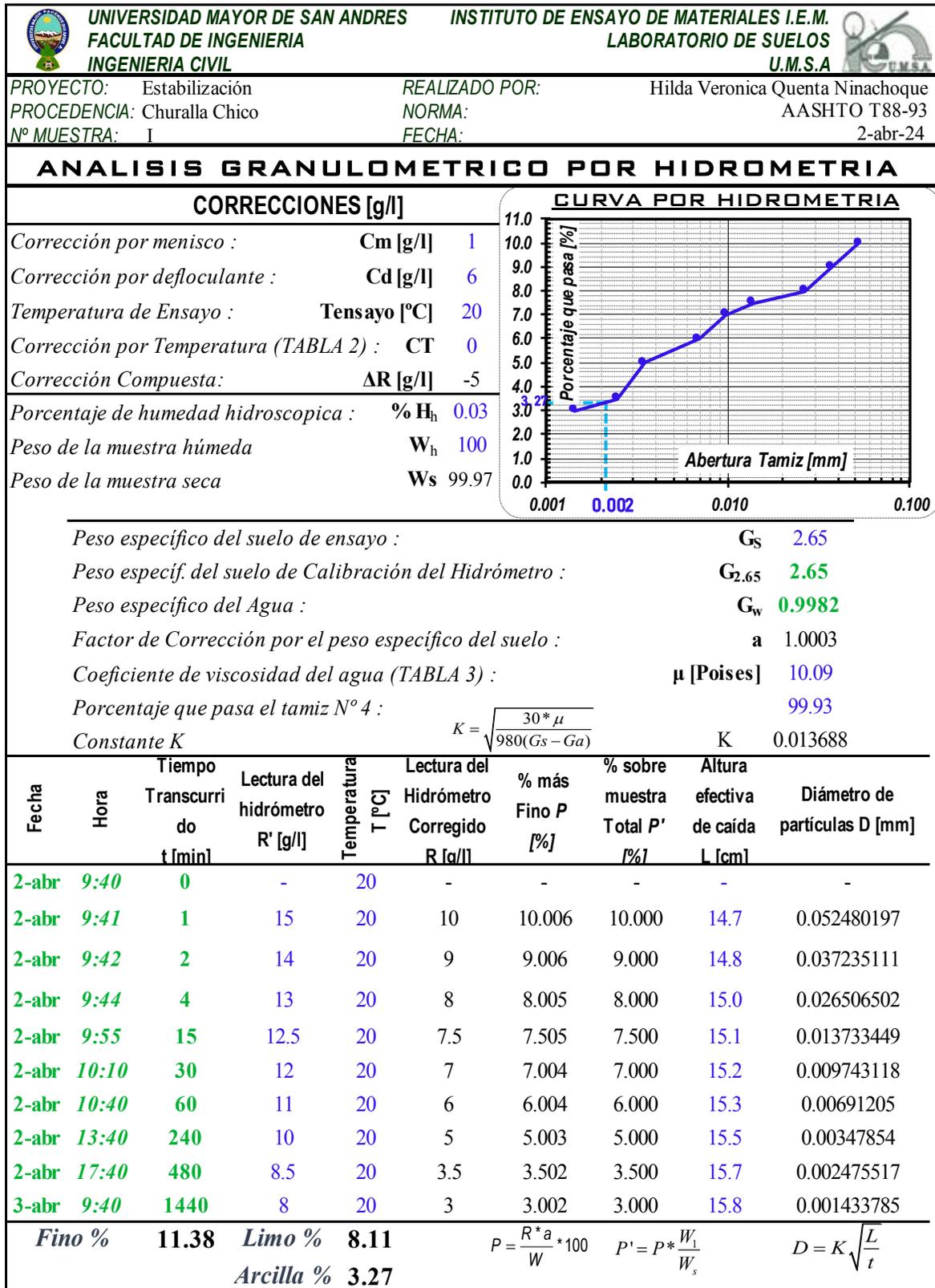
T [°C]	$\gamma_{w(T)}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	W <sub>2i</sub>
0	0.9999	152.690
5	1.0000	152.700
10	0.9997	152.670
15	0.9991	152.610
20	0.9982	152.520
25	0.9971	152.410
30	0.9957	152.271

**CURVA DE CALIBRACION**


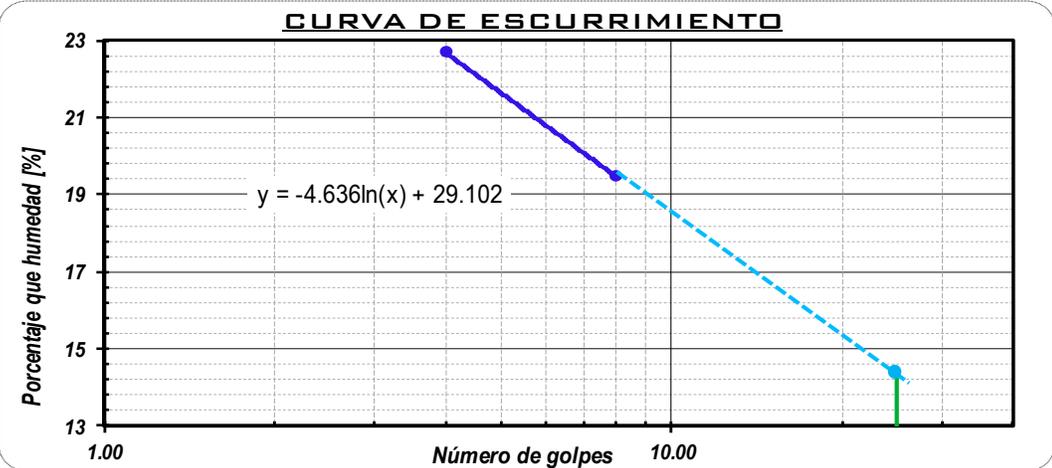
Picnómetro	Muestra N°	1	2	T [°C]	G <sub>w(T)</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]
Peso picnómetro + Agua + Suelo :	W <sub>1</sub> [g]	177.39	177.30	10	0.9997
Temperatura :	T [°C]	20	18	11	0.9996
Peso picnómetro + Agua :	W <sub>2</sub> [g]	152.52	152.58	12	0.9995
Recipiente de evaporación :	N°	24	38	13	0.9994
Peso del recipiente + Suelo Seco :	W <sub>rs</sub> [g]	111.02	112.75	14	0.9993
Peso del recipiente :	W <sub>r</sub> [g]	71.05	73.04	15	0.9991
Peso de suelo seco :	W <sub>s</sub> [g]	39.97	39.71	16	0.9990
Peso específico del agua a T [°C] :	G <sub>wT</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	0.9982	0.9986	17	0.9988
Relación entre densidades del agua :	KT	1.0000	1.0004	18	0.9986
Gravedad Específica del suelo 20[°C] G <sub>s20°C</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]		2.647	2.650	19	0.9984
				20	0.9982
				21	0.9980
				22	0.9978

**Gravedad Específica : G<sub>s</sub> = 2.65**

ANEXO A-4. Análisis granulométrico por método del hidrómetro



ANEXO A-5. Límite de Atterberg

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>		
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque	
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T89-81 AASTHO T90-70	
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	8-mar-24	
<b>LIMITE LIQUIDO (AASHTO T89-81)</b>				
<b>LIMITE PLASTICO (AASHTO T90-70)</b>				
<b>LIMITE LIQUIDO (LL) - SUELO NATURAL</b>				
<i>Cápsula Nº :</i>		<b>13</b>	<b>91</b>	<b>7</b>
<i>Nª de Golpes :</i>		-	8	4
<i>Suelo húmedo + cápsula :</i>	<b>P1 [g]</b>	-	50.84	53.39
<i>Suelo Seco + Cápsula :</i>	<b>P2 [g]</b>	-	44.61	46.17
<i>Peso del agua :</i>	<b>Pa = P1-P2 [g]</b>	-	6.23	7.22
<i>Peso de Cápsula :</i>	<b>Pc [g]</b>	12.84	12.60	14.33
<i>Peso suelo seco :</i>	<b>Ps = P2 - Pc [g]</b>	-	32.01	31.84
<i>Porcentaje de Humedad :</i>		-	<b>19.46</b>	<b>22.68</b>
<b>% h = (Pa / Ps)*100 [%]</b>		-	<b>19.46</b>	<b>22.68</b>
<b>CURVA DE ESCURRIMIENTO</b>				
				
<b>Límite Líquido : LL= 14.18 Para 25 Nª de golpes</b>				
<b>LIMITE PLASTICO (LP) - SUELO NATURAL</b>				
<i>Cápsula Nº :</i>		<b>94</b>	<b>19-X</b>	
<i>Suelo húmedo + cápsula :</i>	<b>P1 [g]</b>	-	-	
<i>Suelo Seco + Cápsula :</i>	<b>P2 [g]</b>	-	-	
<i>Peso del agua :</i>	<b>Pa = P1-P2 [g]</b>	-	-	
<i>Peso de Cápsula :</i>	<b>Pc [g]</b>	13.19	13.27	
<i>Peso suelo seco :</i>	<b>Ps = P2 - Pc [g]</b>	-	-	
<i>Porcentaje de Humedad:</i>		<b>NP</b>	<b>NP</b>	
<b>% h = (Pa / Ps)*100 [%]</b>		<b>NP</b>	<b>NP</b>	
La muestra es inoperable debido a que no presenta plasticidad				
<b>IP = LL - LP = NP</b>				
<b>El suelo es no plástico NP</b>				

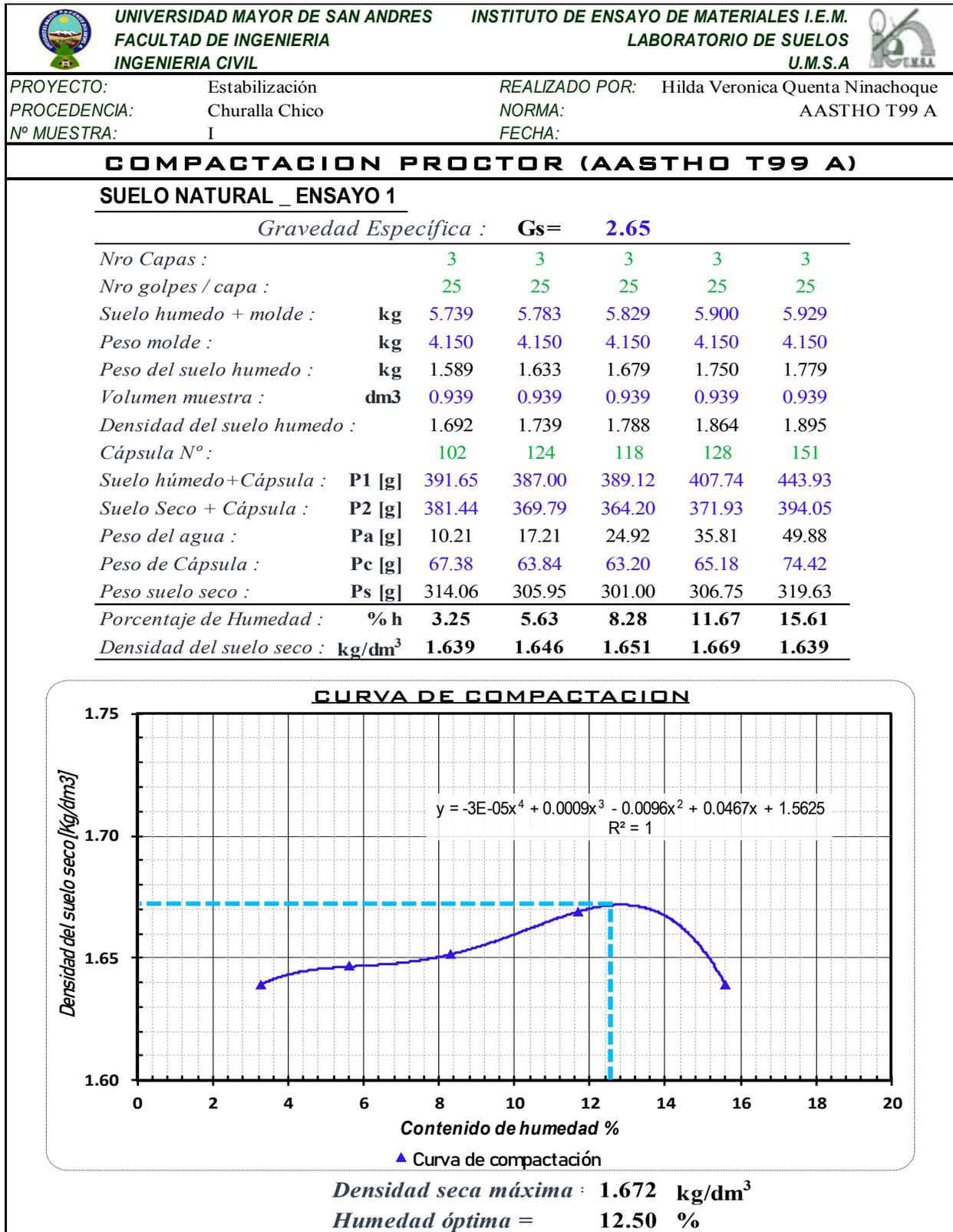
ANEXO A-6. Sistema de Clasificación de suelos AASHTO

 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>		<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>							
PROYECTO: Estabilización Churalla Chico I		REALIZADO POR: Hilda Verónica Quenta Ninachoque NORMA: CLASIFICACION AASHTO FECHA: 13-mar-24							
<b>SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS AASHTO</b>									
Clasificación	Grupo:	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)			Materiales limos o arcillosos (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
		A-1 A-1-a A-1-b	A-3	A-2-4 A-2-5 A-2-6 A-2-7		A-4	A-5	A-6 A-7 A-7-5 A-7-6	
<b>DATOS DEL SUELO DE ESTUDIO</b>  <i>Porcentaje que pasa:</i> N° 10 (2mm) <b>99.93</b> N° 40 (0.425mm) <b>98.29</b> N° 200 (0.075mm) <b>11.38</b>	<b>Porcentaje que pasa:</b> N° 10 (2mm) N° 40 (0.425mm) N° 200 (0.075mm)	-	-	-	-	-	-	-	
	<b>Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40</b>  Límite líquido <b>14.18</b> Índice de plasticidad <b>0</b>	50 máx 30 máx 15 máx	-	-	-	-	-	-	-
	6 máx Fragmentos de roca, grava y arena	51 mín 10 máx	-	-	-	-	-	-	-
<b>Características como subgrado</b>	No plástico El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30 El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30 $IG = (F-35) \cdot [0,2 + 0,005 \cdot (LL-40)] + 0,01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10)$	NP (1)	Grava y arena arcillosa o limosa	Suelos limosos	Suelos arcillosos	Excelente a bueno	Pobre a malo		
<b>Según la clasificación AASHTO el suelo de estudio es: Material granular A-2-4 (O) Arena con partículas finas limosas</b>									

ANEXO A-7. Sistema de Clasificación de suelos SUCS

 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>		<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>			
PROYECTO: Estabilización PROCEDENCIA: Churalla Chico N° MUESTRA: I		REALIZADO POR: Verónica Quenta Ninachoque NORMA: CLASIFICACION SUSC FECHA: 13-mar-24			
<b>SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS SUSC</b>					
		<b>DIVISIONES PRINCIPALES</b>		<b>Símbolo del grupo</b>	<b>NOMBRES DEL GRUPO</b>
<b>DATOS DEL SUELO DE ESTUDIO</b>					
Porcentaje que Pasa N° 4 (4.76mm) 99.93 N° 40 (0.425mm) 98.29 N° 200 (0.075mm) 11.38 Porcentaje que Retenido N° 4 (4.76mm) 0.07 N° 200 (0.075mm) 88.62					
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 Coeficiente de Uniformidad : Cu = 3.80 Coeficiente de Curvatura : Cc = 1.78					
Límite líquido 14.18 Índice de plasticidad 0 Índice de grupo (Es 0 por No Plástico) 0					
		<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> Más de la mitad del material retenido en el tamiz N° 200 Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)			
		<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)			
		<b>Gravas limpias</b> (sin o con pocos finos) Cu ≥ 4 y 1 ≤ Cc ≤ 3 <b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos) IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad <b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos) IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad		GW GP GM GC	Gravas bien graduadas. Gravas mal graduadas. Gravas limosas. Gravas arcillosas.
		<b>Arenas limpias</b> Cu ≥ 6 y 1 ≤ Cc ≤ 3 <b>Arenas con finos</b> Mas del 12% pasa tamiz N°200		SW SM SC	Arenas bien graduadas. Arenas mal graduadas. Arenas limosas. Arenas arcillosas.
		<b>Arenas limpias y con finos</b> Entre el 5% y 12% pasa tamiz N°200		SW-SM SW-SC SP-SM	Arena bien graduada con limo Arena bien graduada con arcilla Arena mal graduada con limo
		<b>Arenas limpias y con finos</b> Entre el 5% y 12% pasa tamiz N°200		SP-SC	Arena mal graduada con arcilla
		<b>SUELOS DE GRANO FINO</b> Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200			
		<b>Limos y arcillas: Inorgánicos</b> Limite liquido menor de 50		CL ML OL	Arcilla de baja plasticidad Limo de baja plasticidad Arcillas orgánicas. Limos inorgánicos.
		<b>Limos y arcillas: Inorgánicos</b> Limite liquido mayor de 50		CH MH OH	Arcilla de alta plasticidad Limo de alta plasticidad Arcillas inorgánicas. Limos orgánicas.
		<b>Suelos muy orgánicos</b> Principalmente materia orgánica		PT	Turba.
Según la clasificación de suelo unificada, el suelo de estudio es : <span style="margin-left: 200px;">SP-SM</span> <span style="margin-left: 100px;">Arena mal graduada con limo</span>					

ANEXO A-8. Proctor Estándar





PROYECTO: Estabilización  
PROCEDENCIA: Churalla Chico  
N° MUESTRA: I

REALIZADO POR: Hilda Verónica Quenta Ninachoque  
NORMA: AASTHO T99 A  
FECHA:

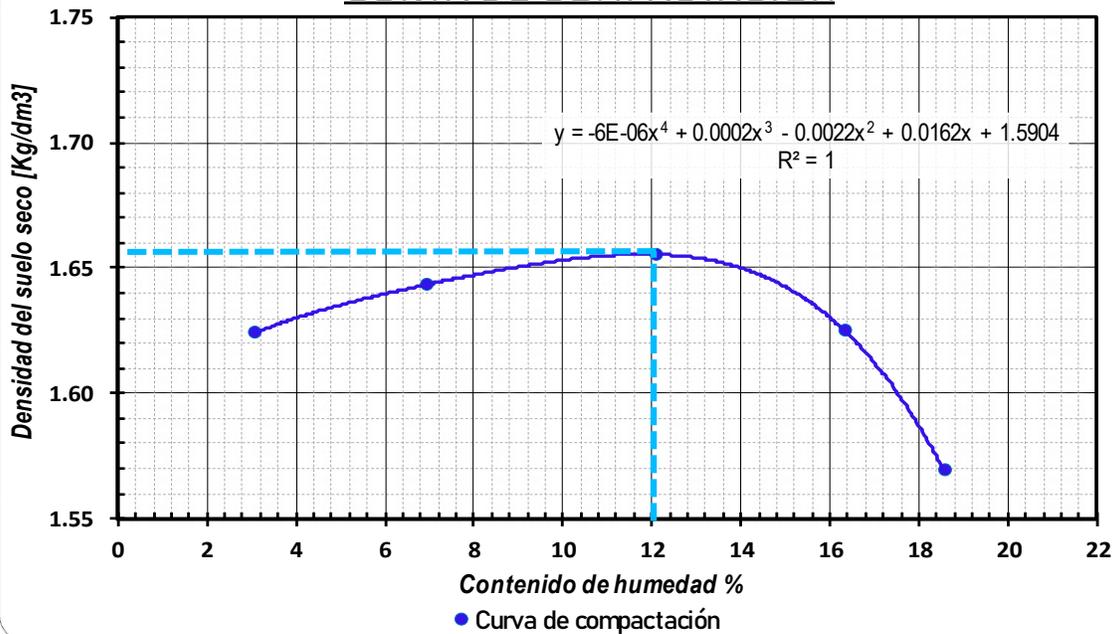
### COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)

#### SUELO NATURAL \_ ENSAYO 2

Gravedad Específica : **G<sub>s</sub> = 2.65**

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo húmedo + molde :	kg	5.722	5.800	5.892	5.925	5.897
Peso molde :	kg	4.150	4.150	4.150	4.150	4.150
Peso del suelo húmedo :	kg	1.572	1.650	1.742	1.775	1.747
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
Densidad del suelo húmedo :		1.674	1.757	1.855	1.890	1.860
Cápsula N° :		11	10	118	24	42
Suelo húmedo + Cápsula :	P1 [g]	349.90	398.36	418.91	467.82	549.79
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	341.47	377.13	380.61	410.22	475.58
Peso del agua :	Pa [g]	8.43	21.23	38.30	57.60	74.21
Peso de Cápsula :	Pc [g]	67.67	70.67	63.22	57.35	75.69
Peso suelo seco :	Ps [g]	273.80	306.46	317.39	352.87	399.89
Porcentaje de Humedad :	% h	3.08	6.93	12.07	16.32	18.56
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.624	1.643	1.655	1.625	1.569

