

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización de suelos arcillosos de  
subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024

Presentado por:

Arnold Beltrán Ruiz

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**Adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.**

Presentado por **Arnold Beltrán Ruiz**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 20 de agosto del 2025 ante el jurado evaluador:

**Presidente:**

  
\_\_\_\_\_  
*Dr. Calixto Cañari Otero*


**Primer miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Ing. Milson Moran Moreno*

**Segundo miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Ing. Fanny Silva Noriega*

**Asesor:**

  
\_\_\_\_\_  
*Mtro. Diomedes Napoleón Ferrel Sarmiento*



*"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"*

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 173-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024**, presentado por el Bachr: **Arnold Beltran Ruiz**, Para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud ACEPTABLE de **(21%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 12 de agosto del 2025

Atentamente,

  
UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
**Dra. Heralda Rojas Enriquez**  
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.  
Archivo  
REG. N° 590

## **Agradecimientos**

*Deseo expresar mi reconocimiento a Dios por brindarme la oportunidad de llegar a esta fase importante de mi trayectoria, así como a mi casa de estudios, la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, por la formación profesional que recibí durante mi preparación como ingeniero civil.*

*A mis padres, Marcosa Isabel Ruiz y Juan Beltrán, a mis hermanos, por su apoyo incondicional durante mi formación profesional, brindándome una formación impregnada de principios éticos y cualidades morales.*

*Mi agradecimiento particular al Mg. Diomedes Napoleón Ferrel Sarmiento por su guía y acompañamiento académico a lo largo del proceso de elaboración y culminación del presente estudio.*

**Arnold Beltrán Ruiz**



## **Dedicatoria**

*A Dios, por otorgarme la existencia y el vigor necesario para continuar mi trayectoria, así como a mi abuelo Virgilio Beltrán (VB), quien desde la eternidad me acompaña y resguarda en cada etapa de este recorrido.*

*Arnold Beltrán Ruiz*



Adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.

Línea de investigación: Ingeniería de materiales

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## ÍNDICE

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>RESUMEN</b>	3
<b>ABSTRACT</b>	4
<b>CAPÍTULO I</b>	5
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	7
1.2.1 Problema general	7
1.2.2 Problemas específicos	7
1.3 Justificación de la investigación	7
<b>CAPÍTULO II</b>	9
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b>	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.1.1 Objetivo general	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis	9
2.2.1 Hipótesis general	9
2.2.2 Hipótesis específicas	9
2.3 Operacionalización de las variables	10
<b>CAPÍTULO III</b>	11
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b>	11
3.1 Antecedentes	11
3.1.1 Antecedentes internacionales	11
3.1.2 Antecedentes nacionales	14
3.1.3 Antecedentes locales	17
3.2 Marco teórico	18
3.2.1 Polvo de mármol en la estabilización de suelos	18
3.2.2 Ceniza de <i>sugarcane</i> como estabilizador de suelos	19



3.2.3	Suelos arcillosos de subrasante	22
3.2.4	Ensayos índices	23
3.2.5	Caracterización de la subrasante	37
3.3	Marco conceptual	39
<b>CAPÍTULO IV</b>		41
<b>METODOLOGÍA</b>		41
4.1	Tipo y nivel de investigación	41
4.2	Diseño de investigación	41
4.3	Descripción ética de la investigación	42
4.4	Población y muestra	43
4.4.1	Población	43
4.4.2	Muestra	43
4.5	Procedimiento	44
4.6	Técnicas e instrumentos	45
4.6.1	Técnicas	45
4.6.2	Instrumentos	45
4.7	Análisis estadístico	46
4.7.1	Estadística descriptiva	46
4.7.2	Estadística inferencial	47
4.7.3	Pasos para ejecutar las pruebas de hipótesis	49
<b>CAPÍTULO V</b>		51
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		51
5.1	Resultados	51
5.1.1	Resultados del objetivo general	51
5.1.2	Resultados del objetivo específico N° 01	52
5.1.3	Resultados del objetivo específico N° 02	58
5.2	Contrastación de hipótesis	59
5.2.1	Prueba de normalidad	59
5.2.2	Contrastación de la hipótesis general	60
5.2.3	Contrastación de la hipótesis específica N° 01	63
5.2.4	Contrastación de la hipótesis específicas N° 2	66
5.3	Discusión	69
5.3.1	Discusión del objetivo general	69
5.3.2	Discusión del objetivo específico N° 01: Propiedades físicas.	69
5.3.3	Discusión del objetivo específico N° 02: Propiedades mecánicas.	70