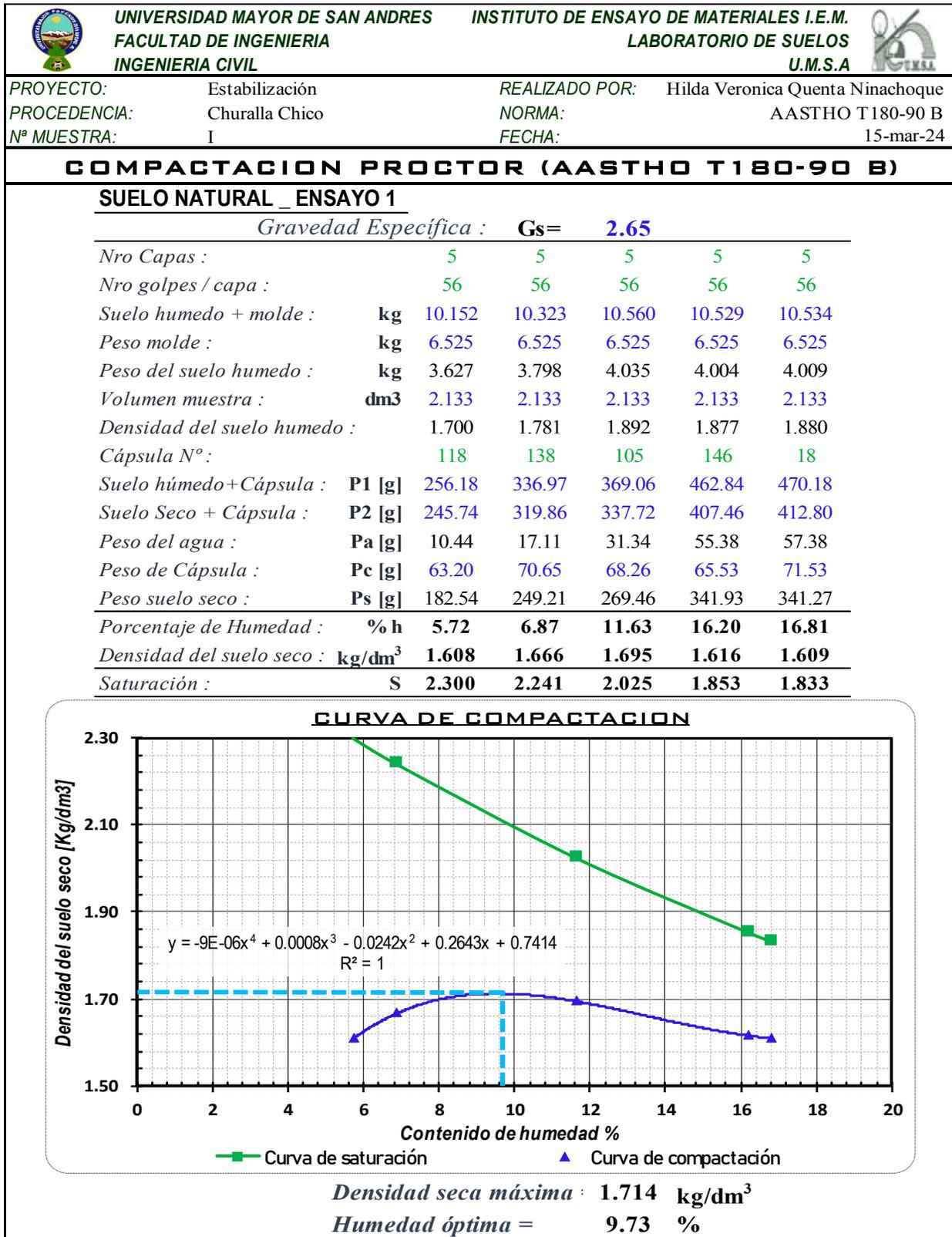
#### CURVA DE COMPACTACION



Densidad seca máxima : **1.655 kg/dm<sup>3</sup>**

Humedad óptima = **12.00 %**

ANEXO A-9. Proctor Modificado



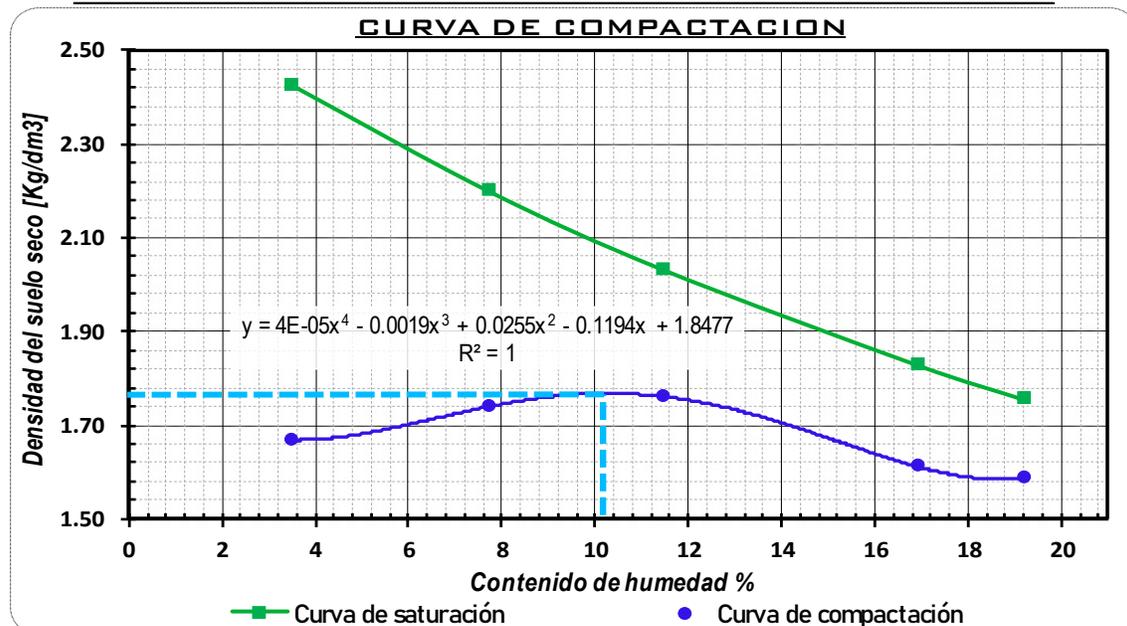


PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T180-90 B  
 N° MUESTRA: I FECHA: 18-mar-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T180-90 B)**

**SUELO NATURAL \_ ENSAYO 2**

		<i>Gravedad Especifica : Gs= 2.65</i>				
Nro Capas :		5	5	5	5	5
Nro golpes / capa :		56	56	56	56	56
Suelo humedo + molde :	kg	10.207	10.520	10.712	10.544	10.560
Peso molde :	kg	6.525	6.525	6.525	6.525	6.525
Peso del suelo humedo :	kg	3.682	3.995	4.187	4.019	4.035
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	2.133	2.133	2.133	2.133	2.133
Densidad del suelo humedo :		1.726	1.873	1.963	1.884	1.892
Cápsula N° :		21	118	38	31	31
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	261.49	295.58	445.02	375.72	496.82
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	254.99	278.97	407.44	330.65	428.38
Peso del agua :	Pa [g]	6.50	16.61	37.58	45.07	68.44
Peso de Cápsula :	Pc [g]	66.88	63.20	79.42	63.83	71.67
Peso suelo seco :	Ps [g]	188.11	215.77	328.02	266.82	356.71
Porcentaje de Humedad :	% h	3.46	7.70	11.46	16.89	19.19
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.669	1.739	1.761	1.612	1.587
Saturación :	S	2.427	2.200	2.032	1.830	1.756



**Densidad seca máxima : 1.762 kg/dm<sup>3</sup>**

**Humedad óptima = 10.18 %**

ANEXO A-10. Relación Soporte California CBR

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL		INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M. LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A								
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque							
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T193							
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	#####							
<b>RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)</b>										
MUESTRA	HUM. OPT.	DEN. SECA MAX.								
SUELO NATURAL_E1	9.96 %	1.714 kg/dm³								
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO</b>										
Molde Nro	1	2	3							
Nro de capas	5	5	5							
Nro de golpes por capa	12	25	56							
Condición de la muestra	Antes de mojar	Después de mojar	Antes de mojar	Después de mojar	Antes de mojar	Después de mojar				
Peso muestra hum. + molde (Kg)	11.275	11.666	10.762	11.125	11.343	11.624				
Peso del molde (Kg)	7.285	7.285	6.670	6.670	7.115	7.115				
Peso muestra húmeda	3.990	4.381	4.092	4.455	4.228	4.509				
Volumen de la muestra (dm³)	2.346	2.346	2.316	2.316	2.297	2.297				
Peso Unitario muestra húmeda	1.701	1.867	1.767	1.924	1.841	1.963				
Muestra de humedad del:	Fondo Superf	2" Superf	Fondo Superf	2" Superf	Fondo Superf	2" Superf				
Lata Nro	44 31	102	77 15	11	37 120	21				
Peso muestra húmeda + Lata	367.75 388.36	414.97	355.63 398.54	425.85	361.65 375.49	422.56				
Peso muestra seca + Lata	340.35 359.15	357.04	328.65 368.60	369.92	337.14 346.14	371.07				
Peso del agua	27.40 29.21	57.93	26.98 29.94	55.93	24.51 29.35	51.49				
Peso de la Lata	57.40 61.73	67.45	59.14 63.24	67.66	63.95 59.66	66.87				
Peso de muestra seca	282.95 297.42	289.59	269.51 305.36	302.26	273.19 286.48	304.20				
Contenido de humedad %	9.68 9.82	20.00	10.01 9.80	18.50	8.97 10.25	16.93				
Promedio de cont. De humedad	9.75		9.91		9.61					
Peso Unitario de la muestra seca	1.550		1.608		1.679					
<b>CALCULO DE EXPANSION</b>				$%E = \frac{Lf - Lo}{50}$						
EXT: 0,001 pulg				EXPANSION h=5"						
Fecha	Hora	Tiempo Trans en días	Molde Nº 1		Molde Nº 2		Molde Nº 3			
			Lectura a	Expansión 1"x10³ %	Lectura Extens.	Expansión 1"x10³ %	Lectura a	Expansión 1"x10³ %		
21-mar	11:00	0	15	0.015	191	0.191	161	0.161		
22-mar	11:00	1	15	0.015	191	0.191	161	0.161		
23-mar	11:00	2	-	-	-	-	-	-		
24-mar	11:00	3	-	-	-	-	-	-		
25-mar	11:00	4	15	0.015	191	0.191	161	0.161		
C.B.R.				0.1" → Carga Patrón = 3000[lb]			0.2" → Carga Patrón = 4500[lb]			
Tiempo	Penetración Pulg.	Molde Nº 1		Molde Nº 2		Molde Nº 3				
		Lect. Ext.	Carga libras	CBR %	Lect. Ext.	Carga libras	CBR %	Lect. Ext.	Carga libras	CBR %
00:00	0.000	0	0		0	0	0	0		
00:30	0.025	1.0	86		2.0	125	6.0	282		
01:00	0.050	3.0	164		4.0	204	14.0	597		
01:30	0.075	4.0	204		8.0	361	22.0	911		
02:00	0.100	6.5	302	10.1	10.0	439	14.6	27.0	1107	36.9
04:00	0.200	12.0	518	11.5	15.5	655	14.6	31.0	1264	28.1
06:00	0.300	15.0	636		16.0	675		33.0	1343	
08:00	0.400	16.0	675		16.0	675		33.0	1343	
10:00	0.500	17.0	714		16.0	675		33.0	1343	

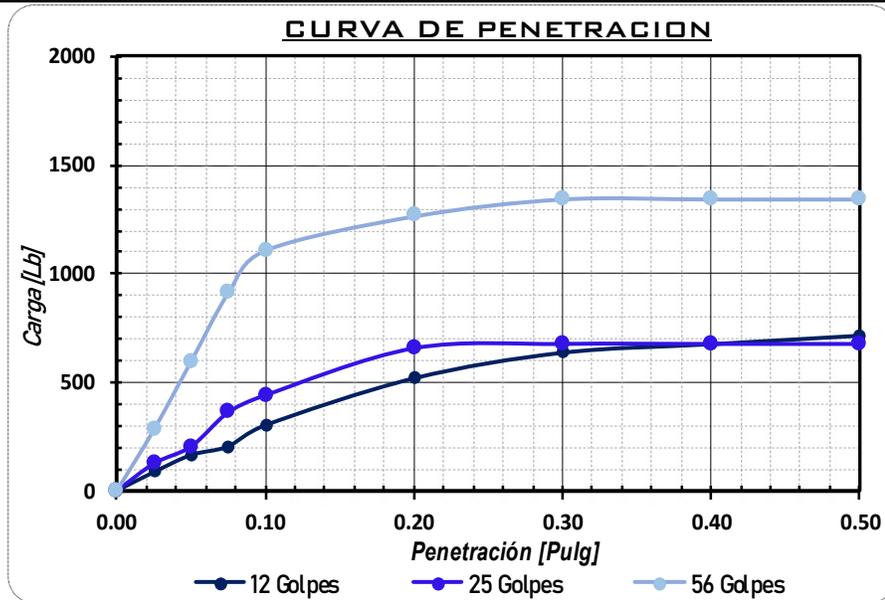


PROYECTO: Estabilización  
PROCEDENCIA: Churalla Chico  
N° MUESTRA: I

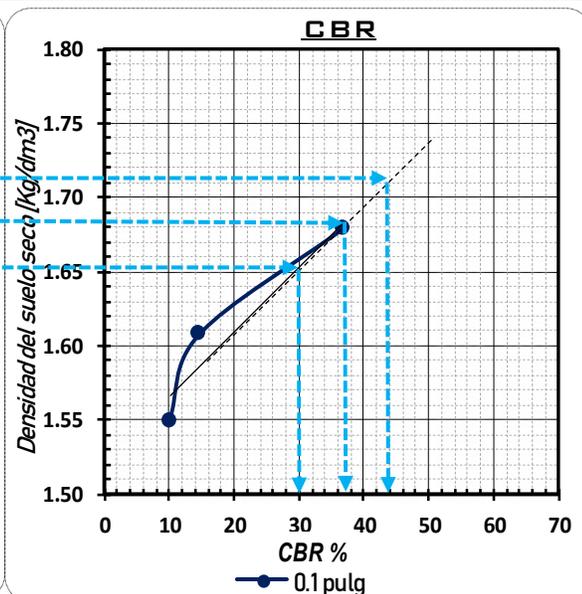
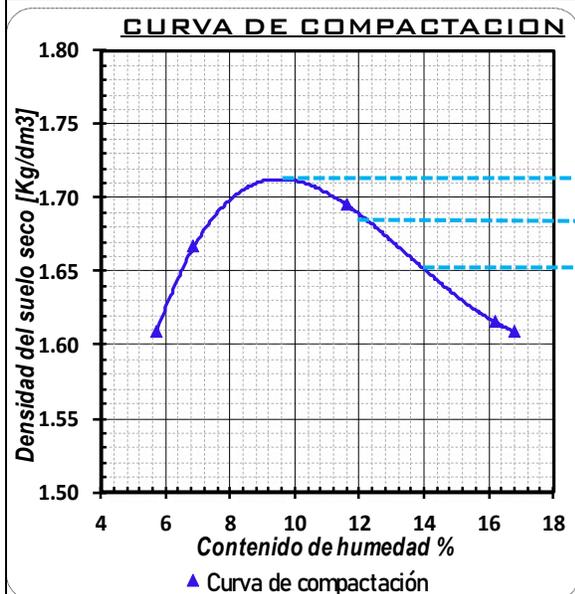
REALIZADO POR:  
NORMA:  
FECHA:

Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
AASHTO T193  
#####

**RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)**



Porcentaje de Humedad :	5.72	6.87	11.63	16.20	16.81	Ds <sub>max</sub> (kg/dm <sup>3</sup> )	1.550	1.608	1.679
Densidad del suelo seco :	1.608	1.666	1.695	1.616	1.609	CBR (0.1)	10.065	14.647	36.905



%	Ds <sub>max</sub> kg/dm <sup>3</sup>	CBR
100%	1.714	44.0
97%	1.663	37.0
95%	1.628	30.0

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL		INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M. LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A	
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T193
Nº MUESTRA:	1	FECHA:	4-abr-24
<b>RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>HUM. OPT.</b>	<b>DEN. SECA MAX.</b>	
SUELO NATURAL_E2	9.96 %	1.714 kg/dm <sup>3</sup>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO</b>			
Molde Nro	1	2	3
Nro de capas	5	5	5
Nro de golpes por capa	12	25	56
<b>Condición de la muestra</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>	<b>Antes de mojar</b>
			<b>Después de mojar</b>
			<b>Antes de mojar</b>
			<b>Después de mojar</b>
Peso muestra hum. + molde (Kg)	11.333	11.674	10.867
Peso del molde (Kg)	7.285	7.285	6.670
Peso muestra húmeda	4.048	4.389	4.197
Volumen de la muestra (dm <sup>3</sup> )	2.346	2.346	2.316
Peso Unitario muestra húmeda	1.725	1.871	1.812
			1.946
			1.856
			1.970
<b>Muestra de humedad del:</b>	<b>Fondo Superf</b>	<b>2" Superf</b>	<b>Fondo Superf</b>
			<b>2" Superf</b>
			<b>Fondo Superf</b>
			<b>2" Superf</b>
Lata Nro	57 24	136	35 42
Peso muestra húmeda + Lata	298.31 288.45	454.50	325.76 387.94
Peso muestra seca + Lata	276.38 266.87	395.35	302.31 360.57
Peso del agua	21.93 21.58	59.15	23.45 27.37
Peso de la Lata	73.56 57.37	81.88	69.36 75.69
Peso de muestra seca	202.82 209.50	313.47	232.95 284.88
Contenido de humedad %	10.81 10.30	18.87	10.07 9.61
Promedio de cont. De humedad	10.56		9.84
Peso Unitario de la muestra seca	1.561		1.650
			1.686
<b>CALCULO DE EXPANSION</b>			
$%E = \frac{Lf - Lo}{50}$			
EXT: 0,001 pulg			
EXPANSION h=5"			
	<b>Tiempo</b>	<b>Molde N° 1</b>	<b>Molde N° 2</b>
			<b>Molde N° 3</b>
<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Lectur</b>	<b>Lectura</b>
	<b>Trans en días</b>	<b>Expansión</b>	<b>Expansión</b>
		<b>1"x10<sup>3</sup></b>	<b>1"x10<sup>3</sup></b>
		<b>%</b>	<b>%</b>
		<b>Extens.</b>	<b>Extens.</b>
		<b>1"x10<sup>3</sup></b>	<b>1"x10<sup>3</sup></b>
		<b>%</b>	<b>%</b>
4-abr	11:00	0 193	0.193
5-abr	11:00	1 194	0.194
6-abr	11:00	2 -	-
7-abr	11:00	3 -	-
8-abr	11:00	4 194	0.194
		0.02	0
<b>C.B.R.</b>			
0.1" → Carga Patrón = 3000 [lb]			
0.2" → Carga Patrón = 4500 [lb]			
		<b>Molde N° 1</b>	<b>Molde N° 2</b>
			<b>Molde N° 3</b>
<b>Tiempo</b>	<b>Penetración Pulg.</b>	<b>Lect.</b>	<b>Lect.</b>
		<b>Carga</b>	<b>Carga</b>
		<b>libras</b>	<b>libras</b>
		<b>CBR</b>	<b>CBR</b>
		<b>%</b>	<b>%</b>
		<b>Ext.</b>	<b>Ext.</b>
		<b>libras</b>	<b>libras</b>
		<b>%</b>	<b>%</b>
00:00	0.000	0 0	0 0
00:30	0.025	2.0 125	5.0 243
01:00	0.050	4.0 204	9.0 400
01:30	0.075	6.0 282	12.5 538
02:00	0.100	8.0 361	15.5 655
04:00	0.200	14.5 616	16.0 675
06:00	0.300	15.0 636	16.0 675
08:00	0.400	15.2 644	16.0 675
10:00	0.500	16.0 675	16.0 675
		12.0	21.8
		13.7	15.0
			36.9
			34.6

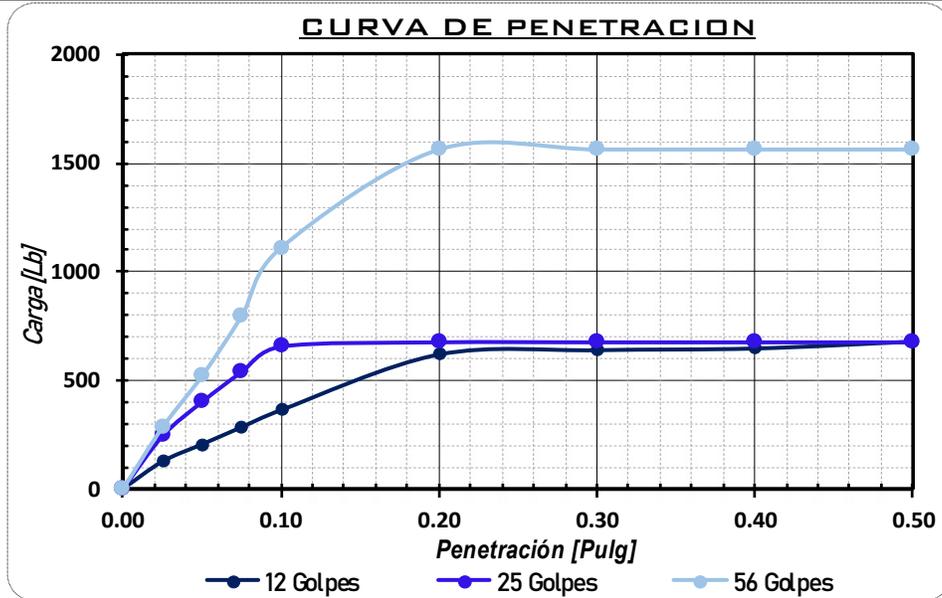


PROYECTO: Estabilización  
PROCEDENCIA: Churalla Chico  
N° MUESTRA: I

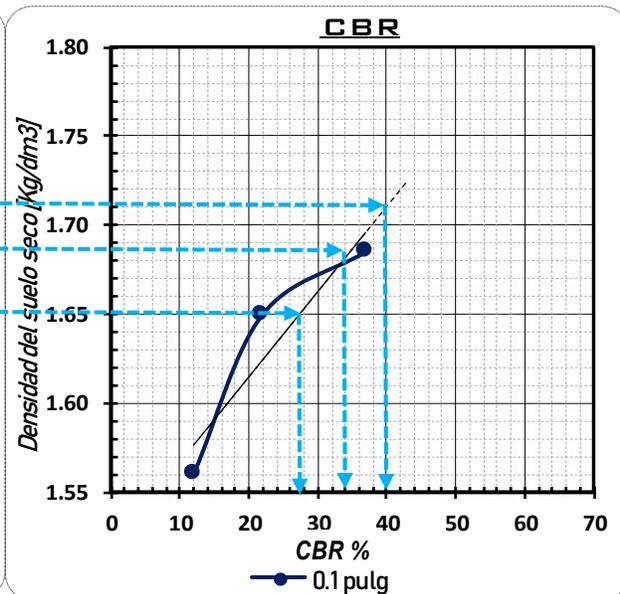
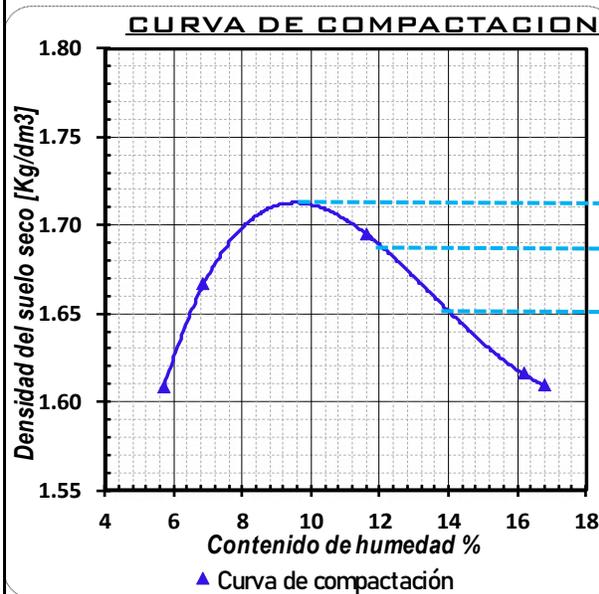
REALIZADO POR:  
NORMA:  
FECHA:

Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
AASHTO T193  
4-abr-24

**RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)**



Porcentaje de Humedad :	5.72	6.87	11.63	16.20	16.81	$D_{s,max}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	1.561	1.650	1.686
Densidad del suelo seco :	1.608	1.666	1.695	1.616	1.609	CBR (0.1)	12.029	21.848	36.905



%	$D_{s,max}$ kg/dm <sup>3</sup>	CBR
100%	1.714	40.0
97%	1.663	34.0
95%	1.628	27.0

ANEXO A-11. Compresión Simple

 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>		<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b> 					
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque				
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO 93				
Nº MUESTRA:	I	FECHA:					
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>							
<b>SUELO NATURAL</b>							
<b>DATOS DE PRUEBA</b>			<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>				
Densidad seca máxima :	1.664	kg/dm <sup>3</sup>	Nº Probetas :	3			
Humedad óptima =	12.25	%	Nro Capas :	3			
			Nro golpes / capa :	25			
			Peso del molde :	4.150 kg			
			Volumen de molde :	0.939 dm <sup>3</sup>			
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>							
		<b>DURABILIDAD</b>		<b>COMPRESION SIMPLE</b>			
Especimen Nº		MI_D	M2_D	MI_C	M2_C	M3_C	
Suelo humedo + molde :	kg	5.903	5.913	5.890	5.894	5.899	
Peso del suelo humedo :	kg	1.753	1.763	1.740	1.744	1.749	
Densidad del suelo humedo :		1.867	1.878	1.853	1.857	1.863	
Cápsula Nº :		124	14	128	21	67	
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	400.07	375.14	439.41	554.66	425.78	
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	361.34	339.95	397.94	499.47	386.62	
Peso del agua :	Pa [g]	38.73	35.19	41.47	55.19	39.16	
Peso de Cápsula :	Pc [g]	63.85	68.99	69.21	69.23	81.86	
Peso suelo seco :	Ps [g]	297.49	270.96	328.73	430.24	304.76	
Porcentaje de Humedad :	% h	13.02	12.99	12.62	12.83	12.85	
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.652	1.662	1.645	1.646	1.651	TOLERANCIA
Variación de humedad :		0.77	0.74	0.37	0.58	0.60	1%
Variación de Densidad seca :		0.012	0.002	0.018	0.017	0.013	0.048
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>							
Especimen Nº		MI_C	M2_C	M3_C			
Diametro :	D [cm]	-	10.135	10.190			
Altura :	H [cm]	-	11.495	11.520			
Area :	cm <sup>2</sup>	-	80.67	81.55			
Carga total de fatiga :	KN	-	1.80	1.90			
Resistencia :	Mpa	-	0.223	0.233			
Resistencia promedio :	Mpa		0.228				

ANEXO B. Planilla de Ensayos del suelo-cemento

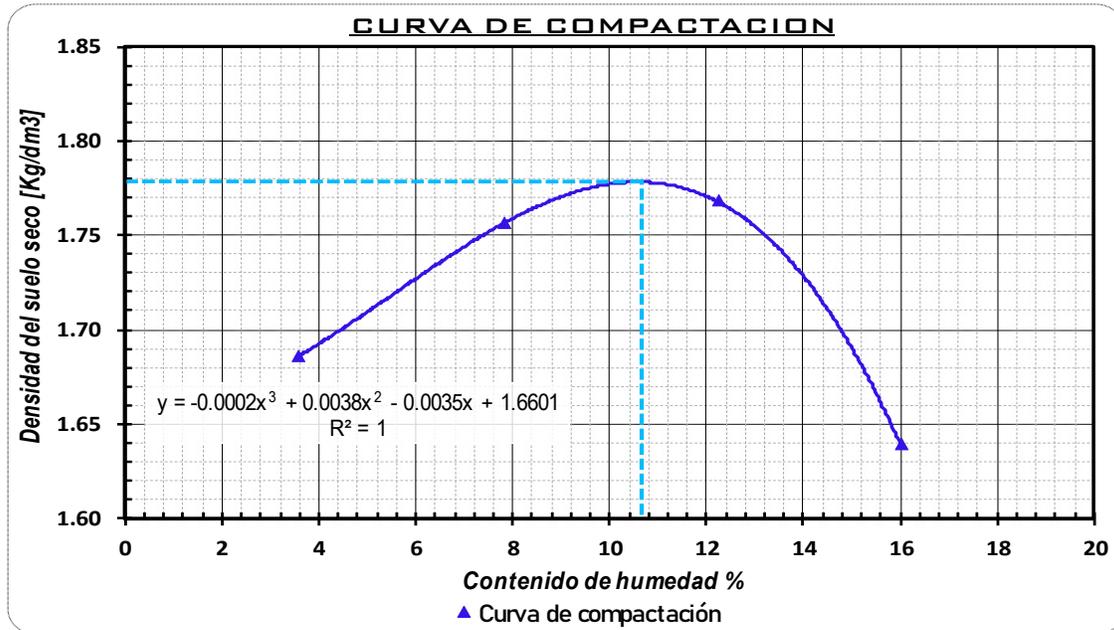
ANEXO B-1. Proctor Estándar D-I

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	<b>LABORATORIO DE SUELOS</b>	
	<b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>U.M.S.A</b>	
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASTHO T99 A
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	18-abr-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)**

**SUELO NATURAL - (9%) CEMENTO \_ ENSAYO 1**

Nro Capas :		3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25
Suelo humedo + molde :	kg	5.794	5.933	6.018	5.940
Peso molde :	kg	4.153	4.153	4.153	4.153
Peso del suelo humedo :	kg	1.641	1.780	1.865	1.787
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.940	0.940	0.940	0.940
Densidad del suelo humedo :		1.746	1.894	1.984	1.901
Cápsula N° :		30	136	7	26
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	337.64	460.78	397.92	540.46
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	328.76	433.32	360.81	475.94
Peso del agua :	Pa [g]	8.88	27.46	37.11	64.52
Peso de Cápsula :	Pc [g]	79.35	81.87	57.36	72.81
Peso suelo seco :	Ps [g]	249.41	351.45	303.45	403.13
Porcentaje de Humedad :	% h	3.56	7.81	12.23	16.00
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.686	1.756	1.768	1.639



**Densidad seca máxima : 1.779 kg/dm<sup>3</sup>**

**Humedad óptima = 10.60 %**

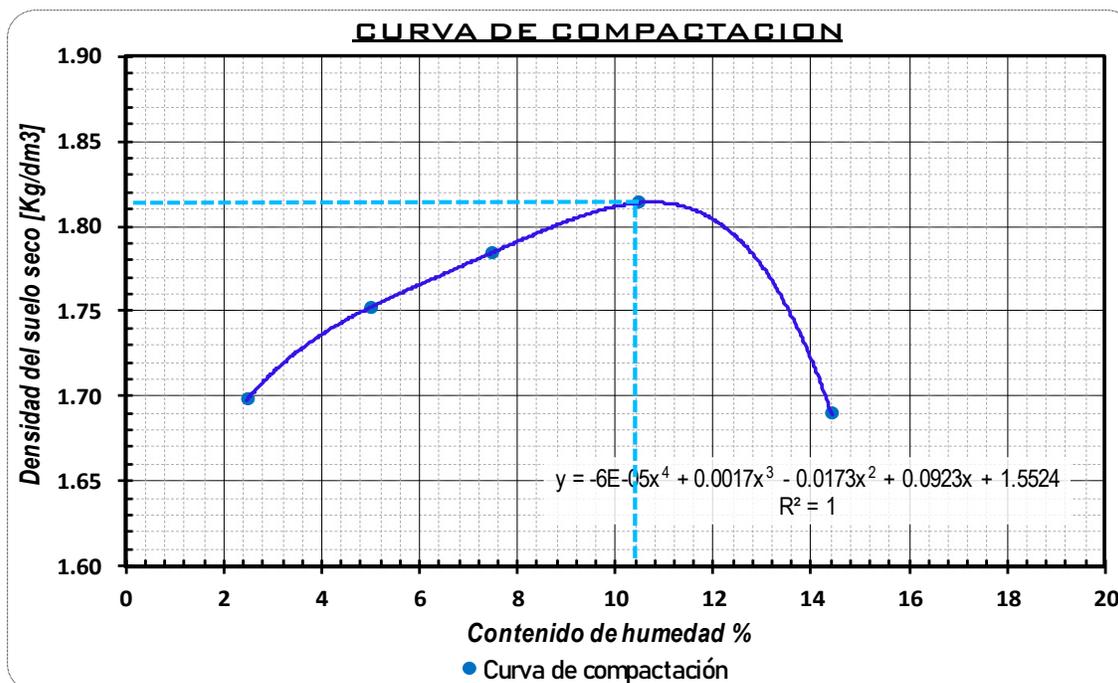


PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T99 A  
 N° MUESTRA: I FECHA: 18-abr-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)**

**SUELO NATURAL - (9%) CEMENTO \_ ENSAYO 2**

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo húmedo + molde :	kg	5.788	5.882	5.956	6.036	5.970
Peso molde :	kg	4.153	4.153	4.153	4.153	4.153
Peso del suelo húmedo :	kg	1.635	1.729	1.803	1.883	1.817
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940
Densidad del suelo húmedo :		1.739	1.839	1.918	2.003	1.933
Cápsula N° :		56	33	20	37	21
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	318.64	387.87	372.34	403.11	499.82
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	312.40	372.14	350.58	371.01	445.56
Peso del agua :	Pa [g]	6.24	15.73	21.76	32.10	54.26
Peso de Cápsula :	Pc [g]	59.04	56.51	59.99	63.95	69.21
Peso suelo seco :	Ps [g]	253.36	315.63	290.59	307.06	376.35
Porcentaje de Humedad :	% h	2.46	4.98	7.49	10.45	14.42
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.698	1.752	1.784	1.814	1.689



**Densidad seca máxima : 1.812 kg/dm<sup>3</sup>**

**Humedad óptima = 10.40 %**

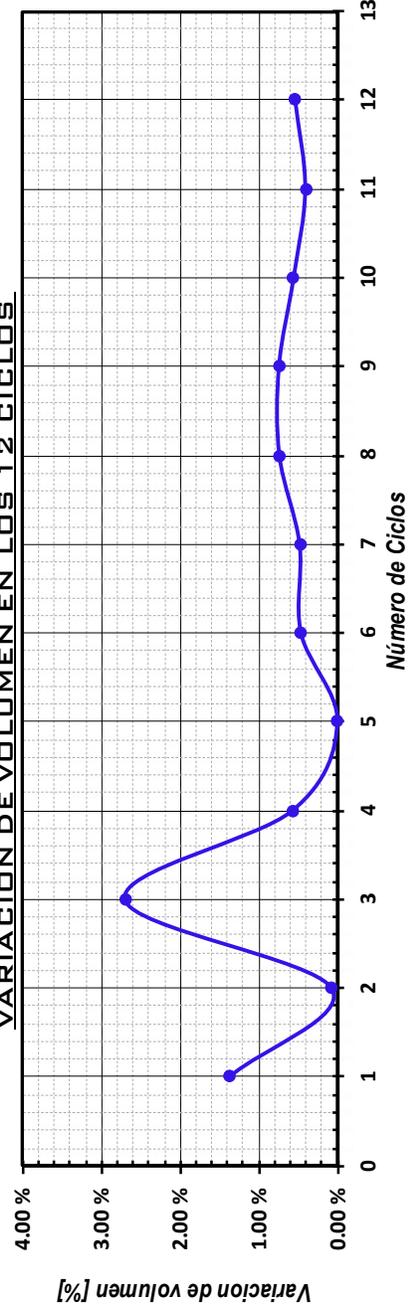
ANEXO B-2. Compresión Simple D-I

 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>		<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b> 				
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque			
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO 93			
Nª MUESTRA:	I	FECHA:	19-abr-24			
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>						
<b>SUELO NATURAL - (9%) CEMENTO</b>						
<b>DATOS DE PRUEBA</b>		<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>				
Densidad seca máxima :	1.796 kg/dm <sup>3</sup>	Nº Probetas :	3			
Humedad óptima =	10.50 %	Nro Capas :	3			
		Nro golpes / capa :	25			
		Peso del molde :	4.150 kg			
		Volumen de molde :	0.939 dm <sup>3</sup>			
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>						
	<b>DURABILIDAD</b>		<b>COMPRESION SIMPLE</b>			
Especimen N°	<b>M1_D</b>	<b>M2_D</b>	<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>	
Suelo humedo + molde :	kg 5.984	6.004	6.009	5.994	5.983	
Peso del suelo humedo :	kg 1.834	1.854	1.859	1.844	1.833	
Densidad del suelo humedo :	1.953	1.974	1.980	1.964	1.952	
Cápsula N° :	26	37	43	35	37	
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g] 401.22	355.86	365.87	404.65	327.59	
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g] 370.40	327.90	337.27	372.92	304.22	
Peso del agua :	Pa [g] 30.82	27.96	28.60	31.73	23.37	
Peso de Cápsula :	Pc [g] 72.82	63.95	57.36	61.88	63.97	
Peso suelo seco :	Ps [g] 297.58	263.95	279.91	311.04	240.25	
Porcentaje de Humedad :	% h 10.36	10.59	10.22	10.20	9.73	
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup> 1.770	1.785	1.796	1.782	1.779	TOLERANCIA
Variación de humedad :	0.14	0.09	0.28	0.30	0.77	1%
Variación de Densidad seca :	0.026	0.010	0.001	0.013	0.016	0.048
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>						
Especimen N°		<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>		
Diametro :	D [cm]	10.240	10.220	10.125		
Altura :	H [cm]	11.550	11.620	11.495		
Area :	cm <sup>2</sup>	82.35	82.03	80.52		
Carga total de fatiga :	KN	22.00	21.60	21.00		
Resistencia :	Mpa	2.671	2.633	2.608		
Resistencia promedio :	Mpa		2.638			

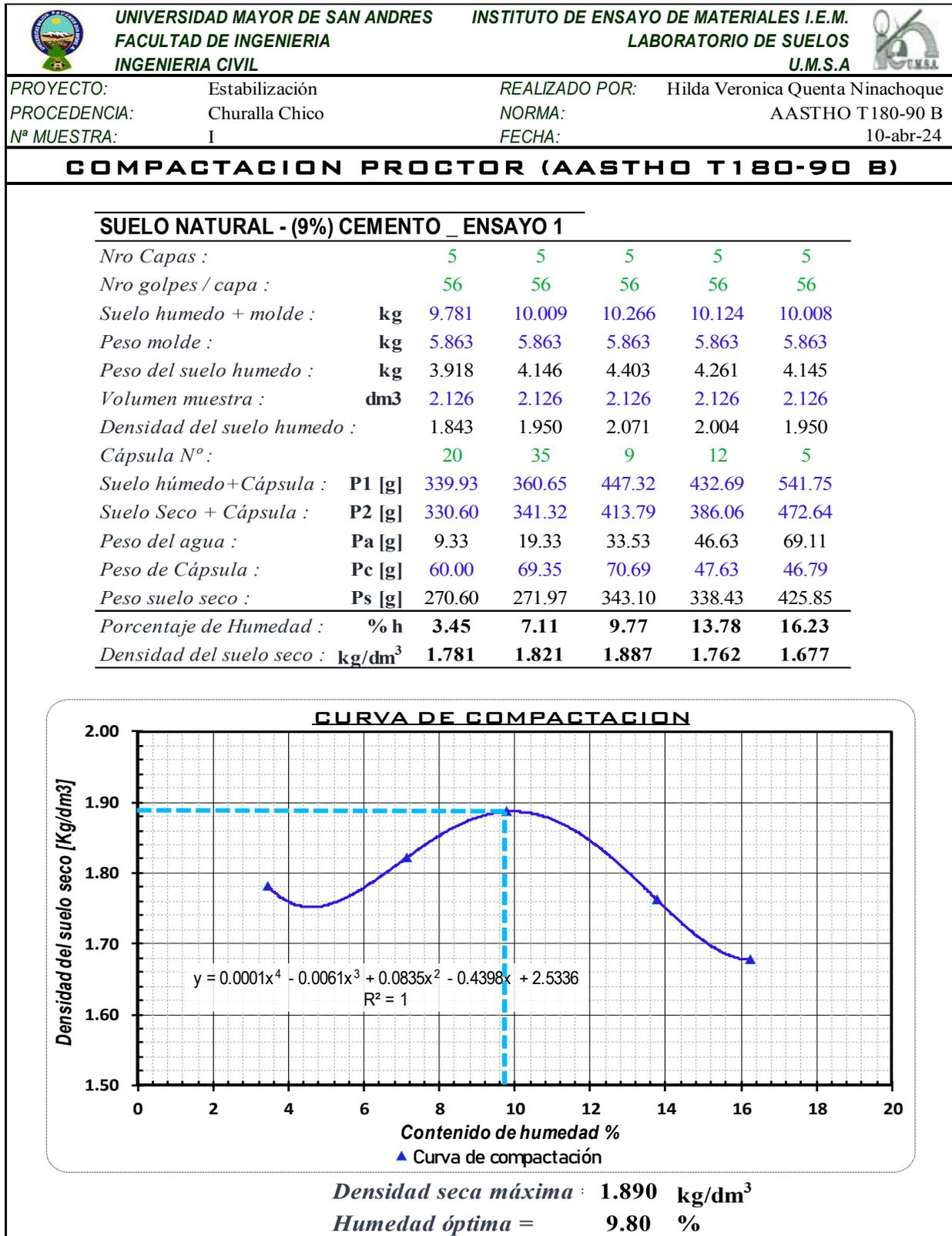


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL		INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M. LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A										
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Nimachoque									
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO T 135									
Nº MUESTRA:	1	FECHA:	26-abr-24									
<b>DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)</b>												
<b>CALCULO DE VARIACION DE VOLUMEN</b>												
SUELO NATURAL - (9%) CEMENTO												
Diametro inicial	10.200	Volumen inicial:	943.78									
Altura final:	11.550											
Fecha	26-abr	29-abr	2-may	6-may	8-may	10-may	13-may	15-may	17-may	20-may	22-may	24-may
Nº de Ciclo =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nº de Probeta =	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D
Diametro = cm	10.177	10.133	10.243	10.120	10.095	10.123	10.105	10.133	10.130	10.135	10.085	10.090
Altura = cm	11.605	11.523	11.565	11.575	11.550	11.573	11.620	11.456	11.465	11.578	11.548	11.570
Volumen = cm <sup>3</sup>	943.94	929.27	952.99	931.05	924.45	931.31	931.90	923.75	924.02	934.01	922.42	925.14
Diametro = cm	10.140	10.137	10.130	10.123	10.128	10.130	10.090	10.120	10.128	10.115	10.105	10.118
Altura = cm	11.528	11.505	11.505	11.500	11.478	11.610	11.598	11.570	11.555	11.558	11.550	11.570
Volumen = cm <sup>3</sup>	930.90	928.47	927.25	925.62	924.57	935.71	927.33	930.65	930.97	928.72	926.28	930.19
Diferencia de Volumenes	12.89	15.32	16.54	18.16	19.21	8.07	16.45	13.14	12.81	15.06	17.50	13.60
variación volumétrica %	1.38 %	0.09 %	2.70 %	0.58 %	0.01 %	0.47 %	0.49 %	0.75 %	0.75 %	0.57 %	0.42 %	0.55 %