5.3.4 Análisis crítico de los resultados	71
<b>CAPÍTULO VI</b>	73
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	73
6.1 Conclusiones	73
6.2 Recomendaciones	75
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	76
<b>ANEXOS</b>	82



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> — Variables de la investigación.	10
<b>Tabla 2</b> — Análisis químico por fluorescencia de rayos X.	19
<b>Tabla 3</b> — Propiedades químicas de la ceniza de bagazo.	20
<b>Tabla 4</b> — Dimensiones y abertura para evaluación granulométrica.	25
<b>Tabla 5</b> — Clasificación de suelos según índice de plasticidad.	28
<b>Tabla 6</b> — Clasificación de suelos – método AASHTO.	30
<b>Tabla 7</b> — Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.).	33
<b>Tabla 8</b> — Requerimientos para el ensayo Proctor modificado.	35
<b>Tabla 9</b> — Categorías de subrasante.	37
<b>Tabla 10</b> — Total de muestras testeadas.	43
<b>Tabla 11</b> — Validadores instrumentales.	46
<b>Tabla 12</b> — Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk).	59
<b>Tabla 13</b> — Parámetros físicos y mecánicos del suelo arcilloso.	61
<b>Tabla 14</b> — Análisis del tamaño del efecto.	62
<b>Tabla 15</b> — Parámetros físicos del suelo arcilloso.	64
<b>Tabla 16</b> — Análisis del tamaño del efecto para propiedades físicas.	65
<b>Tabla 17</b> — Evaluación de la capacidad de soporte del suelo.	67
<b>Tabla 18</b> — Análisis del tamaño del efecto para CBR.	68
<b>Tabla 19</b> — Matriz de consistencia.	83
<b>Tabla 20</b> — Resumen de resultados de contenido de humedad natural.	90
<b>Tabla 21</b> — Resumen de resultados de límites de Atterberg.	90
<b>Tabla 22</b> — Resumen resultados de análisis granulométrico.	90
<b>Tabla 23</b> — Resumen de resultados de clasificación SUCS Y AASHTO de suelos.	91
<b>Tabla 24</b> — Resumen de resultados de la D.S.M. y O.C.H.	91
<b>Tabla 25</b> — Resumen de resultados del ensayo CBR al 95% y al 100%.	91
<b>Tabla 26</b> — Resumen expansión CBR suelo natural vs. suelo con adiciones.	92
<b>Tabla 27</b> — Resumen de valoración de instrumentos.	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> — Determinación del contenido de humedad.	24
<b>Figura 2</b> — Desplazamiento y cierre del surco en Casagrande.	27
<b>Figura 3</b> — Límite plástico.	28
<b>Figura 4</b> — Sistema de clasificación unificado de suelos.	31
<b>Figura 5</b> — Carta de plasticidad de clasificación de suelos.	34
<b>Figura 6</b> — Herramientas para realizar el Proctor modificado.	35
<b>Figura 7</b> — Esquema del equipo CBR.	36
<b>Figura 8</b> — Flujograma de procedimiento de investigación.	44
<b>Figura 9</b> — Esquema de criterios de una distribución normal.	50
<b>Figura 10</b> — Resultados del ensayo de límite líquido.	52
<b>Figura 11</b> — Resultados de los ensayos de límite plástico.	53
<b>Figura 12</b> — Resultados de índices de plasticidad.	54
<b>Figura 13</b> — Contenidos de humedades óptimos del ensayo de Proctor modificado.	56
<b>Figura 14</b> — Densidades secas máximas del ensayo de Proctor modificado.	57
<b>Figura 15</b> — Diagrama de porcentajes de CBR al 100%.	58
<b>Figura 16</b> — Formato de instrumento del contenido de humedad del suelo natural.	84
<b>Figura 17</b> — Formato de instrumento de LL, LP e IP del suelo.	85
<b>Figura 18</b> — Formato de instrumento de análisis granulométrico de suelos por tamizado.	86
<b>Figura 19</b> — Formato de instrumento ensayo Proctor modificado.	87
<b>Figura 20</b> — Formato de instrumento de ensayo de CBR.	88
<b>Figura 21</b> — Formato de instrumento de ensayo de CBR esfuerzo vs penetración.	89
<b>Figura 22</b> — Humedad natural del suelo - calicata C-3.	92
<b>Figura 23</b> — Determinación del LL, LP e IP del suelo natural - C-3.	93
<b>Figura 24</b> — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.	94
<b>Figura 25</b> — Determinación del Proctor modificado de suelo natural, C-3.	95
<b>Figura 26</b> — Ensayo de (Relación de Soporte de California) de suelo natural, C-3.	96
<b>Figura 27</b> — Gráfico esfuerzo vs penetración de CBR de suelo natural, C-3.	97
<b>Figura 28</b> — LL, LP e IP: C-3 + 5% PM + 5% ceniza <i>sugarcane</i> del suelo natural.	98