**VARIACION DE VOLUMEN EN LOS 12 CICLOS**



ANEXO B-4. Proctor Modificado D-I





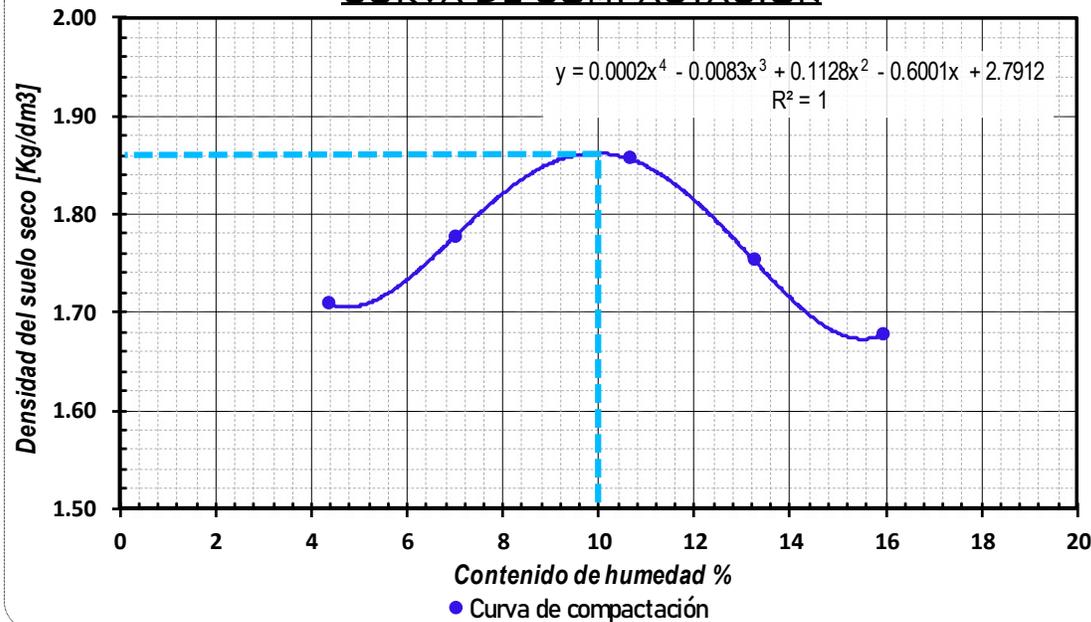
PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T180-90 B  
 N° MUESTRA: I FECHA: 11-abr-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T180-90 B)**

**SUELO NATURAL - (9%) CEMENTO \_ ENSAYO 2**

Nro Capas :		5	5	5	5	5
Nro golpes / capa :		56	56	56	56	56
Suelo humedo + molde :	kg	9.654	9.905	10.229	10.084	9.998
Peso molde :	kg	5.863	5.863	5.863	5.863	5.863
Peso del suelo humedo :	kg	3.791	4.042	4.366	4.221	4.135
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	2.126	2.126	2.126	2.126	2.126
Densidad del suelo humedo :		1.783	1.901	2.054	1.985	1.945
Cápsula N° :		12	5	51	2	3
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	332.75	336.99	422.60	456.21	571.46
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	320.83	318.02	385.37	406.94	497.82
Peso del agua :	Pa [g]	11.92	18.97	37.23	49.27	73.64
Peso de Cápsula :	Pc [g]	47.63	46.80	35.83	34.63	35.91
Peso suelo seco :	Ps [g]	273.20	271.22	349.54	372.31	461.91
Porcentaje de Humedad :	% h	4.36	6.99	10.65	13.23	15.94
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.709	1.777	1.856	1.753	1.678

**CURVA DE COMPACTACION**



Densidad seca máxima : **1.860 kg/dm<sup>3</sup>**

Humedad óptima = **10.00 %**

ANEXO B-5. Relación Soporte California CBR D-I

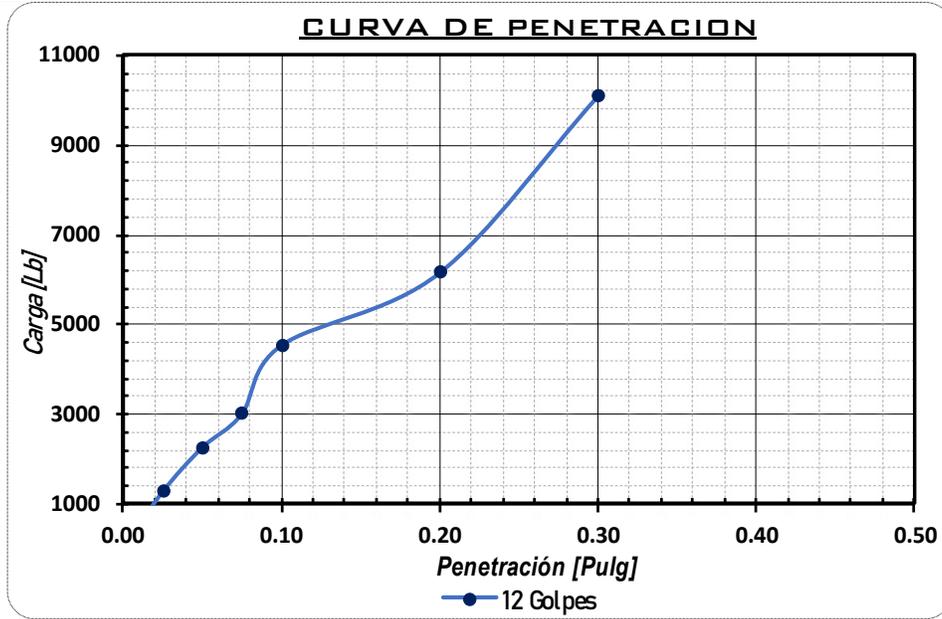
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL		INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M. LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A									
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque								
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T193								
Nº MUESTRA:	1	FECHA:	29-abr-24								
<b>RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)</b>											
<b>MUESTRA</b>	<b>HUM. OPT.</b>	<b>DEN. SECA MAX.</b>									
SUELO-CEMENTO 9%	9.90 %	1.875 kg/dm <sup>3</sup>									
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO</b>											
Molde Nro	10	11	12								
Nro de capas	5	5	5								
Nro de golpes por capa	12	25	56								
<b>Condición de la muestra</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>					
Peso muestra hum. + molde (Kg)	12.449	12.667	12.583	12.769	12.299	12.502					
Peso del molde (Kg)	7.952	7.952	7.863	7.863	7.723	7.723					
Peso muestra húmeda	4.497	4.715	4.720	4.906	4.576	4.779					
Volumen de la muestra (dm <sup>3</sup> )	2.318	2.318	2.323	2.323	2.273	2.273					
Peso Unitario muestra húmeda	1.940	2.034	2.032	2.112	2.013	2.103					
<b>Muestra de humedad del:</b>	<b>Fondo</b>	<b>Superf</b>	<b>2" Superf</b>	<b>Fondo</b>	<b>Superf</b>	<b>2" Superf</b>	<b>Fondo</b>	<b>Superf</b>	<b>2" Superf</b>		
Lata Nro	37	35	57	26	20	33	24	9	38		
Peso muestra húmeda + Lata	369.71	413.76	-	367.66	327.07	-	291.30	445.21	-		
Peso muestra seca + Lata	342.52	383.29	-	341.97	303.97	-	272.88	415.31	-		
Peso del agua	27.19	30.47	-	25.69	23.10	-	18.42	29.90	-		
Peso de la Lata	63.96	69.34	73.55	72.81	59.99	56.55	57.36	70.68	79.39		
Peso de muestra seca	278.56	313.95	-	269.16	243.98	-	215.52	344.63	-		
Contenido de humedad %	9.76	9.71	-	9.54	9.47	-	8.55	8.68	-		
Promedio de cont. De humedad	<b>9.73</b>			<b>9.51</b>			<b>8.61</b>				
Peso Unitario de la muestra seca	<b>1.768</b>			<b>1.855</b>			<b>1.854</b>				
<b>CALCULO DE EXPANSION</b>				$%E = \frac{Lf - Lo}{50}$							
<b>EXT: 0,001 pulg</b>				<b>EXPANSION h=5"</b>							
		<b>Tiempo</b>	<b>Molde N° 10</b>			<b>Molde N° 11</b>			<b>Molde N° 12</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Trans en días</b>	<b>Lectur a</b>	<b>Expansión 1"x10<sup>3</sup></b>	<b>%</b>	<b>Lectura Extens.</b>	<b>1"x10<sup>3</sup></b>	<b>%</b>	<b>Lectur a</b>	<b>1"x10<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
29-abr	11:30	0	72	0.072		168	0.168		119	0.119	
30-abr	11:30	1	-	-		-	-		-	-	
1-may	11:30	2	-	-		-	-		-	-	
2-may	11:30	3	-	-		-	-		-	-	
3-may	11:30	4	166	0.166	1.88	168	0.168	0	119	0.119	0
<b>C.B.R.</b>				0.1" → Carga Patrón = 3000 [lb] 0.2" → Carga Patrón = 4500 [lb]							
		<b>Tiempo</b>	<b>Molde N° 10</b>			<b>Molde N° 11</b>			<b>Molde N° 12</b>		
<b>Penetración Pulg.</b>	<b>Lect. Ext.</b>	<b>Carga libras</b>	<b>CBR %</b>	<b>Lect. Ext.</b>	<b>Carga libras</b>	<b>CBR %</b>	<b>Lect. Ext.</b>	<b>Carga libras</b>	<b>CBR %</b>		
00:00	0.000	0	0	-	0	-	-	0	-		
00:30	0.025	31.0	1264	-	-	-	-	-	-		
01:00	0.050	56.0	2246	-	-	-	-	-	-		
01:30	0.075	75.0	2993	-	-	-	-	-	-		
02:00	0.100	114.0	4524	150.8	-	0.0	-	-	0.0		
04:00	0.200	155.0	6135	136.3	-	0.0	-	-	0.0		
06:00	0.300	255.0	10063	-	-	-	-	-	-		
08:00	0.400	-	-	-	-	-	-	-	-		
10:00	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-		



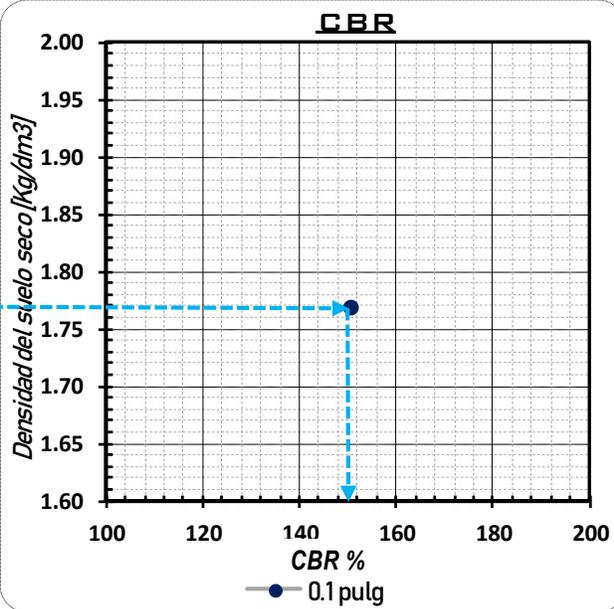
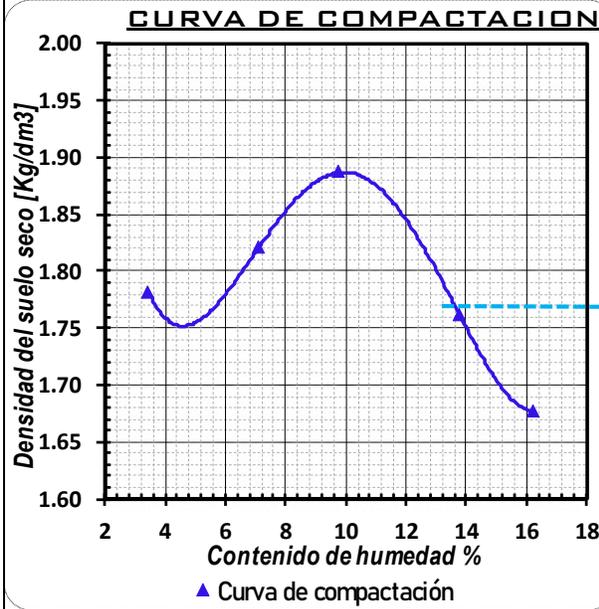
PROYECTO: Estabilización  
PROCEDENCIA: Churalla Chico  
N° MUESTRA: I

REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
NORMA: AASHTO T193  
FECHA: 29-abr-24

**RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)**



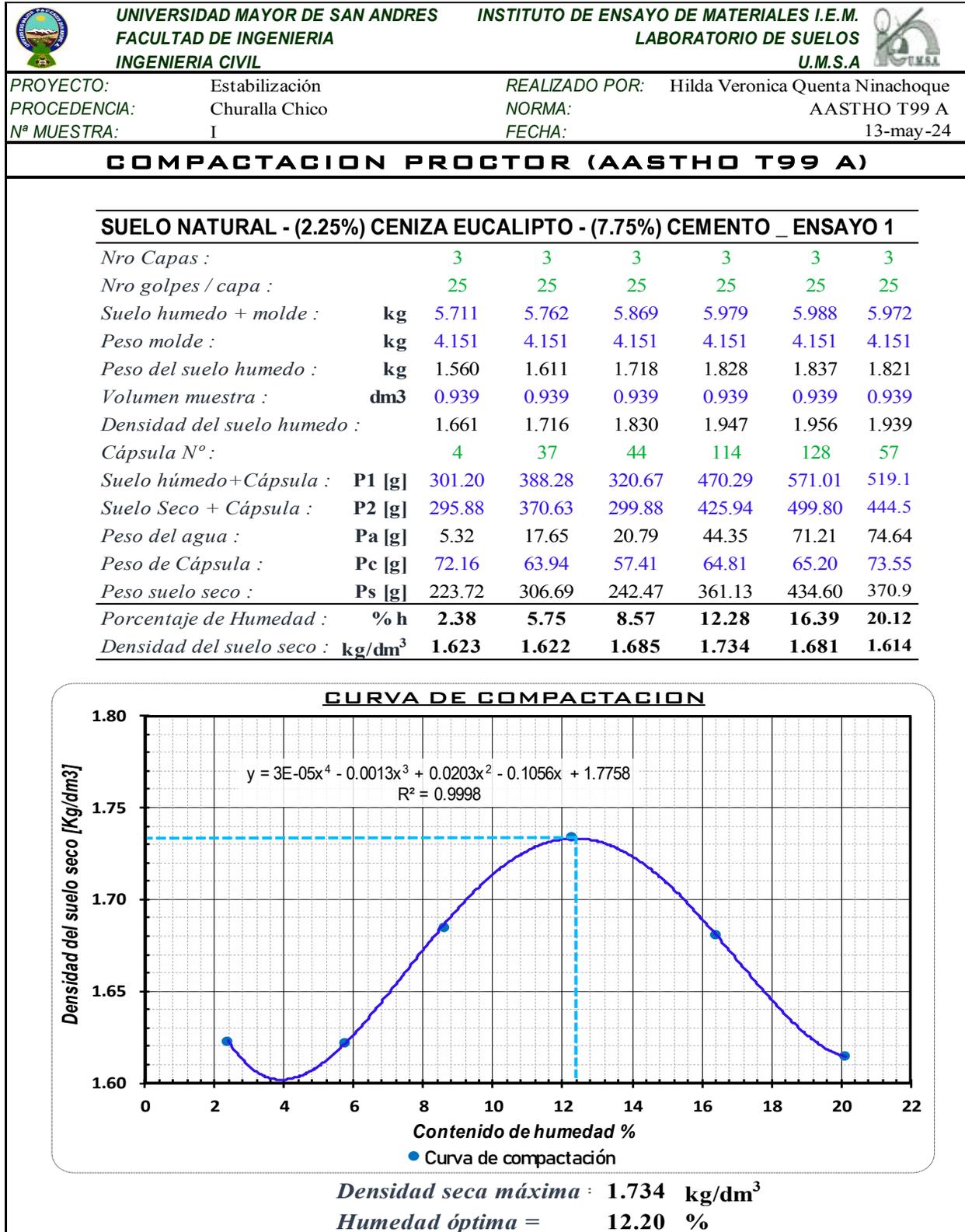
Porcentaje de Humeda.	3.45	7.11	9.77	13.78	16.23	$D_{s_{max}}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	1.768	1.855	1.854
Densidad del suelo sec	1.781	1.821	1.887	1.762	1.677	CBR (0.1)	150.8	0.000	0.000



%	$D_{s_{max}}$ kg/dm <sup>3</sup>	CBR
100%	1.875	-
97%	1.819	-
94%	1.768	150.8

ANEXO C. Planilla de Ensayos del suelo-ceniza de eucalipto-cemento

ANEXO C-1. Proctor Estándar D-II





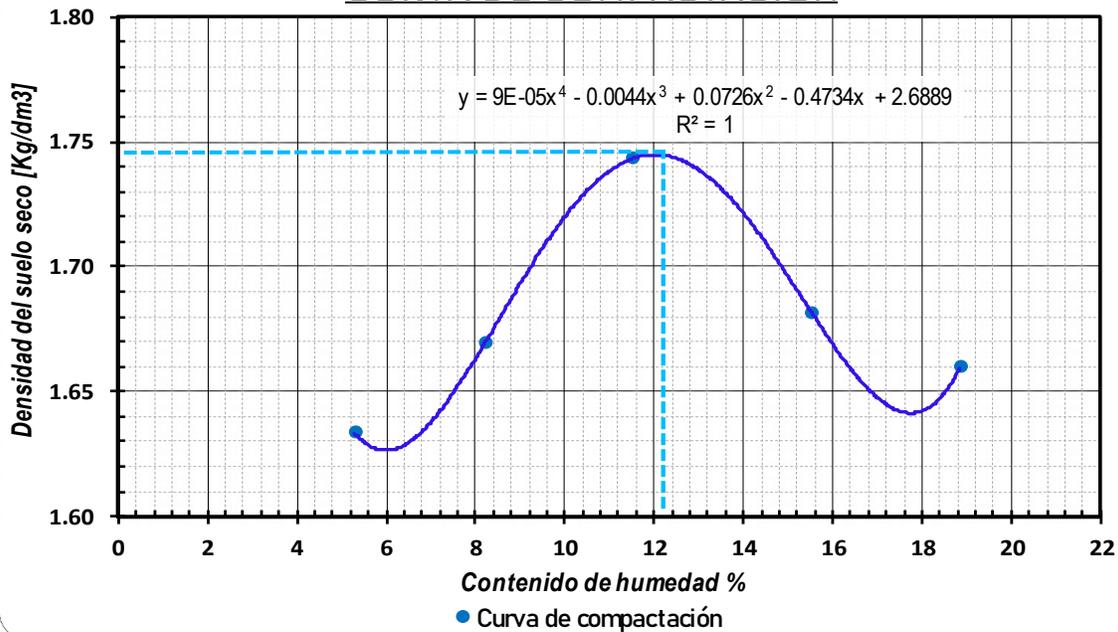
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T99 A
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	13-may-24