<b>Figura 29</b> — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.	99
<b>Figura 30</b> — Proctor modificado de SN, C-3 + 5% PM + 5% ceniza de <i>sugarcane</i> .	100
<b>Figura 31</b> — CBR de SN, C-3 + 5% de PM + 5% de ceniza de <i>sugarcane</i> .	101
<b>Figura 32</b> — Esfuerzo vs penetración del SN, C-3 + 5% PM + 5% ceniza de <i>sugarcane</i> .	102
<b>Figura 33</b> — LL, LP e IP del SN, C-3+ 7.5% de PM + 7.5% de ceniza de <i>sugarcane</i> .	103
<b>Figura 34</b> — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.	104
<b>Figura 35</b> — Proctor modificado de SN, C-3 + 7.5% PM + 7.5% ceniza de <i>sugarcane</i> .	105
<b>Figura 36</b> — CBR de suelo natural, C-3 + 7.5% de PM + 7.5% ceniza de <i>sugarcane</i> .	106
<b>Figura 37</b> — Esfuerzo vs penetración CBR: C-3 + 7.5% PM + 7.5% ceniza <i>sugarcane</i> .	107
<b>Figura 38</b> — LL, LP e IP del SN C-3+ 10% de PM + 10% de ceniza de <i>sugarcane</i> .	108
<b>Figura 39</b> — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.	109
<b>Figura 40</b> — Proctor modificado de SN, C-3 + 10% de PM + 10% de ceniza de <i>sugarcane</i> .	110
<b>Figura 41</b> — Ensayo de CBR de SN, C-3 +10% de PM +10% de ceniza de <i>sugarcane</i> .	111
<b>Figura 42</b> — E vs P, CBR, del SN, C-3 + 10% de PM + 10% de ceniza de <i>sugarcane</i> .	112
<b>Figura 43</b> — Valoración del experto N° 01.	114
<b>Figura 44</b> — Valoración del experto N° 02.	115
<b>Figura 45</b> — Valoración del experto N° 03.	116
<b>Figura 46</b> — Valoración del experto N° 04.	117
<b>Figura 47</b> — Valoración del experto N° 05.	118
<b>Figura 48</b> — Declaración jurada de originalidad y no plagio.	119
<b>Figura 49</b> — Recolección de muestras de suelo en campo.	120
<b>Figura 50</b> — Ensayo de contenido de humedad del suelo natural.	120
<b>Figura 51</b> — Ensayo del análisis granulométrico del suelo natural.	121
<b>Figura 52</b> — Ensayo de los límites de Atterberg del suelo natural y con adiciones.	121
<b>Figura 53</b> — Ensayo Proctor modificado del suelo natural y adiciones.	122
<b>Figura 54</b> — Prueba de penetración, suelo con polvo de mármol y CBCA.	122
<b>Figura 55</b> — Autorización para ejecución de tesis.	123
<b>Figura 56</b> — Certificado de calibración	124
<b>Figura 57</b> — Certificado de calibración	125
<b>Figura 58</b> — Certificado de calibración	126
<b>Figura 59</b> — Certificado de calibración	127
<b>Figura 60</b> — Certificado de calibración	128

## SIGLAS Y ACRÓNIMOS

**AASHTO** — American Association of State Highway and Transportation Officials

**ASTM** — American Society for Testing and Materials

**CBR** — Relación de Soporte de California

**CCA** — Ceniza de caña de azúcar

**COH** — Humedad Óptima de Compactación

**DMS** — Máxima Densidad Seca

**IP** — Índice de Plasticidad

**LL** — Límite Líquido

**LP** — Límite Plástico

**MDS** — Máxima Densidad Seca del Suelo.

**MTC** — Ministerio de Transportes y Comunicaciones

**NTP** — Normas Técnicas Peruanas

**PM** — Polvo de mármol

**SUCS** — Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

## INTRODUCCIÓN

El sistema vial peruano enfrenta un desafío estructural crítico, con un 78% de sus carreteras (140,954.8 km) sin pavimentación, de acuerdo con datos del (MTC 2023). Particularmente, la red vial vecinal del sector Tarampampa en Abancay, que se extiende por 1+250.00 km con un ancho de 4.00 m bajo responsabilidad de la Municipalidad Provincial de Abancay, está compuesta predominantemente por terrenos arcillosos que presentan propiedades inadecuadas para desempeñarse efectivamente como capa de fundación. Durante las temporadas de precipitaciones torrenciales, estos caminos se transforman en lodazales prácticamente intransitables, generando un aislamiento crítico para los pobladores que dependen de esta infraestructura para desplazarse diariamente hacia sus centros de trabajo. Esta situación evidencia la urgente necesidad de implementar soluciones técnicas apropiadas para el mejoramiento de la subrasante en esta zona.