### COMPACTACION PROCTOR (AASHTO T99 A)

#### SUELO NATURAL - (2.25%) CENIZA EUCALIPTO - (7.75%) CEMENTO \_ ENSAYO 2

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo húmedo + molde :	kg	5.765	5.846	5.975	5.974	6.002
Peso molde :	kg	4.150	4.150	4.150	4.150	4.150
Peso del suelo húmedo :	kg	1.615	1.696	1.825	1.824	1.852
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
Densidad del suelo húmedo :		1.720	1.806	1.944	1.942	1.972
Cápsula Nº :		31	38	11	42	19
Suelo húmedo + Cápsula :	P1 [g]	359.57	375.49	372.87	421.30	291.88
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	344.56	353.04	341.39	374.80	256.56
Peso del agua :	Pa [g]	15.01	22.45	31.48	46.50	35.32
Peso de Cápsula :	Pc [g]	61.72	79.39	67.64	75.63	69.18
Peso suelo seco :	Ps [g]	282.84	273.65	273.75	299.17	187.38
Porcentaje de Humedad :	% h	5.31	8.20	11.50	15.54	18.85
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.633	1.669	1.743	1.681	1.660

#### CURVA DE COMPACTACION



Densidad seca máxima : 1.745 kg/dm<sup>3</sup>  
Humedad óptima = 12.10 %

ANEXO C-2. Compresión Simple D-II

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b>					
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	<b>LABORATORIO DE SUELOS</b>					
	<b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>U.M.S.A</b>					
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque				
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO 93				
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	15-may-24				
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>							
<b>SUELO NATURAL - (2.25%) CENIZA EUCALIPTO - (7.75%) CEMENTO</b>							
<b>DATOS DE PRUEBA</b>			<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>				
Densidad seca máxima :	1.740	kg/dm <sup>3</sup>	Nº Probetas :	3			
Humedad óptima =	12.15	%	Nro Capas :	3			
			Nro golpes / capa :	25			
			Peso del molde :	4.150 kg			
			Volumen de molde :	0.939 dm <sup>3</sup>			
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>							
		<b>DURABILIDAD</b>		<b>COMPRESION SIMPLE</b>			
<i>Especimen N°</i>		<b>M1_D</b>	<b>M2_D</b>	<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>	
Suelo humedo + molde :	kg	5.959	5.962	5.974	5.972	5.964	
Peso del suelo humedo :	kg	1.809	1.812	1.824	1.822	1.814	
Densidad del suelo humedo :		1.927	1.930	1.942	1.940	1.932	
Cápsula N° :		137	16	22	173	12	
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	396.84	454.52	394.62	382.43	559.31	
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	360.75	411.03	357.69	345.81	502.22	
Peso del agua :	Pa [g]	36.09	43.49	36.93	36.62	57.09	
Peso de Cápsula :	Pc [g]	70.27	69.02	68.37	66.22	67.56	
Peso suelo seco :	Ps [g]	290.48	342.01	289.32	279.59	434.66	
Porcentaje de Humedad :	% h	12.42	12.72	12.76	13.10	13.13	
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.714	1.712	1.723	1.716	1.708	TOLERANCIA
Variación de humedad :		0.27	0.57	0.61	0.95	0.98	1%
Variación de Densidad seca :		0.026	0.027	0.017	0.024	0.032	0.048
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>							
<i>Especimen N°</i>		<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>			
Diametro :	D [cm]	10.135	10.185	10.195			
Altura :	H [cm]	11.520	11.580	11.545			
Area :	cm <sup>2</sup>	80.67	81.47	81.63			
Carga total de fatiga :	KN	16.60	16.40	17.50			
Resistencia :	Mpa	2.06	2.01	2.14			
Resistencia promedio :	Mpa	2.07					





UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA CIVIL

INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.  
LABORATORIO DE SUELOS  
U.M.S.A



PROYECTO: Estabilización

REALIZADO POR: Hilda Verónica Quenta Nimachoque

PROCEDENCIA:

NORMA: AASHTO T 135

N° MUESTRA: 1

FECHA: 22-may-24

### DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)

#### CALCULO DE VARIACION DE VOLUMEN

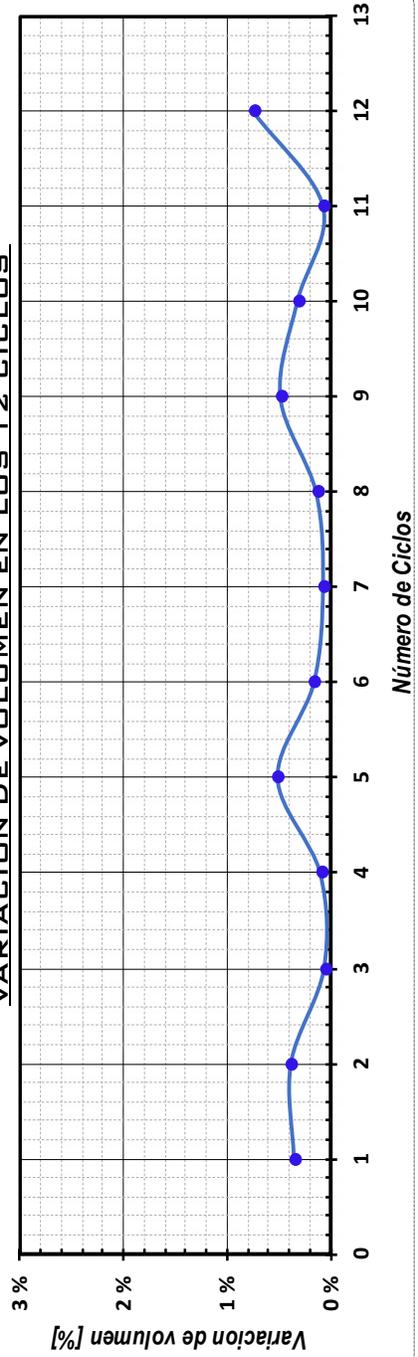
SUELO NATURAL - (2.25%) CENIZA EUCALIPTO - (7.75%) CEMENTO

Diametro inicia 10.105 Volumen inicial: 931.90

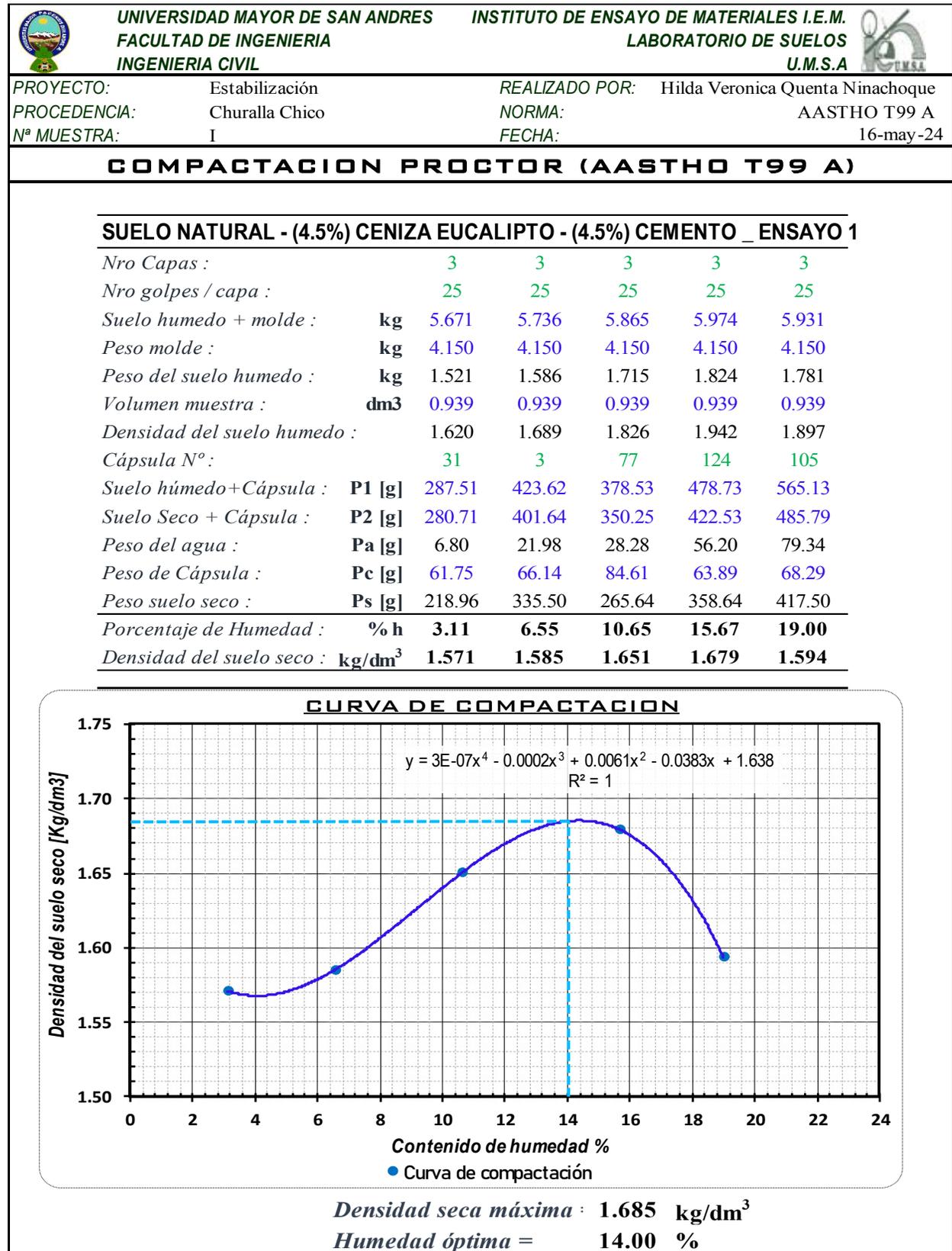
Altura final: 11.620

Fecha	22-may	24-may	27-may	31-may	3-jun	5-jun	7-jun	10-jun	12-jun	14-jun	17-jun
N° de Ciclo =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N° de Probeta =	MI_D										
Diametro = cm	10.177	10.168	10.163	10.143	10.145	10.163	10.165	10.155	10.118	10.133	10.140
Altura = cm	11.515	11.523	11.488	11.525	11.485	11.535	11.523	11.508	11.478	11.500	11.505
Volumen = cm <sup>3</sup>	936.62	935.55	931.79	931.15	928.38	935.64	935.09	932.03	922.90	927.25	929.08
Diametro = cm	10.160	10.158	10.158	10.140	10.123	10.173	10.165	10.165	10.128	10.127	10.167
Altura = cm	11.513	11.502	11.493	11.520	11.478	11.530	11.530	11.500	11.510	11.520	11.530
Volumen = cm <sup>3</sup>	933.36	932.00	931.28	930.29	923.66	937.08	935.69	933.26	927.34	927.84	936.00
Diferencia de Volúmenes	3.27	3.54	0.51	0.86	4.72	1.44	0.61	1.23	4.44	2.94	6.92
variación volumétrica %	0.35 %	0.38 %	0.05 %	0.09 %	0.51 %	0.15 %	0.07 %	0.13 %	0.48 %	0.32 %	0.75 %

VARIACION DE VOLUMEN EN LOS 12 CICLOS



ANEXO C-4. Proctor Estándar D-III



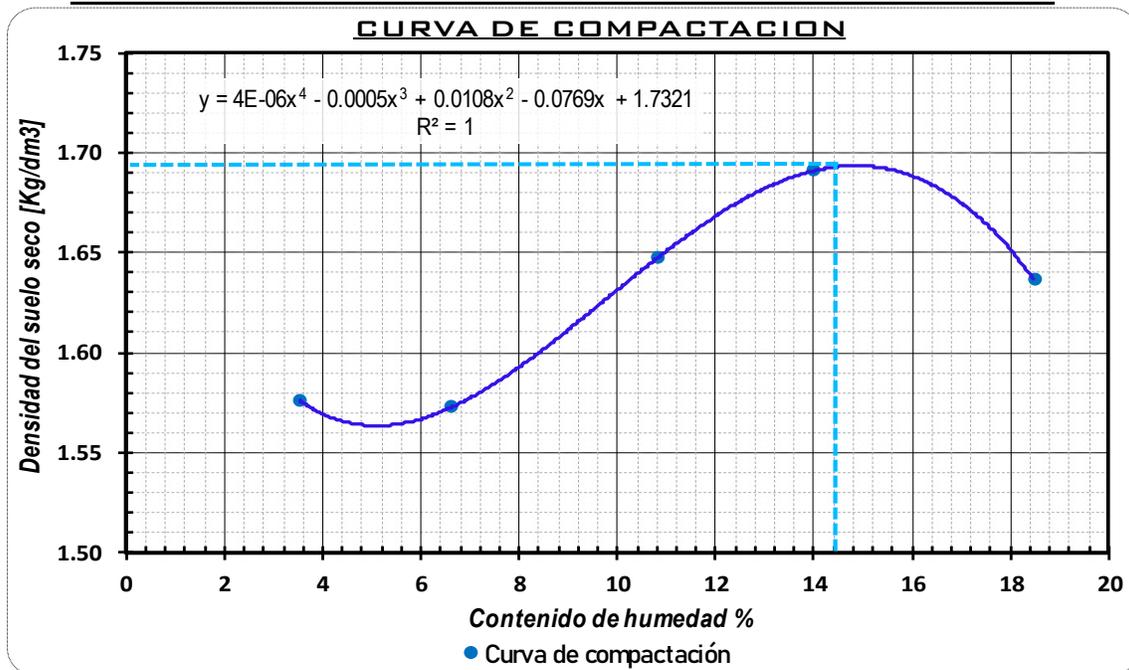


PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T99 A  
 N° MUESTRA: I FECHA: 16-may-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)**

**SUELO NATURAL - (4.5%) CENIZA EUCALIPTO - (4.5%) CEMENTO \_ ENSAYO 2**

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo humedo + molde :	kg	5.682	5.724	5.864	5.960	5.971
Peso molde :	kg	4.150	4.150	4.150	4.150	4.150
Peso del suelo humedo :	kg	1.532	1.574	1.714	1.810	1.821
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
Densidad del suelo humedo :		1.632	1.676	1.825	1.928	1.939
Cápsula N° :		44	38	30	57	21
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	347.53	398.50	453.39	471.97	596.16
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	337.63	378.73	416.90	423.06	513.61
Peso del agua :	Pa [g]	9.90	19.77	36.49	48.91	82.55
Peso de Cápsula :	Pc [g]	57.40	79.42	79.35	73.60	66.88
Peso suelo seco :	Ps [g]	280.23	299.31	337.55	349.46	446.73
Porcentaje de Humedad :	% h	3.53	6.61	10.81	14.00	18.48
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.576	1.572	1.647	1.691	1.637

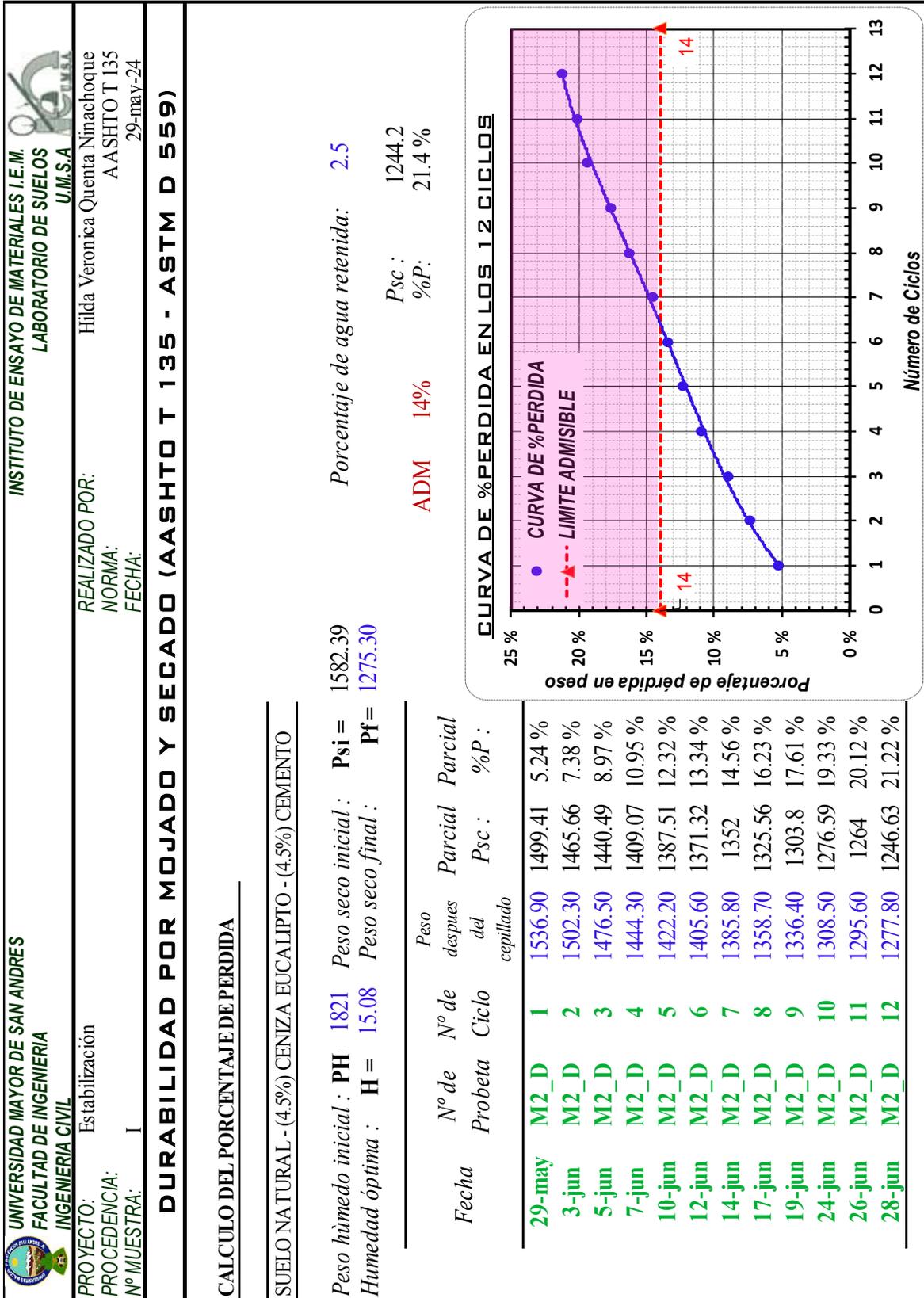


**Densidad seca máxima : 1.695 kg/dm<sup>3</sup>**  
**Humedad óptima = 14.20 %**

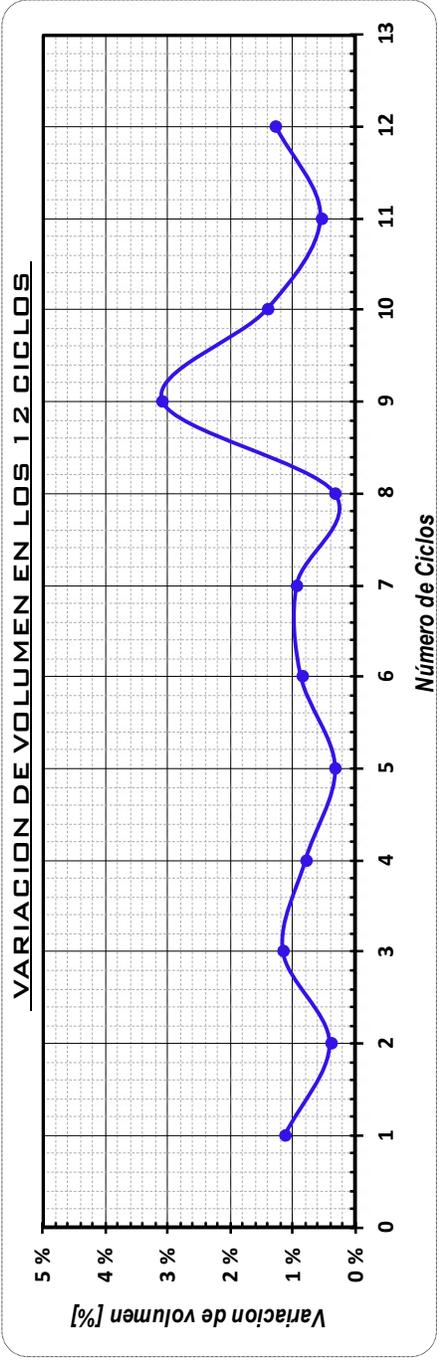
ANEXO C-5. Compresión Simple D-III

 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>		<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b> 					
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque				
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO 93				
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	24-may-24				
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>							
<b>SUELO NATURAL - (4.5%) CENIZA EUCALIPTO - (4.5%) CEMENTO</b>							
<b>DATOS DE PRUEBA</b>		<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>					
Densidad seca máxima :	1.690 kg/dm <sup>3</sup>	Nº Probetas :	3				
Humedad óptima =	14.10 %	Nro Capas :	3				
		Nro golpes / capa :	25				
		Peso del molde :	4.150 kg				
		Volumen de molde :	0.939 dm <sup>3</sup>				
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>							
		<b>DURABILIDAD</b>		<b>COMPRESION SIMPLE</b>			
Especimen Nº		<b>M1_D</b>	<b>M2_D</b>	<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>	
Suelo humedo + molde :	kg	5.957	5.971	5.971	5.969	5.957	
Peso del suelo humedo :	kg	1.807	1.821	1.821	1.819	1.807	
Densidad del suelo humedo :		1.924	1.939	1.939	1.937	1.924	
Cápsula Nº :		31	37	20	33	38	
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	382.28	304.39	351.59	461.57	475.67	
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	340.51	272.88	311.32	408.50	425.83	
Peso del agua :	Pa [g]	41.77	31.51	40.27	53.07	49.84	
Peso de Cápsula :	Pc [g]	61.73	63.92	59.95	56.47	79.35	
Peso suelo seco :	Ps [g]	278.78	208.96	251.37	352.03	346.48	
Porcentaje de Humedad :	% h	14.98	15.08	16.02	15.08	14.38	
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.674	1.685	1.672	1.683	1.682	TOLERANCIA
Variación de humedad :		0.88	0.98	1.92	0.98	0.28	1%
Variación de Densidad seca :		0.016	0.005	0.018	0.007	0.008	0.048
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>							
Especimen Nº			<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>		
Diametro :	D [cm]		10.160	10.155			
Altura :	H [cm]		11.405	11.495			
Area :	cm <sup>2</sup>	-	81.07	80.99			
Carga total de fatiga :	KN		12.40	13.20			
Resistencia :	Mpa		1.53	1.63			
Resistencia promedio :	Mpa		1.58				