La finalidad primordial del presente estudio consiste en analizar la efectividad del mejoramiento de terrenos arcillosos a través de la adición de desechos de polvo mármol y ceniza de *sugarcane* con el propósito de optimizar las características geotécnicas de la capa de fundación en el sector Tarampampa, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

La metodología empleada se basa en un diseño experimental que incluye la caracterización física y mecánica de los suelos arcillosos de Tarampampa, seguida por ensayos de laboratorio con diferentes proporciones de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* como agentes estabilizadores. Se evaluarán parámetros fundamentales como el índice de plasticidad, densidad seca máxima y capacidad de soporte (CBR) bajo diferentes porcentajes de adición. El estudio se fundamenta en teorías de estabilización química de suelos que explican cómo los minerales arcillosos interactúan con componentes puzolánicos y cálcicos, desarrollando procesos químicos que transforman positivamente las características físico-mecánicas del terreno, reduciendo su expansión y aumentando su resistencia.

Esta investigación no solo busca resolver un problema local en Abancay, sino que representa un aporte científico-técnico al proporcionar datos experimentales sobre una combinación innovadora de estabilizadores derivados de residuos industriales, promoviendo así la economía



circular y el desarrollo de infraestructura vial sostenible en regiones con condiciones geotécnicas desafiantes.

El presente informe está conformado por VI capítulos, distribuidos tal como se especifica seguidamente:

Capítulo I: Planteamiento del problema. Se efectúa el reconocimiento y caracterización de la situación problemática de los suelos arcillosos en Abancay, formulación de preguntas de investigación, delimitación del alcance del estudio y justificación de la relevancia del proyecto en términos académicos, sociales y ambientales.

Capítulo II: Objetivos e hipótesis. Se detallan los objetivos generales y específicos de la investigación, las hipótesis planteadas y la operacionalización de las variables del estudio.

Capítulo III: Marco teórico referencial. Presenta los antecedentes nacionales e internacionales relevantes al tema, marco conceptual con definición de términos clave y fundamentos científicos y técnicos relacionados con la estabilización de suelos arcillosos.

Capítulo IV: Metodología. Se establece la estructura metodológica del estudio con orientación cuantitativa, alcance descriptivo y naturaleza aplicada. Se establece el universo y la muestra investigativa, métodos y herramientas para la obtención de información incluyendo ensayos de laboratorio, observación directa y análisis documental, así como los tratamientos y evaluación estadística de la información.

Capítulo V: Resultados y discusión. Se presentan los hallazgos conseguidos, incluyendo las proporciones óptimas de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane*, especificaciones técnicas y procedimientos de aplicación destinados al mejoramiento de la capa de fundación en la vía Tarampampa - Abancay.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones. Se concluye sobre el cumplimiento de los objetivos planteados y se determina la efectividad de la estabilización de suelos arcillosos mediante polvo de mármol y ceniza de *sugarcane*. Se establecen las conclusiones principales del estudio y se proponen recomendaciones prácticas para la implementación de la solución propuesta en la carretera Tarampampa - Abancay, así como sugerencias para futuras líneas de investigación.



## RESUMEN

En el Perú, la infraestructura vial se organiza en tres categorías: red vial nacional (27,109 km), bajo jurisdicción del MTC, red vial regional (27,505 km), a cargo de los Gobiernos Regionales, y la red vial local (113,857 km), bajo responsabilidad de los Gobiernos Municipales, (COMEXPERU 2020). En Abancay la carretera Tarampampa presenta una subrasante compuesta por suelos arcillosos de baja capacidad portante, afectando a más de 500 habitantes, quienes enfrentan dificultades de tránsito, especialmente en temporadas de lluvias. La finalidad del estudio consiste en analizar la influencia que ejercen los residuos de polvo mármol y ceniza de *sugarcane* sobre el mejoramiento de terrenos arcillosos.

La metodología empleada corresponde a un diseño experimental con ensayos de laboratorio bajo estándares ASTM y normas del MTC. Se analizó una población de suelos arcillosos en la carretera Tarampampa, con una muestra de tres calicatas ubicadas cada 350 metros, evaluando diferentes proporciones de estabilizantes.

Las pruebas se fundamentan en las teorías de compactación de suelos y estabilización química, aplicando el Proctor Modificado, índice de plasticidad y CBR. Los hallazgos evidenciaron que la incorporación del 7.5% de desechos de polvo mármol y ceniza de *sugarcane* mejora la resistencia portante, alcanzando un CBR del 90%, superando el umbral del 20% exigido por el MTC.

Así mismo, se concluye que la incorporación de estos residuos mejora significativamente la estabilidad de la subrasante, representando una alternativa viable para la infraestructura vial en zonas con condiciones geotécnicas similares.

**Palabras clave:** Estabilización de suelos, polvo de mármol, ceniza de *sugarcane*, subrasante.



## ABSTRACT

In Peru, the road infrastructure is organized into three categories: national road network (27,109 km), under the jurisdiction of the MTC, regional road network (27,505 km), managed by Regional Governments, and local road network (113,857 km), under the responsibility of Municipal Governments, (COMEXPERU 2020). In Abancay, the Tarampampa highway presents a subgrade composed of clayey soils with low bearing capacity, affecting more than 500 inhabitants who face transit difficulties, especially during rainy seasons. The purpose of the study is to analyze the influence exerted by marble dust waste and *sugarcane* ash on the improvement of clayey soils.

The methodology employed corresponds to an experimental design with laboratory tests under ASTM standards and MTC regulations. A population of clayey soils on the Tarampampa highway was analyzed, with a sample of three test pits located every 350 meters, evaluating different proportions of stabilizers.

The tests are based on soil compaction and chemical stabilization theories, applying the Modified Proctor, plasticity index, and CBR. The findings showed that the incorporation of 7.5% marble dust waste and *sugarcane* ash improves bearing capacity, reaching a CBR of 90%, exceeding the 20% threshold required by the MTC.

Likewise, it is concluded that the incorporation of these residues significantly improves subgrade stability, representing a viable alternative for road infrastructure in areas with similar geotechnical conditions.

**Keywords:** *Soil stabilization, marble dust, sugarcane ash, subgrade.*



## CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción del problema

En el ámbito internacional (Abdelkader, Hussein y Ye 2021) indican que los suelos expansivos son aquellos que presentan cambios importantes de volumen acompañados de cambios en el contenido de agua ya que se hincha cuando se le añade agua y se encoge cuando se evapora este comportamiento de hinchamiento se debe a la presencia de minerales arcillosos altamente reactivos como la montmorillonita y la esmectita. Así mismo, (Jassim et al. 2022) menciona que los terrenos inestables pueden generar graves inconvenientes en las estructuras viales; por consiguiente, el empleo de desechos de polvo mármol como componente ecológico para el mejoramiento de la capa de fundación tiene grandes ventajas para reducir la contaminación ambiental. A su vez, (Abdelkader, Hussein y Ye 2021) mencionan que los problemas del suelo expansivo han aparecido como agrietamiento, pavimentos, caminos; en ese sentido, los residuos sólidos minerales (polvo de cantera, polvo de mármol) son materiales de desecho directamente al medio ambiente esto puede causar daños ambientales. por tal motivo, los autores recomiendan reciclar los materiales de desecho en aplicaciones de ingeniería civil sostenibles ya que es de importancia universal, a nivel mundial se buscan nuevas formas de conservar los recursos naturales y reducir la cantidad de materiales de desecho que se envían a los vertederos.

En territorio peruano, conforme al Anuario Estadístico del (MTC 2023) existe un total de 180,669.5 km de infraestructura vial. De esta cantidad, 33,153 km pertenecen a vías asfaltadas repartidas en categorías nacional, regional y local. Asimismo, dispone de 140,954.8 km de vías sin pavimentar, en tanto que 6,561.7 km de vías se hallan en etapa de planificación. Considerando esta información, es evidente que Perú cuenta con una predominancia de carreteras no pavimentadas que constituyen aproximadamente el 78% del sistema vial peruano (140,954.8 km de los 180,669.5 km totales), lo cual implica la necesidad de destinar mayores recursos económicos para su acondicionamiento completo,



a partir de la subrasante hasta la capa de rodadura, específicamente la subrasante representa el elemento que demanda incremento considerable en el presupuesto económico, dado que habitualmente no cumple con las especificaciones técnicas requeridas, demandando por tanto intervenciones onerosas tales como el reemplazo completo del material o su optimización a través de métodos de mejoramiento, antes de poder instalar las subsiguientes capas que conforman la estructura completa de la carretera.