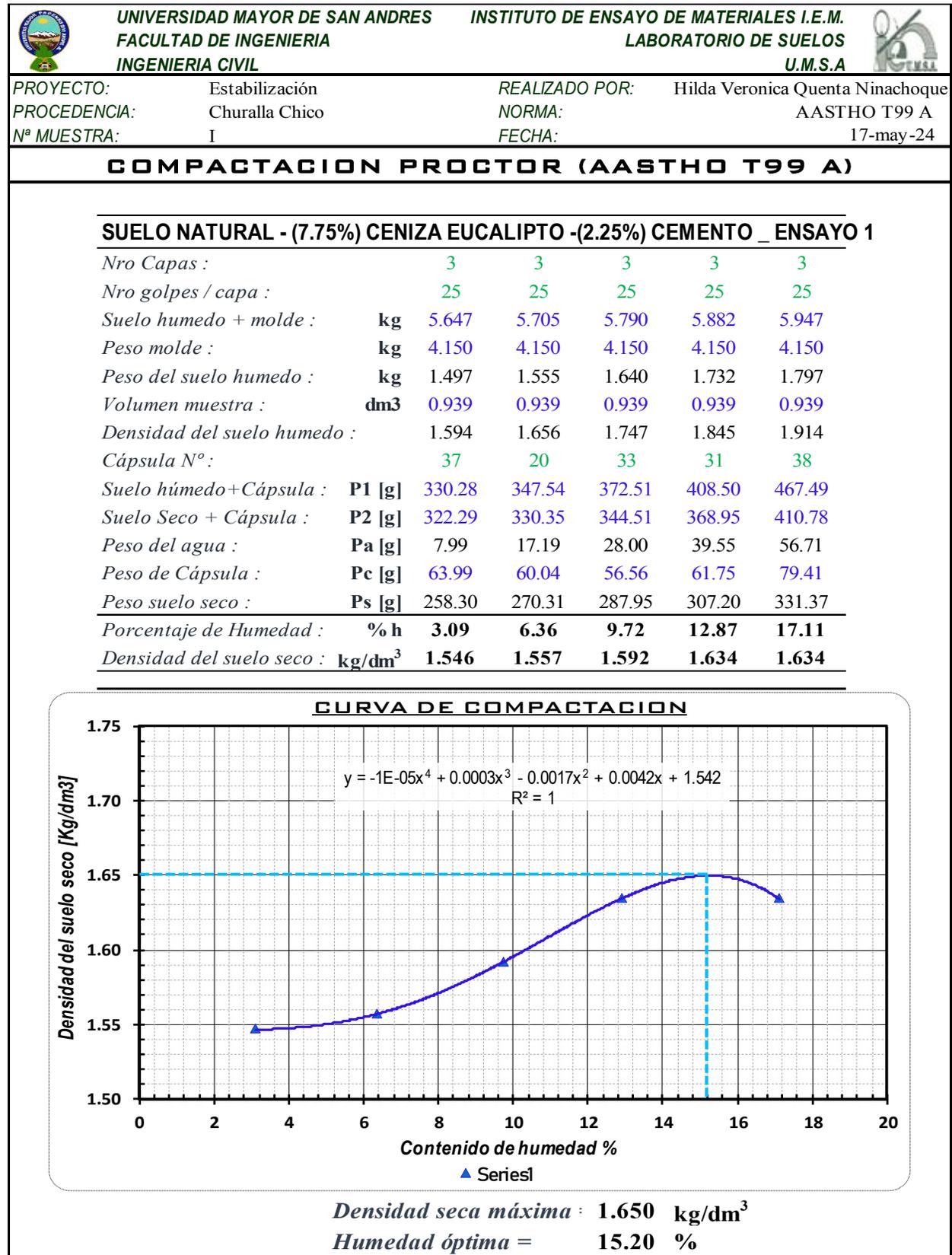
ANEXO C-6. Durabilidad por mojado y secado D-III



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL		INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M. LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A										
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque									
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO T 135									
N° MUESTRA:	I	FECHA:	29-may-24									
<b>DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)</b>												
<b>CALCULO DE VARIACION DE VOLUMEN</b>												
SUELO NA TURAL - (4.5%) CENIZA EUCALIPTO - (4.5%) CEMENTO												
Diametro inicia	10.125	Volumen inicial:	925.53									
Altura final:	11.495											
Fecha	29-may	3-jun	5-jun	7-jun	10-jun	12-jun	14-jun	17-jun	19-jun	24-jun	26-jun	28-jun
N° de Ciclo =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N° de Probeta =	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D	MI_D
Diametro = cm	10.105	10.080	10.115	10.060	10.055	10.070	10.030	10.080	10.020	10.035	10.055	10.040
Altura = cm	11.500	11.370	11.370	11.385	11.410	11.320	11.295	11.410	11.375	11.415	11.440	11.375
Volumen = cm <sup>3</sup>	922.27	907.34	913.65	904.94	906.02	901.56	892.44	910.53	896.97	902.82	908.41	900.55
Diametro = cm	10.110	10.105	10.120	10.040	10.050	10.035	10.050	10.050	10.140	10.090	10.085	10.075
Altura = cm	11.360	11.360	11.490	11.340	11.385	11.300	11.355	11.440	11.450	11.450	11.435	11.440
Volumen = cm <sup>3</sup>	911.95	911.05	924.21	897.78	903.14	893.72	900.76	907.50	924.64	915.54	913.44	912.02
Diferencia de Volúmenes	10.33	3.70	10.56	7.16	2.88	7.84	8.32	3.03	27.67	12.72	5.03	11.47
Variación volumétrica %	1.12 %	0.41 %	1.16 %	0.79 %	0.32 %	0.87 %	0.93 %	0.33 %	3.08 %	1.41 %	0.55 %	1.27 %



ANEXO C-7. Proctor Estándar D-IV





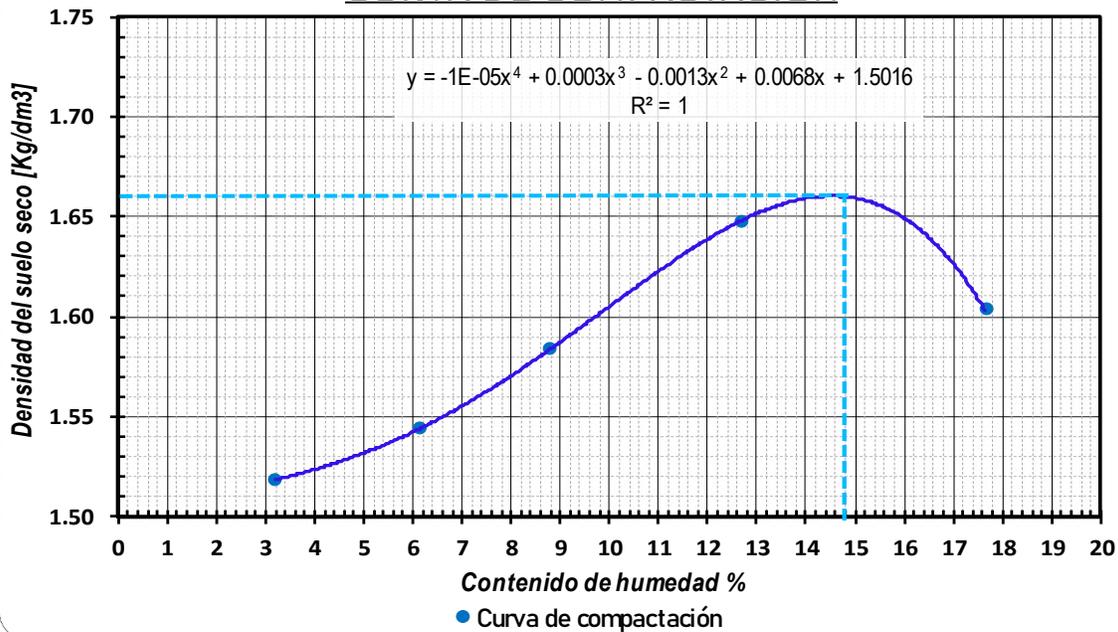
PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T99 A  
 N° MUESTRA: I FECHA: 17-may-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)**

**SUELO NATURAL - (7.75%) CENIZA EUCALIPTO -(2.25%) CEMENTO \_ ENSAYO 2**

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo húmedo + molde :	kg	5.622	5.689	5.768	5.894	5.922
Peso molde :	kg	4.151	4.151	4.151	4.151	4.151
Peso del suelo húmedo :	kg	1.471	1.538	1.617	1.743	1.771
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
Densidad del suelo húmedo :		1.567	1.638	1.722	1.856	1.886
Cápsula N° :		35	38	4	26	120
Suelo húmedo + Cápsula :	P1 [g]	291.88	358.64	375.49	362.84	434.30
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	285.02	342.56	351.04	330.25	378.10
Peso del agua :	Pa [g]	6.86	16.08	24.45	32.59	56.20
Peso de Cápsula :	Pc [g]	69.33	79.37	72.15	72.77	59.66
Peso suelo seco :	Ps [g]	215.69	263.19	278.89	257.48	318.44
Porcentaje de Humedad :	% h	3.18	6.11	8.77	12.66	17.65
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.518	1.544	1.583	1.648	1.603

**CURVA DE COMPACTACION**



Densidad seca máxima : 1.660 kg/dm<sup>3</sup>  
 Humedad óptima = 14.80 %

ANEXO C-8. Compresión Simple D-IV

 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>		<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b> 					
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque				
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO 93				
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	27-may-24				
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>							
<b>SUELO NATURAL - (7.75%) CENIZA EUCALIPTO -(2.25%) CEMENTO</b>							
<b>DATOS DE PRUEBA</b>			<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>				
Densidad seca máxima :	1.655	kg/dm <sup>3</sup>	Nº Probetas :	3			
Humedad óptima =	15.00	%	Nro Capas :	3			
			Nro golpes / capa :	25			
			Peso del molde :	4.150 kg			
			Volumen de molde :	0.939 dm <sup>3</sup>			
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>							
		<b>DURABILIDAD</b>		<b>COMPRESION SIMPLE</b>			
<i>Especimen N°</i>		<b>M1_D</b>	<b>M2_D</b>	<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>	
Suelo humedo + molde :	kg	5.912	5.924	5.945	5.925	5.912	
Peso del suelo humedo :	kg	1.762	1.774	1.795	1.775	1.762	
Densidad del suelo humedo :		1.876	1.889	1.912	1.890	1.876	
Cápsula N° :		56	33	30	31	35	
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	426.03	367.54	311.13	366.66	300.01	
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	379.88	328.34	280.49	327.00	270.43	
Peso del agua :	Pa [g]	46.15	39.20	30.64	39.66	29.58	
Peso de Cápsula :	Pc [g]	59.04	56.51	79.34	61.72	69.33	
Peso suelo seco :	Ps [g]	320.84	271.83	201.15	265.28	201.10	
Porcentaje de Humedad :	% h	14.38	14.42	15.23	14.95	14.71	
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.640	1.651	1.659	1.644	1.636	
<i>Variación de humedad :</i>		0.62	0.58	0.23	0.05	0.29	<b>1%</b>
<i>Variación de Densidad seca :</i>		0.015	0.004	0.004	0.011	0.019	<b>0.048</b>
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>							
<i>Especimen N°</i>		<b>M1_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>			
Diametro :	D [cm]	10.165	10.18	10.175			
Altura :	H [cm]	11.485	11.515	11.495			
Area :	cm <sup>2</sup>	81.15	81.39	81.31			
Carga total de fatiga :	KN	10.80	10.70	10.40			
<i>Resistencia :</i>	Mpa	1.33	1.31	1.28			
<i>Resistencia promedio :</i>	Mpa	1.31					

ANEXO C-9. Durabilidad por mojado y secado D-V

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**INGENIERIA CIVIL**

PROYECTO: Estabilización  
 PROCEDENCIA: I  
 Nº MUESTRA: I

**INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.**  
**LABORATORIO DE SUELOS**  
**U.M.S.A.**

REALIZADO POR: Hilda Verónica Quenta Ninachoque  
 NORMA: AASHTO T 135  
 FECHA: 29-may-24

---

**DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)**

---

**CALCULO DEL PORCENTAJE DE PERDIDA**

---

SUELO NATURAL - (7.75%) CENIZA EUCALIPTO - (2.25%) CEMENTO

---

Peso húmedo inicial : **PH 1728.9**    Peso seco inicial : **Psi = 1511**  
 Humedad óptima : **H = 14.42**    Peso seco final : **Pf = 883.90**  
 Porcentaje de agua retenida: **2.5**

ADM **14%**    Psc : 862.34  
%P : 42.9 %

---

Fecha	Nº de Probeta	Nº de Ciclo	Peso después del cepillado	Parcial Psc	Parcial %P
29-may	M2_D	1	1482.00	1445.85	4.31 %
3-jun	M2_D	2	1428.53	1393.69	7.76 %
5-jun	M2_D	3	1363.70	1330.44	11.95 %
7-jun	M2_D	4	1280.00	1248.78	17.35 %
10-jun	M2_D	5	1235.40	1205.27	20.23 %
12-jun	M2_D	6	1191.80	1162.73	23.05 %
14-jun	M2_D	7	1151.00	1122.93	25.68 %
17-jun	M2_D	8	1091.40	1064.78	29.53 %
19-jun	M2_D	9	1044.30	1018.83	32.57 %
24-jun	M2_D	10	974.20	950.44	37.10 %
26-jun	M2_D	11	910.50	888.29	41.21 %
28-jun	M2_D	12	885.60	864.00	42.82 %

**CURVA DE %PERDIDA EN LOS 12 CICLOS**



PROYECTO: Estabilización  
PROCEDENCIA: AA SHTO T 135  
N° MUESTRA: I

REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
NORMA: AA SHTO T 135  
FECHA: 29-may-24

**DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)**

**CALCULO DE VARIACION DE VOLUMEN**

SUELO NATURAL - (7.75%) CENIZA EUCALIPTO -(2.25%) CEMENTO

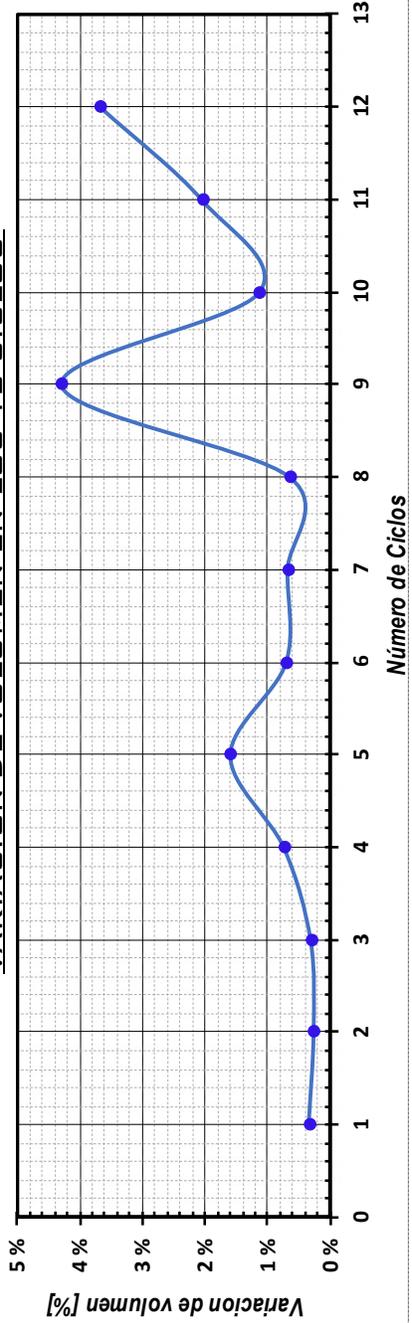
Diametro inicia 10.165 Volumen inicial: 932.04

Altura final: 11.485

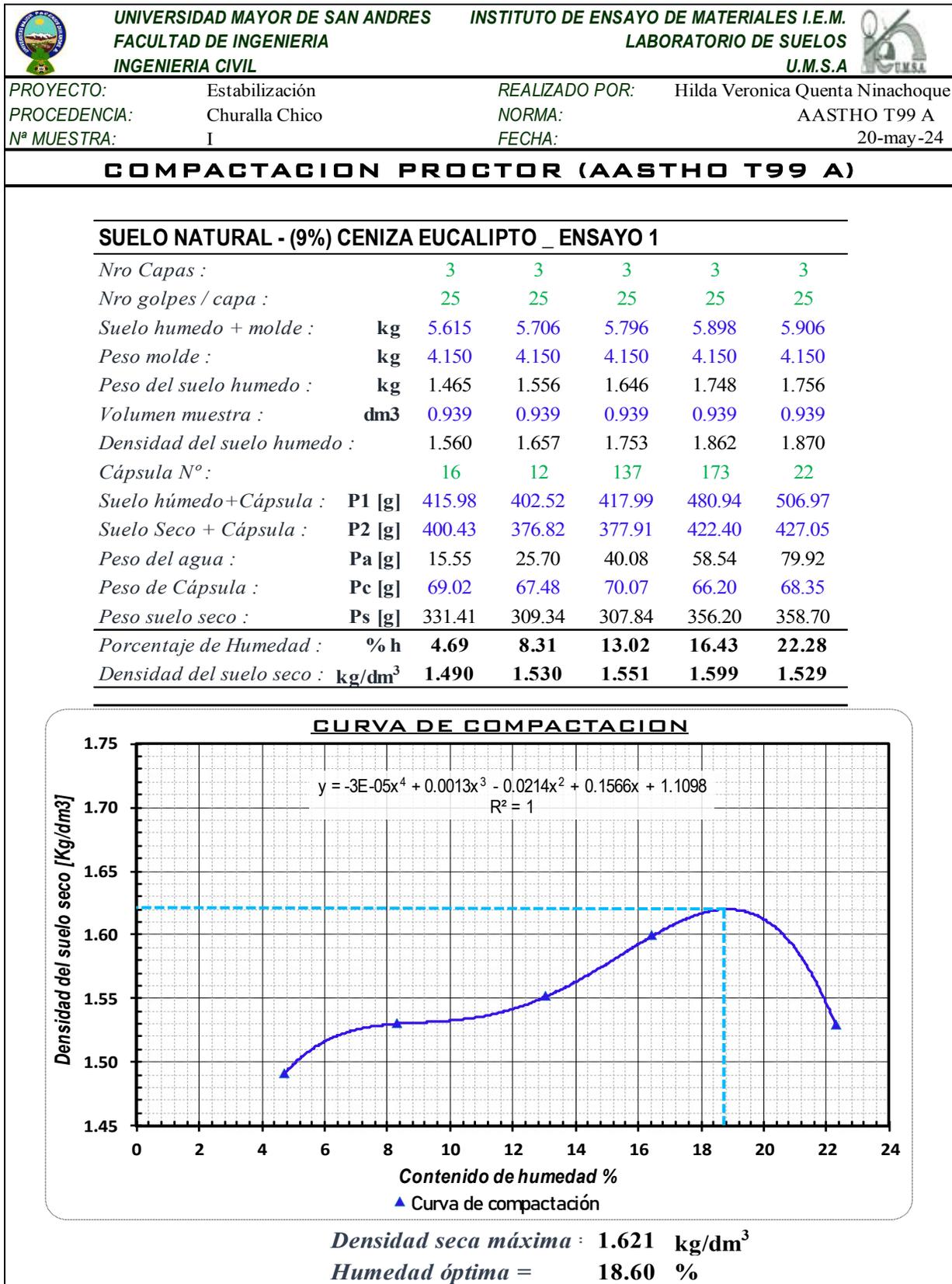
Fecha	29-may	3-jun	5-jun	7-jun	10-jun	12-jun	14-jun	17-jun	19-jun	24-jun	26-jun	28-jun
N° de Ciclo =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N° de Probeta =	MI_D											
Diametro = cm	10.180	10.195	10.105	10.145	10.140	10.095	10.065	9.980	9.920	9.940	9.905	9.805
Altura = cm	11.605	11.625	11.580	11.400	11.440	11.420	11.475	11.495	11.435	11.550	11.355	11.495
Volumen = cm <sup>3</sup>	944.56	948.98	928.69	921.51	923.83	914.05	913.00	899.21	883.79	896.28	874.96	867.95
Diametro = cm	10.165	10.195	10.160	10.140	10.165	10.095	10.020	10.005	10.100	10.020	9.960	9.945
Altura = cm	11.600	11.595	11.490	11.495	11.565	11.500	11.500	11.510	11.505	11.495	11.000	11.585
Volumen = cm <sup>3</sup>	941.37	946.53	931.53	928.27	938.53	920.45	906.82	904.90	921.76	906.43	857.04	899.81
Diferencia de Volumenes	3.19	2.45	2.84	6.76	14.71	6.40	6.17	5.69	37.97	10.15	17.92	31.86