En Abancay, la red vial vecinal del sector Tarampampa presenta carreteras no pavimentadas bajo la responsabilidad de la Municipalidad Provincial de Abancay, esta vía que se extiende por 1.25 km con un ancho de 4.00 m, está conformada predominantemente por suelos arcillosos, características totalmente desfavorables para su función como subrasante; durante las temporadas de lluvias intensas, estos caminos se transforman en lodazales prácticamente intransitables, generando grietas longitudinales de 1-4 mm de ancho y hasta 5 cm de profundidad, grietas transversales con separaciones de 2-6 cm, hundimientos de 5-10 cm de profundidad y deformaciones por ahuellamiento de hasta 7 cm, lo que genera un incremento considerable en los tiempos de desplazamiento y episodios de intransitabilidad total durante las precipitaciones, afectando directamente a aproximadamente 500 habitantes del sector que experimentan aislamiento crítico durante 3-4 días por cada evento de precipitación intensa.

En consecuencia, esta situación pone de manifiesto la urgente necesidad de implementar soluciones técnicas apropiadas para el mejoramiento de la subrasante en la red vial vecinal del sector Tarampampa. Así mismo, la intervención de esta carretera requiere de estudios geotécnicos específicos que permitan determinar los métodos de estabilización más eficientes para suelos arcillosos, entre las alternativas factibles incluyen el empleo de agentes mejoradores del terreno, la adición de fibras con características estructurales, o la aplicación de sistemas de drenaje optimizados para reducir los efectos de la humedad en los suelos; frente a esta problemática emergió la necesidad de hallar procedimientos sustentables para optimizar las características geotécnicas de dichos terrenos arcillosos y acondicionarlos como capas de fundación apropiadas para la edificación vial.

En consecuencia, la problemática central se orienta hacia el análisis de la efectividad del mejoramiento de terrenos arcillosos mediante desechos de polvo mármol y ceniza de *sugarcane* destinados a su aplicación en capas de fundación del sector Tarampampa, Abancay, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.



## 1.2 Enunciado del problema

### 1.2.1 Problema general

¿Cuál es la influencia de la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024?

### 1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la influencia en las propiedades físicas de un suelo arcilloso al adicionar polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024?
- ¿Cuál es la influencia en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024?

## 1.3 Justificación de la investigación

En el Perú, el 78% de la red vial (140,954.8 km) corresponde a carreteras sin pavimentar, lo que genera problemas de accesibilidad y conectividad (MTC 2023). En Abancay, la carretera vecinal Tarampampa, de 1.25 km de longitud, se encuentra compuesta por suelos arcillosos de baja capacidad portante, afectando a más de 500 habitantes que dependen de esta vía para su movilidad diaria. Durante las lluvias, el camino se vuelve intransitable, provocando pérdidas económicas en el sector agrícola y comercial, además de dificultar el acceso a servicios básicos como salud y educación. La estabilización de la subrasante es una necesidad urgente para garantizar la transitabilidad y mejorar la calidad de vida de los pobladores.

El estudio es relevante porque plantea una solución eficiente y sostenible para la estabilización de suelos arcillosos en vías rurales, contribuyendo a mejorar la infraestructura vial en regiones de alta vulnerabilidad geotécnica. La propuesta responde a los objetivos del MTC en la optimización de carreteras no pavimentadas y se alinea con las estrategias de desarrollo sostenible promovidas a nivel nacional. Además, su aplicabilidad no se limita a la carretera Tarampampa, sino que puede replicarse en otras zonas con condiciones geotécnicas similares, promoviendo un uso más eficiente de los recursos naturales y minimizando costos de mantenimiento.



Esta investigación es inédita en la región y presenta un enfoque innovador al emplear desechos de polvo mármol y ceniza de *sugarcane* como agentes mejoradores de terrenos arcillosos. Si bien se han desarrollado investigaciones acerca del empleo de desperdicios industriales en el mejoramiento de suelos, la mezcla particular de dichos componentes y su uso en la capa de subrasante de una carretera rural en Abancay no ha sido anteriormente explorada. La integración de estos desechos industriales en la ingeniería de caminos constituye una opción innovadora de mejoramiento con ventajas económicas y ecológicas.

El estudio contribuye al conocimiento científico-técnico al proporcionar datos experimentales sobre la influencia del polvo de mármol y la ceniza de *sugarcane* en las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos, donde se evaluó el índice de plasticidad, óptimo contenido de humedad, la densidad seca máxima y capacidad de soporte (CBR) bajo diferentes porcentajes de adición, permitiendo establecer parámetros óptimos de dosificación. Además, los resultados podrán ser utilizados como referencia en futuras investigaciones sobre técnicas alternativas de estabilización de suelos, contribuyendo al desarrollo de infraestructura vial más sostenible y promoviendo la economía circular mediante la reutilización de residuos industriales.



## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 2.1 Objetivos de la investigación

##### 2.1.1 Objetivo general

Determinar la influencia de la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.

##### 2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la influencia en las propiedades físicas de un suelo arcilloso al adicionar polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.
- Determinar la influencia en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

#### 2.2 Hipótesis

##### 2.2.1 Hipótesis general

La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, logrando su estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

##### 2.2.2 Hipótesis específicas

- La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* influye significativamente en las propiedades físicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.
- La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* influye significativamente en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso, aumentando su resistencia en capacidad de soporte (CBR) en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.



### 2.3 Operacionalización de las variables

Tabla 1 — Variable de la investigación.

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> (VI)	El polvo de mármol es un subproducto generado durante los procesos de corte y limpieza del mármol, compuesto principalmente de carbonato de calcio (Neeladharan et al. 2018). De igual manera, la ceniza del residuo de caña de azúcar (CBCA), representa un desecho agroindustrial sólido proveniente de la combustión del bagazo en hornos para producción energética, destacando por su amplia accesibilidad (Figueredo y Pavia 2020).	polvo mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> empleado como agente mejorador de terrenos en diversas dosificaciones, específicamente, comprendidas entre 0%, 5%, 7.5% y 10% respecto al peso total del suelo.	Adición de residuos de polvo mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> (Dx1)	porcentajes de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> (%)	—
Estabilización de suelos arcillosos (V.D)	La estabilización de suelos se conceptualiza como la optimización de las características físicas del suelo mediante procesos mecánicos e inclusión de componentes químicos, orgánicos o artificiales. Dichos mejoramientos, comúnmente se ejecutan en terrenos de capa de fundación deficiente o limitada, siendo denominados como mejoramiento suelo-cemento, suelo-cal, suelo-asfalto y otras combinaciones variadas (MTC, 2014).	Proceso en el cual se integran ceniza de <i>sugarcane</i> y desechos de polvo mármol en terrenos arcillosos con el fin de optimizar su resistencia y capacidad portante, siendo valorada a través de pruebas de límites de Atterberg, Proctor Modificado y Relación de Soporte de California (CBR).	Propiedades físicas (Dy1)	Limite liquido (%)	Ficha de recolección de datos
				Limite plástico (%)	
				Índice de plasticidad (%)	
			Propiedades mecánicas (Dy2)	Contenido de humedad óptimo (%)	Ficha de recolección de datos
				Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Ficha de recolección de datos
Propiedades mecánicas (Dy2)	Ensayo de CBR (%)	Ficha de recolección de datos			

## CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 3.1 Antecedentes

#### 3.1.1 Antecedentes internacionales

Ranjan y Sharma (2023), en su artículo científico “Evaluating the properties of compressed soil earth blocks after the addition of bagasse ash, marble powder and paddy straw.” *Earth and Environmental Science*, Chandigarh. En su investigación utilizaron materiales de desecho como paja de arroz, polvo de mármol y ceniza del residuo de caña como agentes mejoradores; de igual forma, la utilización de desperdicios en CSEB puede contribuir al progreso sustentable y asimismo colaborará en la disminución del costo constructivo; también en este estudio, la paja de arroz se utiliza en porcentajes de 0,75%, 0,90% y 1,05%; el polvo de mármol se utiliza en porcentajes del 27%, 32% y 37% y la ceniza de bagazo se utiliza en porcentajes del 8%, 10% y 12%; con estos porcentajes se seleccionaron un total de 27 combinaciones; y para cada prueba se prepararon 2 bloques de tamaño 220 mm x 100 mm x 100 mm y vigas de tamaño 500 mm x 100 mm x 100 mm; estos bloques fueron curados mediante aspersion de agua durante 28 días; igualmente se evidenció un incremento en la OMC al elevar la proporción de desechos mármol; el 30% constituyó la OMC máxima registrada al incorporar el 37% de polvo mármol; después de aumentar el contenido de cenizas de bagazo del 8% al 10%, se observó un aumento en la OMC; después del 10% de contenido de cenizas de bagazo descende. De igual manera, este estudio resulta relevante dado que analiza uno de los factores que se busca examinar en la presente investigación.