Variación volumétrica %	0.34 %	0.26 %	0.31 %	0.73 %	1.59 %	0.70 %	0.68 %	0.63 %	4.30 %	1.13 %	2.05 %	3.67 %
-------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

**VARIACION DE VOLUMEN EN LOS 12 CICLOS**



ANEXO C-10. Proctor Estándar D-V





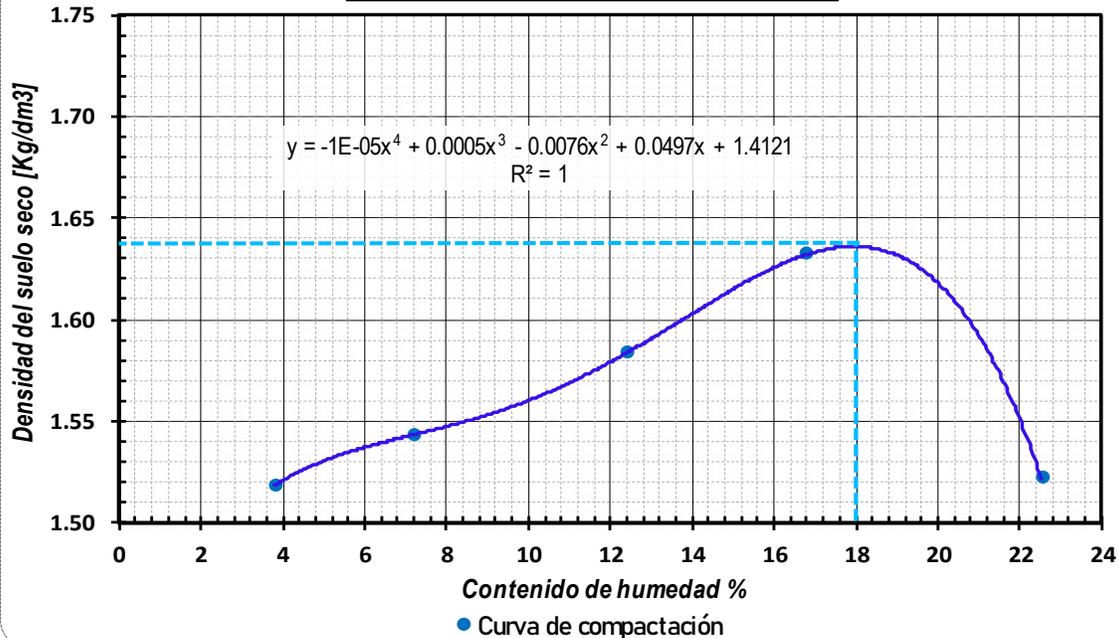
PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T99 A  
 N° MUESTRA: I FECHA: 20-may-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)**

**SUELO NATURAL - (9%) CENIZA EUCALIPTO \_ ENSAYO 2**

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo humedo + molde :	kg	5.630	5.703	5.821	5.940	5.901
Peso molde :	kg	4.150	4.150	4.150	4.150	4.150
Peso del suelo humedo :	kg	1.480	1.553	1.671	1.790	1.751
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
Densidad del suelo humedo :		1.576	1.654	1.780	1.906	1.865
Cápsula N° :		146	19	42	38	20
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	200.40	312.30	303.14	322.01	355.71
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	195.46	296.02	278.07	287.11	301.33
Peso del agua :	Pa [g]	4.94	16.28	25.07	34.90	54.38
Peso de Cápsula :	Pc [g]	65.48	69.17	75.64	79.38	59.97
Peso suelo seco :	Ps [g]	129.98	226.85	202.43	207.73	241.36
Porcentaje de Humedad :	% h	3.80	7.18	12.38	16.80	22.53
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.518	1.543	1.583	1.632	1.522

**CURVA DE COMPACTACION**



Densidad seca máxima : 1.637 kg/dm<sup>3</sup>

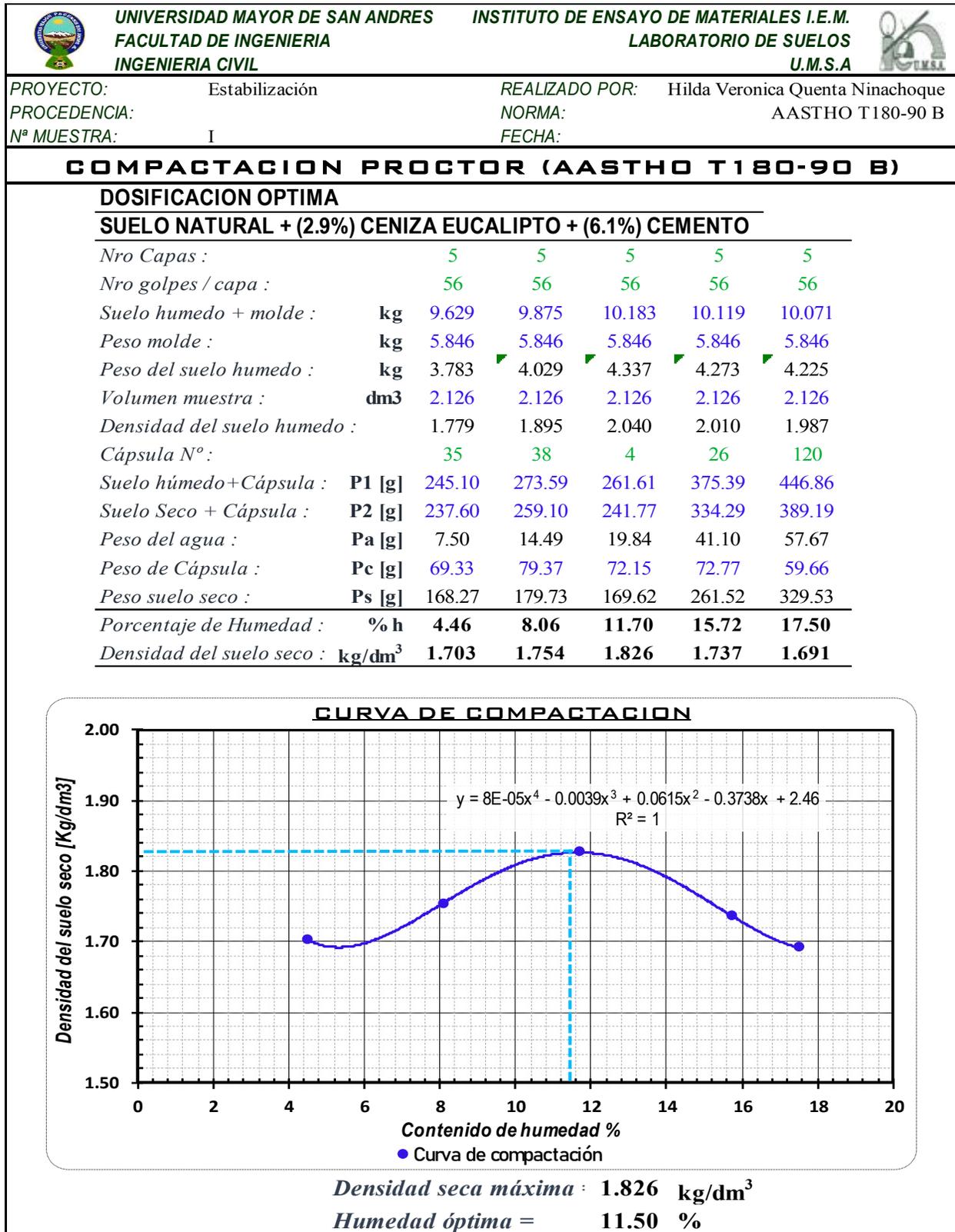
Humedad óptima = 18.00 %

ANEXO C-11. Compresión Simple D-V

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>				
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque			
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO 93			
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	27-may-24			
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>						
<b>SUELO NATURAL - (9%) CENIZA EUCALIPTA</b>						
<b>DATOS DE PRUEBA</b>		<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>				
Densidad seca máxima :	1.629 kg/dm <sup>3</sup>	Nº Probetas :	3			
Humedad óptima =	18.30 %	Nro Capas :	3			
		Nro golpes / capa :	25			
		Peso del molde :	4.150 kg			
		Volumen de molde :	0.939 dm <sup>3</sup>			
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>						
<b>DURABILIDAD COMPRESION SIMPLE</b>						
<i>Especimen N°</i>		<b>MI_D</b>	<b>M2_D</b>	<b>MI_C</b>	<b>M2_C</b>	
Suelo humedo + molde :	kg	5.931	5.939	5.944	5.950	
Peso del suelo humedo :	kg	1.781	1.789	1.794	1.800	
Densidad del suelo humedo :		1.897	1.905	1.911	1.917	
Cápsula N° :		31	35	38	24	
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	457.17	437.47	425.28	463.85	
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	394.95	379.82	371.54	401.04	
Peso del agua :	Pa [g]	62.22	57.65	53.74	62.81	
Peso de Cápsula :	Pc [g]	61.71	69.32	79.38	58.36	
Peso suelo seco :	Ps [g]	333.24	310.50	292.16	342.68	
Porcentaje de Humedad :	% h	18.67	18.57	18.39	18.33	
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.598	1.607	1.614	1.620	<b>TOLERANCIA</b>
Variación de humedad :		0.37	0.27	0.09	0.03	<b>1%</b>
Variación de Densidad seca :		0.031	0.022	0.015	0.009	<b>0.048</b>
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>						
<i>Especimen N°</i>		<b>MI_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3-C</b>		
Diametro :	D [cm]	10.120	10.135			
Altura :	H [cm]	11.490	11.515			
Area :	cm <sup>2</sup>	80.44	80.67			
Carga total de fatiga :	KN	4.80	4.70			
Resistencia :	Mpa	0.60	0.58			
Resistencia promedio :	Mpa		0.59			

ANEXO D. Planilla de Ensayos del suelo-ceniza de eucalipto-cemento Dosificación óptima

ANEXO D-1. Proctor Modificado



ANEXO D-2. Relación Soporte California CBR

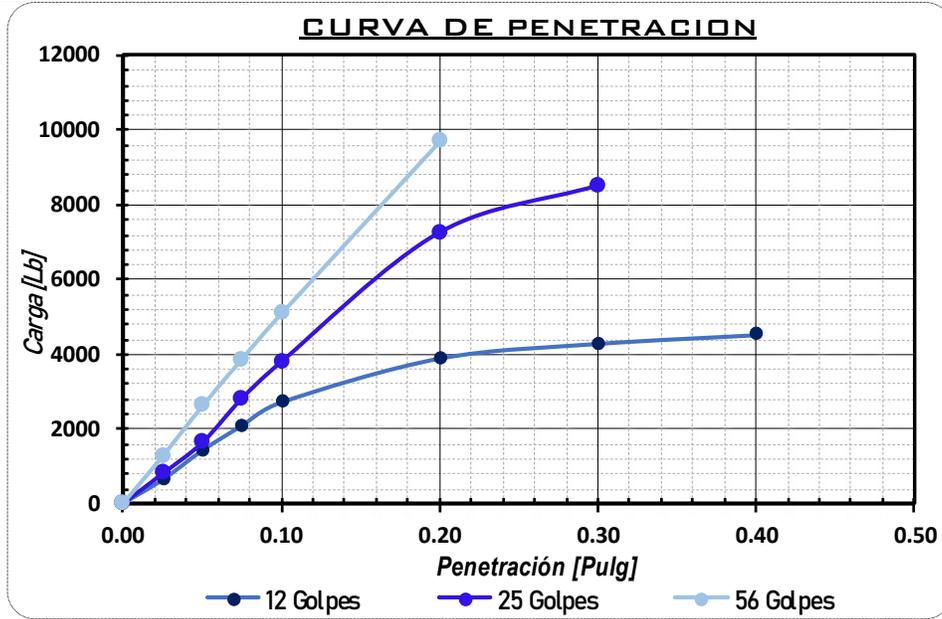
 <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> FACULTAD DE INGENIERIA INGENIERIA CIVIL			<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> LABORATORIO DE SUELOS U.M.S.A. 							
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque							
PROCEDENCIA:	Churalla Chico	NORMA:	AASHTO T193							
Nº MUESTRA:	1	FECHA:	1-ago-24							
<b>RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)</b>										
<b>MUESTRA</b>	<b>HUM. OPT.</b>	<b>DEN. SECA MAX.</b>								
DOSIFICACIÓN OPTIMA	11.50 %	1.826 kg/dm <sup>3</sup>								
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO</b>										
Molde Nro	10	11	12							
Nro de capas	5	5	5							
Nro de golpes por capa	12	25	56							
<b>Condición de la muestra</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>	<b>Antes de mojar</b>	<b>Después de mojar</b>				
Peso muestra hum. + molde (Kg)	12.119	12.450	12.227	12.526	12.178	12.366				
Peso del molde (Kg)	7.944	7.944	7.854	7.854	7.715	7.715				
Peso muestra húmeda	4.175	4.506	4.373	4.672	4.463	4.651				
Volumen de la muestra (dm <sup>3</sup> )	2.318	2.318	2.323	2.323	2.273	2.273				
Peso Unitario muestra húmeda	1.801	1.944	1.882	2.011	1.963	2.046				
<b>Muestra de humedad del:</b>	<b>Fondo Superf</b>	<b>2" Superf</b>	<b>Fondo Superf</b>	<b>2" Superf</b>	<b>Fondo Superf</b>	<b>2" Superf</b>				
Lata Nro	35 31	30	30 56	31	64 5	56				
Peso muestra húmeda + Lata	283.58 306.84	367.50	336.28 324.05	259.56	408.47 290.23	319.35				
Peso muestra seca + Lata	263.57 284.33	323.91	313.23 300.47	232.10	379.01 268.81	287.88				
Peso del agua	20.01 22.51	43.59	23.05 23.58	27.46	29.46 21.42	31.47				
Peso de la Lata	61.88 61.72	79.32	79.34 59.04	61.72	88.97 62.60	59.03				
Peso de muestra seca	201.69 222.61	244.59	233.89 241.43	170.38	290.04 206.21	228.85				
Contenido de humedad %	9.92 10.11	17.82	9.86 9.77	16.12	10.16 10.39	13.75				
Promedio de cont. De humedad	<b>10.02</b>		<b>9.81</b>		<b>10.27</b>					
Peso Unitario de la muestra seca	<b>1.637</b>		<b>1.714</b>		<b>1.781</b>					
<b>CALCULO DE EXPANSION</b>						$%E = \frac{Lf - Lo}{50}$				
<b>EXT: 0,001 pulg</b>						<b>EXPANSION h=5"</b>				
		<b>Molde N° 10</b>		<b>Molde N° 11</b>		<b>Molde N° 12</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Trans en días</b>	<b>Lectur a</b>	<b>Expansión 1"x10<sup>3</sup></b>	<b>Lectura Extens.</b>	<b>Expansión 1"x10<sup>3</sup></b>	<b>Lectur a</b>	<b>Expansión 1"x10<sup>3</sup></b>		
1-ago	12:00	0	21	0.021	47	0.047	41	0.041		
2-ago	12:00	1	22.5	0.023	48	0.048	43	0.043		
3-ago	12:00	2	-	-	-	-	-	-		
4-ago	12:00	3	-	-	-	-	-	-		
5-ago	12:00	4	22.5	0.023	48	0.048	43	0.043		
						<b>0.1" → Carga Patrón = 3000 [lb]</b>				
						<b>0.2" → Carga Patrón = 4500 [lb]</b>				
<b>C.B.R.</b>										
		<b>Molde N° 10</b>		<b>Molde N° 11</b>		<b>Molde N° 12</b>				
<b>Tiempo</b>	<b>Penetración Pulg.</b>	<b>Lect. Ext.</b>	<b>Carga libras</b>	<b>CBR %</b>	<b>Lect. Ext.</b>	<b>Carga libras</b>	<b>CBR %</b>	<b>Lect. Ext.</b>	<b>Carga libras</b>	<b>CBR %</b>
00:00	0.000	0	0		0	0		0	0	
00:30	0.025	15.0	636		19.0	793		31.0	1264	
01:00	0.050	35.0	1421		40.0	1618		65.0	2600	
01:30	0.075	52.0	2089		70.0	2796		97.0	3857	
02:00	0.100	68.0	2718	90.6	95.0	3778	125.9	128.0	5074	169.1
04:00	0.200	98.0	3896	86.6	183.0	7235	160.8	245.0	9670	214.9
06:00	0.300	108.0	4289		215.0	8491		-	-	
08:00	0.400	114.0	4524		-	-		-	-	
10:00	0.500	-	-		-	-		-	-	



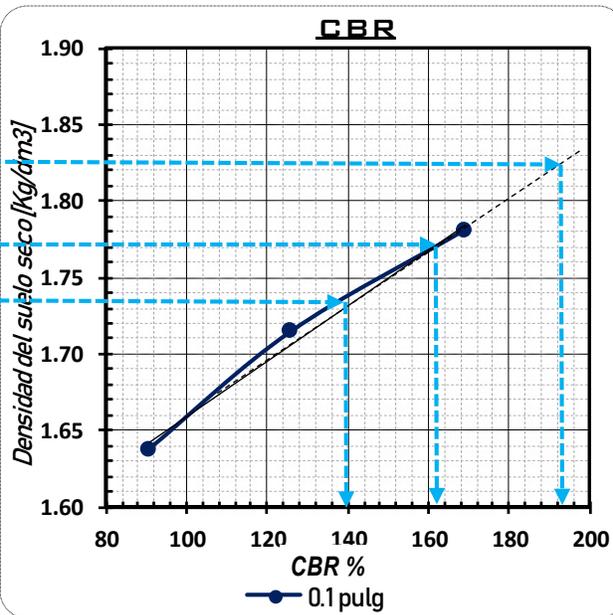
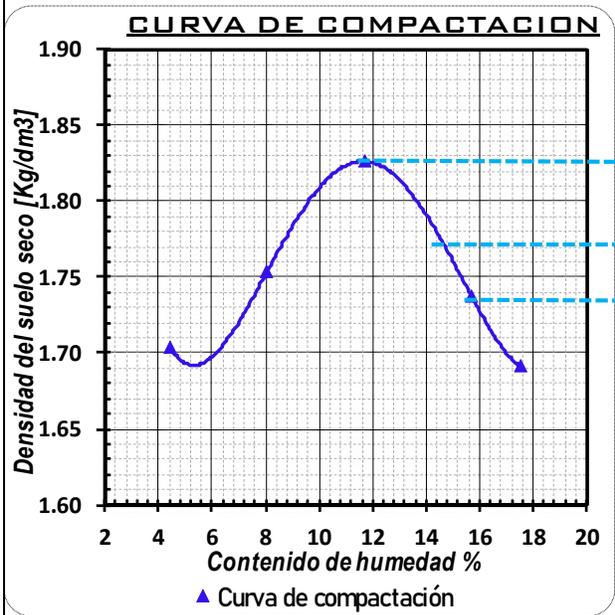
PROYECTO: Estabilización  
PROCEDENCIA: Churalla Chico  
N° MUESTRA: I

REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
NORMA: AASHTO T193  
FECHA: 1-ago-24

**RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR (AASHTO T193)**

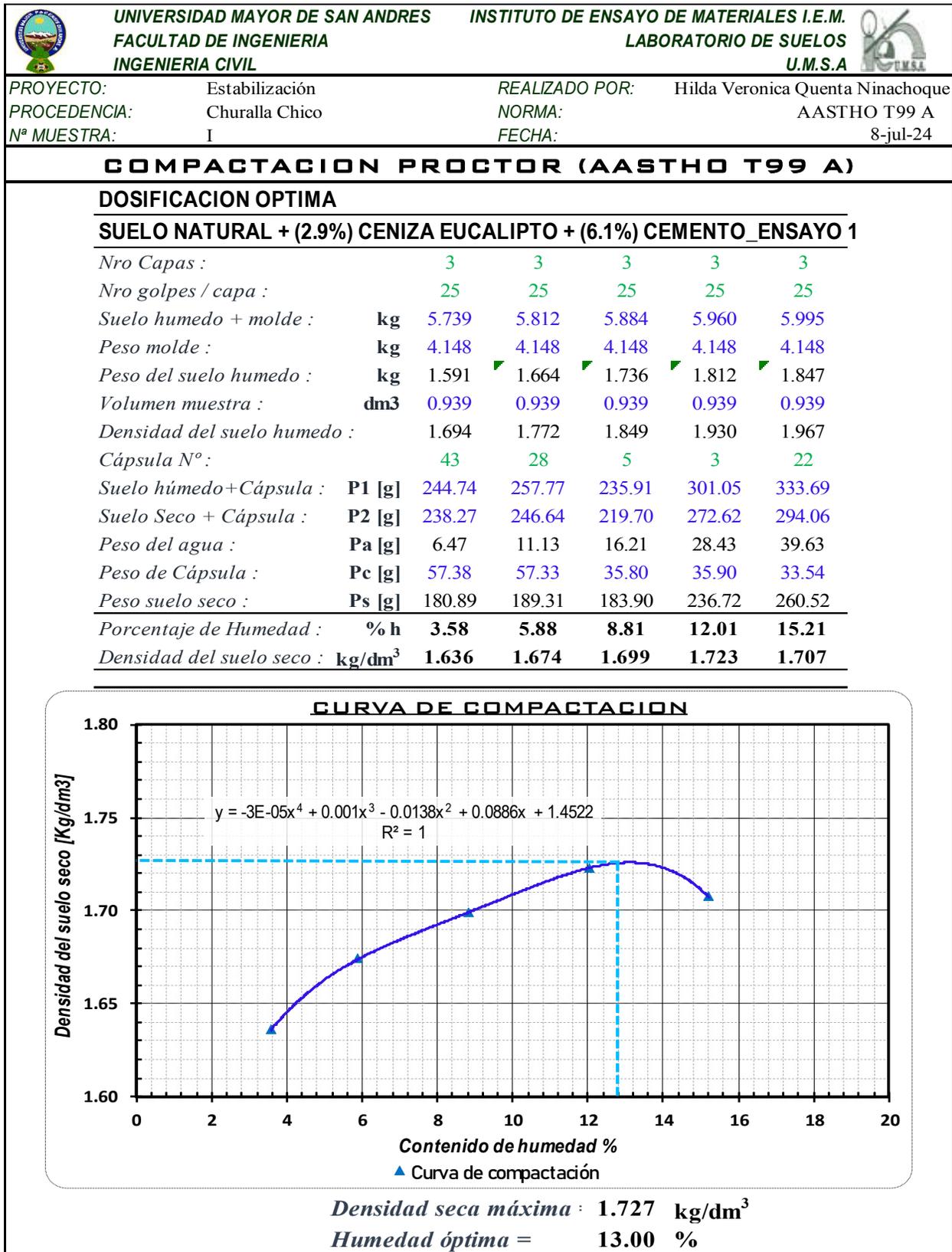


Porcentaje de Humeda.	4.46	8.06	11.70	15.72	17.50	$D_{s,max}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	1.637	1.714	1.781
Densidad del suelo sec	1.703	1.754	1.826	1.737	1.691	CBR (0.1)	90.6	125.9	169.1



%	$D_{s,max}$ kg/dm <sup>3</sup>	CBR
100%	1.826	192.0
97%	1.771	162.0
95%	1.735	140.0

ANEXO D-3. Proctor Estándar





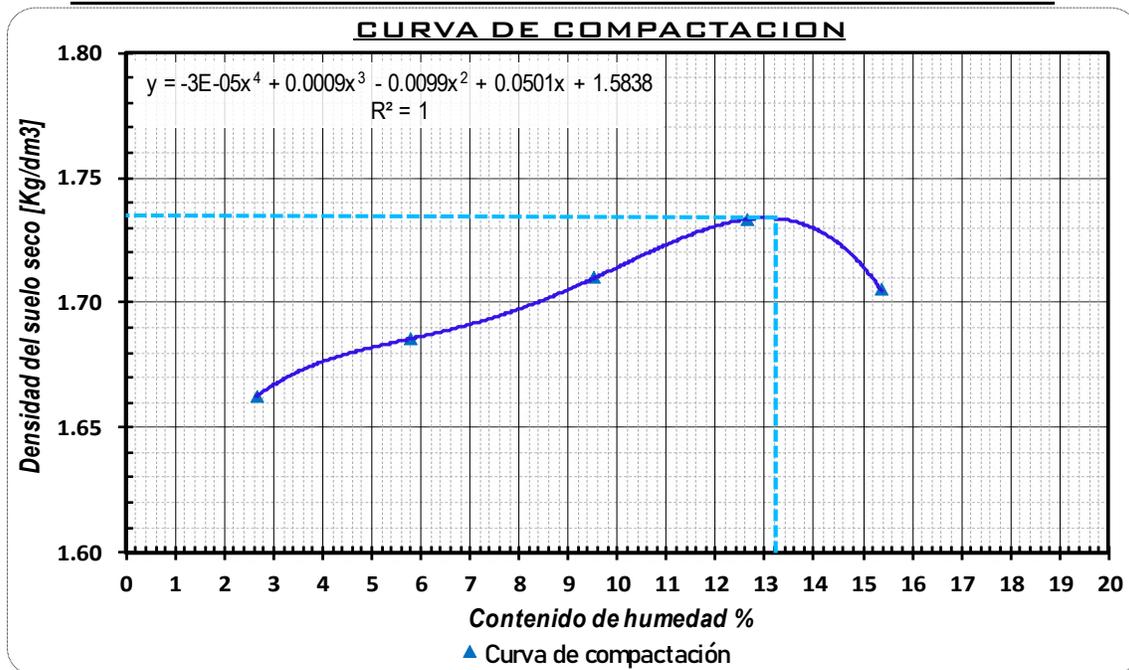
PROYECTO: Estabilización REALIZADO POR: Hilda Veronica Quenta Ninachoque  
 PROCEDENCIA: Churalla Chico NORMA: AASTHO T99 A  
 N° MUESTRA: I FECHA: 8-jul-24

**COMPACTACION PROCTOR (AASTHO T99 A)**

**DOSIFICACION OPTIMA**

**SUELO NATURAL + (2.9%) CENIZA EUCALIPTO + (6.1%) CEMENTO**

Nro Capas :		3	3	3	3	3
Nro golpes / capa :		25	25	25	25	25
Suelo humedo + molde :	kg	5.750	5.822	5.906	5.981	5.995
Peso molde :	kg	4.148	4.148	4.148	4.148	4.148
Peso del suelo humedo :	kg	1.602	1.674	1.758	1.833	1.847
Volumen muestra :	dm <sup>3</sup>	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
Densidad del suelo humedo :		1.706	1.783	1.872	1.952	1.967
Cápsula N° :		26	120	35	38	4
Suelo húmedo+Cápsula :	P1 [g]	303.11	370.10	337.37	406.88	460.99
Suelo Seco + Cápsula :	P2 [g]	297.19	353.17	314.10	370.18	409.17
Peso del agua :	Pa [g]	5.92	16.93	23.27	36.70	51.82
Peso de Cápsula :	Pc [g]	72.79	59.84	69.34	79.38	72.16
Peso suelo seco :	Ps [g]	224.40	293.33	244.76	290.80	337.01
Porcentaje de Humedad :	% h	2.64	5.77	9.51	12.62	15.38
Densidad del suelo seco :	kg/dm <sup>3</sup>	1.662	1.685	1.710	1.733	1.705



**Densidad seca máxima : 1.735 kg/dm<sup>3</sup>**

**Humedad óptima = 13.20 %**

ANEXO D-4. Compresión Simple

	<b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>INGENIERIA CIVIL</b>	<b>INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS</b> <b>U.M.S.A</b>					
PROYECTO:	Estabilización	REALIZADO POR:	Hilda Veronica Quenta Ninachoque				
PROCEDENCIA:		NORMA:	AASHTO 93				
Nº MUESTRA:	I	FECHA:	9-jul-24				
<b>COMPRESION SIMPLE (AASHTO93)</b>							
<b>DOSIFICACION OPTIMA</b>							
<b>SUELO NATURAL + (2.9%) CENIZA EUCALIPTA + (6.1%) CEMENTO</b>		<b>DATOS DE MOLDURA DE PROBETAS</b>					
<b>DATOS DE PRUEBA</b>		<i>Nº Probetas :</i> 3					
<i>Densidad seca máxima :</i>	1.727 kg/dm <sup>3</sup>	<i>Nro Capas :</i>	3				
<i>Humedad óptima =</i>	13.00 %	<i>Nro golpes / capa :</i>	25				
		<i>Peso del molde :</i>	4.225 kg				
		<i>Volumen de molde :</i>	0.939 dm <sup>3</sup>				
<b>ANALISIS DE VERIFICACION DE PROBETAS</b>							
<b>DURABILIDAD COMPRESION SIMPLE</b>							
<i>Especimen Nº</i>		<b>MI_D</b>	<b>M2_D</b>	<b>MI_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>	
<i>Suelo humedo + molde :</i>	kg	5.999	5.988	6.009	5.998	5.985	
<i>Peso del suelo humedo :</i>	kg	1.849	1.838	1.859	1.848	1.835	
<i>Densidad del suelo humedo :</i>		1.969	1.957	1.980	1.968	1.954	
<i>Cápsula Nº :</i>		76	33	35	75	30	
<i>Suelo húmedo+Cápsula :</i>	P1 [g]	276.17	308.12	325.23	391.52	352.63	
<i>Suelo Seco + Cápsula :</i>	P2 [g]	255.47	281.05	297.43	358.32	323.28	
<i>Peso del agua :</i>	Pa [g]	20.70	27.07	27.80	33.20	29.35	
<i>Peso de Cápsula :</i>	Pc [g]	83.02	56.48	66.09	81.27	79.34	
<i>Peso suelo seco :</i>	Ps [g]	172.45	224.57	231.34	277.05	243.94	
<i>Porcentaje de Humedad :</i>	% h	12.00	12.05	12.02	11.98	12.03	
<i>Densidad del suelo seco :</i>	kg/dm <sup>3</sup>	1.758	1.747	1.767	1.757	1.744	<b>TOLERANCIA</b>
<i>Variación de humedad :</i>		1.00	0.95	0.98	1.02	0.97	<b>1%</b>
<i>Variación de Densidad seca :</i>		0.031	0.020	0.040	0.030	0.017	<b>0.048</b>
<b>COMPRESION A 7 DIAS</b>							
<i>Especimen Nº</i>		<b>MI_C</b>	<b>M2_C</b>	<b>M3_C</b>			
<i>Diametro :</i>	D [cm]	10.170	10.170	10.180			
<i>Altura :</i>	H [cm]	11.685	11.675	11.665			
<i>Area :</i>	cm <sup>2</sup>	81.23	81.23	81.39			
<i>Carga total de fatiga :</i>	KN	15.50	15.60	15.50			
<i>Resistencia :</i>	Mpa	1.908	1.920	1.904			
<i>Resistencia promedio :</i>	Mpa	1.911					

ANEXO D-5. Durabilidad por mojado y secado

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**INGENIERIA CIVIL**

**INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.**  
**LABORATORIO DE SUELOS**  
**U.M.S.A.**

Hilda Verónica Quenta Ninachoque  
AASHTO T 135  
10-jul-24

---

**DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)**

**CALCULO DEL PORCENTAJE DE PERDIDA**

**DOSIFICACION OPTIMA ENSAYO N°1**  
SUELO NATURAL + (2.9%) CENIZA EUCALIPTA + (6.1%) CEMENTO

Peso húmedo inicial : **PH 1849.0**    Peso seco inicial :    **Psi = 1650.84**    Porcentaje de agua retenida: **2.5**  
 Humedad óptima :    **H = 12.00**    Peso seco final :    **Pf = 1469.20**

Fecha	N° de Probeta	N° de Ciclo	Peso		Psc :	%P :
			despues del cepillado	Parcial		
17-julio	M2_D	1	1632.70	1592.88	3.51 %	
19-julio	M2_D	2	1573.70	1535.32	7.00 %	
22-julio	M2_D	3	1564.10	1525.95	7.57 %	
24-julio	M2_D	4	1553.20	1515.32	8.21 %	
26-julio	M2_D	5	1545.20	1507.51	8.68 %	
29-julio	M2_D	6	1535.70	1498.24	9.24 %	
31-julio	M2_D	7	1529.00	1491.71	9.64 %	
2-agosto	M2_D	8	1517.10	1480.1	10.34 %	
5-agosto	M2_D	9	1505.90	1469.17	11.00 %	
7-agosto	M2_D	10	1496.00	1459.51	11.59 %	
9-agosto	M2_D	11	1485.40	1449.17	12.22 %	
12-agosto	M2_D	12	1470.40	1434.54	13.10 %	

**ADM 14%**    **Psc :** 1433.37    **Porcentaje de agua retenida: 2.5**

**%P :** 13.17 %

**CURVA DE % PERDIDA EN LOS 12 CICLOS**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA CIVIL

INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES I.E.M.  
LABORATORIO DE SUELOS  
U.M.S.A

PROYECTO: Estabilización  
Churralla Chico  
PROCEDENCIA: I

REALIZADO POR: Hilda Verónica Quenta Ninachoque  
NORMA: AASHTO T 135  
FECHA: 10-jul-24

## DURABILIDAD POR MOJADO Y SECADO (AASHTO T 135 - ASTM D 559)

### CALCULO DEL PORCENTAJE DE PERDIDA

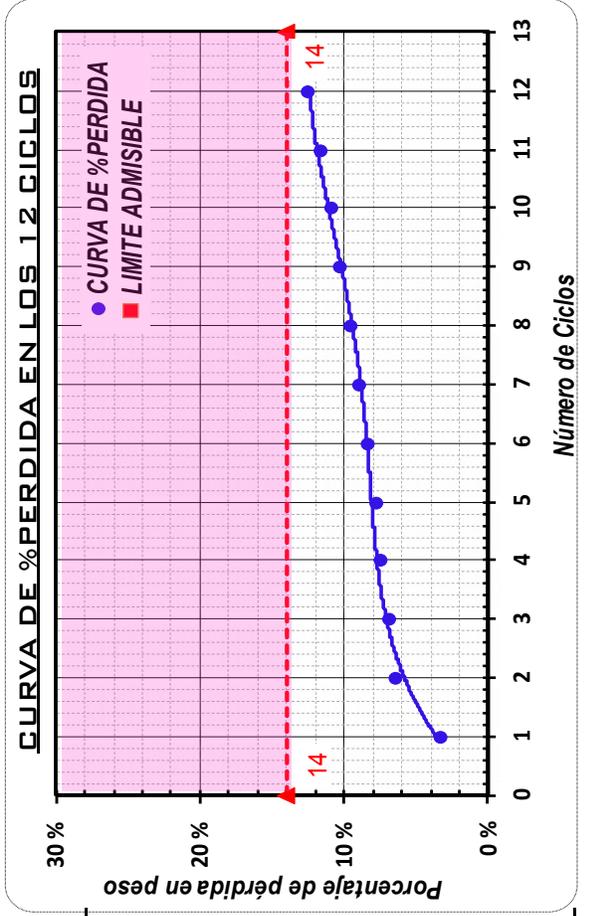
#### DOSIFICACION OPTIMA ENSAYO N°2

SUELO NATURAL + (2.9%) CENIZA EUCALIPTA + (6.1%) CEMENTO

Peso húmedo inicial : **PH= 1838.0** Peso seco inicial : **Psi = 1640.28** Porcentaje de agua retenida: **2.5**  
Humedad óptima : **H = 12.05** Peso seco final : **Pf = 1471.50**

**ADM 14%**  $P_{sc} :$  1435.61  
**%P: 12.48 %**

Fecha	N° de Probeta	N° de Ciclo	Peso despues del cepillado	Parcial $P_{sc}$	Parcial %P
17-julio	M2_D	1	1625.80	1586.15	3.30 %
19-julio	M2_D	2	1573.80	1535.41	6.39 %
22-julio	M2_D	3	1564.20	1526.05	6.96 %
24-julio	M2_D	4	1555.40	1517.46	7.49 %
26-julio	M2_D	5	1549.00	1511.22	7.87 %
29-julio	M2_D	6	1539.40	1501.85	8.44 %
31-julio	M2_D	7	1529.60	1492.29	9.02 %
2-agosto	M2_D	8	1521.10	1484.00	9.53 %
5-agosto	M2_D	9	1508.10	1471.32	10.30 %
7-agosto	M2_D	10	1496.50	1460.00	10.99 %
9-agosto	M2_D	11	1485.80	1449.56	11.63 %
12-agosto	M2_D	12	1470.50	1434.63	12.54 %



## ANEXO E. Análisis de costos

<b>ENSAYOS CENIZA DE EUCALIPTO</b>					
<b>Ensayo</b>	<b>Lugar</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario, Bs</b>	<b>Costo Total, Bs</b>
Calcinación	IEM	Ensayo	3	100.00	300.00
Fluorescencia de rayos X	Cota Cota IGEMA	Ensayo	1	300.00	300.00
<b>Sub Total</b>					<b>600.00</b>
<b>ENSAYOS SUELO NATURAL</b>					
<b>Ensayo</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario, Bs</b>	<b>Costo Total, Bs</b>
Contenido de humedad	IEM	Ensayo	3	44.00	132.00
Análisis Granulométrico por Tamizado	IEM	Ensayo	2	100.00	200.00
Análisis Granulométrico por Método del Hidrómetro	IEM	Ensayo	1	115.00	115.00
Límite de Atterberg (Limite Líquido)	IEM	Ensayo	2	25.00	50.00
Límite de Atterberg (Limite Plástico)	IEM	Ensayo	2	25.00	50.00
Gravedad específica	IEM	Ensayo	2	74.00	148.00
Compactación Proctor modificado	IEM	Ensayo	2	155.00	310.00
Compactación Estandar	IEM	Ensayo	3	119.00	357.00
Relación Soporte California CBR	IEM	Ensayo	2	338.00	676.00
Compresión Simple	IEM	Ensayo	4	149.00	596.00
Durabilidad	IEM	Ensayo	2	1000.00	2000.00
<b>Sub Total</b>					<b>4634.00</b>
<b>ENSAYOS SUELO-CENIZA DE EUCALIPTO-CEMENTO</b>					
<b>Ensayo</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario, Bs</b>	<b>Costo Total, Bs</b>
Compactación Proctor modificado	IEM	Ensayo	2	155.00	310.00
Compactación Estandar	IEM	Ensayo	15	119.00	1785.00
Relación Soporte California CBR	IEM	Ensayo	2	338.00	676.00
Compresión Simple	IEM	Ensayo	24	149.00	3576.00
Durabilidad	IEM	Ensayo	16	1000.00	16000.00
<b>Sub Total</b>					<b>22347.00</b>
<b>Costo Total, Bs</b>					<b>27581.00</b>
<b>Costo Total, \$us (T/C = 6.96 Bs/\$us)</b>					<b>3962.79</b>



2024-TTES-2086-D-1

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-4015/2024  
La Paz, 22 de noviembre de 2024**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **18 de noviembre de 2024**, por **HILDA VERÓNICA QUENTA NINACHOQUE** con C.I. N° **9234097 LP**, con número de trámite **DA 2296/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"ESTABILIZACIÓN DE SUELO ARENO LIMOSO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CENIZA DE EUCALIPTO Y CEMENTO PARA SU USO COMO CAPA SUBRASANTE"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual **SENAPI**, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del **SENAPI** funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los



*ciudadanos ...*", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

#### **POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

#### **RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**ESTABILIZACIÓN DE SUELO ARENO LIMOSO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CENIZA DE EUCALIPTO Y CEMENTO PARA SU USO COMO CAPA SUBRASANTE**" a favor de la autora y titular: **HILDA VERONICA QUENTA NINACHOQUE** con **C.I. N° 9234097 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/lm

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI  
**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**  
LA PAZ - BOLIVIA



**Firma:**



7eXqt5Qu7Pr96J

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, N° 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
N° 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, N° 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, N° 366  
casi esq. Urriagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, N° 243.  
Telf: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, N° 5837,  
entre Ayacucho  
y Junin, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas N° 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf: 72018160



**UMSA – CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

**Autor:** Hilda Veronica Quenta Ninachoque **CI:** 9234097 **Cel:** 76507585

**Correo Electrónico:** [veroqueni3@gmail.com](mailto:veroqueni3@gmail.com)