Abdelkader, Hussein y Ye (2021), en su artículo científico titulado “Influence of Waste Marble Dust on the Improvement of Expansive Clay Soils. *Hindawi, Wuhan.*” la finalidad primordial de esta investigación consiste en emplear dicho material residual en el mejoramiento del terreno desde la perspectiva del



aprovechamiento para estos suelos económicos y la supresión de sus efectos ecológicos perjudiciales; los desechos de polvo mármol se combinaron con especímenes de terreno expansivo en diferentes proporciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% respecto al peso seco del suelo; para los cual los autores realizaron diferentes pruebas, incluidos los límites de Atterberg, la compactación Proctor estándar, la resistencia a la compresión no confinada (UCS), la relación de carga de California (CBR), el porcentaje de hinchazón, las pruebas de contracción lineal (LS) y los análisis XRF y XRD para suelos naturales y estabilizados con polvo de mármol; también las mezclas de suelo utilizadas para las pruebas UCS, CBR y oleaje se compactaron al contenido de humedad óptimo (OMC) y la densidad seca máxima (MDD) utilizando el método de compactación estándar Proctor y se curaron durante 7 días; así mismo los hallazgos de los ensayos evidenciaron que se presentan efectos considerables en el mejoramiento de las características de los terrenos expansivos; adicionalmente, los resultados demostraron que conforme se incrementa la proporción de polvo marmóreo, el índice de plasticidad y el potencial de expansión del suelo arcilloso expansivo se reducen; además, el contenido de humedad óptimo disminuye y la densidad seca máxima aumenta. Así mismo, esta investigación resulto ser importante ya que estudia a uno de los factores que se busca examinar en la presente investigación.

Ahmed et al. (2024) en su artículo científico titulado “Estabilización de suelos arcillosos de pavimento bajo rasante utilizando ceniza de caña de azúcar y cal” MDPI – Pakistán. Se propusieron examinar la aplicación de combinaciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar (SBA) y cal como agentes estabilizadores químicos para el mejoramiento de subbases de suelo arcilloso, para eso se llevaron a cabo diversas pruebas geotécnicas de laboratorio tales como los límites de Atterberg, la prueba de compactación y la relación de carga de California (CBR) en suelos puros y estabilizados. Las mezclas de cal y SBA, se utilizaron diferentes proporciones de 5%, 7.5% y 10% del peso del suelo seco respectivamente, obteniendo como resultados más relevantes que la combinación del 2.5% de cal con 7.5% SBA evidenció un incremento del 40% en el límite plástico, la mezcla del 2.5% de cal con 2.5% de SBA demostró el mejor mejoramiento en la consistencia del terreno disminuyendo la plasticidad de alta a baja conforme al gráfico de plasticidad, y la combinación del 2.5% de SBA con 5% de cal registró



la mayor optimización en el valor CBR alcanzando aproximadamente un incremento del 69% superior al terreno natural. De igual manera, este estudio resulta relevante dado que analiza uno de los factores de interés.

Haque et al. (2024) en su artículo científico titulado “Evaluación de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar como Material Estabilizador de Subrasante: Un Estudio de Caso en Bangladesh”, BAUET Journal – Bangladesh. tuvieron como objetivo evaluar la eficacia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (SBA) como material estabilizador para mejorar las propiedades de suelos de subrasante; las muestras de suelo recolectadas se elaboraron con diversas proporciones (5%, 10%, 15% y 20%) de SBA respecto al peso. Se ejecutaron ensayos de laboratorio, abarcando los límites de Atterberg, la técnica Proctor estándar y evaluar las modificaciones en las características del terreno. Los resultados indican que el SBA reduce el Índice de Plasticidad (IP), aumenta la Densidad Máxima Seca (DMS) hasta un 15 % de contenido de SBA. Se observaron efectos óptimos de estabilización de forma consistente con un 15 % de contenido de SBA. Esta investigación evidencia que la SBA puede optimizar eficientemente las características del suelo de la capa de fundación, lo cual indica su potencial como opción sustentable frente a los mejoradores tradicionales mediante la utilización de cal y cemento. De igual forma, este estudio resulto relevante debido a que examina las dos variables que se busca analizar en la presente investigación.

Jassim et al. (2022), en el artículo científico titulado “Utilización de polvo de mármol residual como material de estabilización sostenible para la capa de subrasante”. ScienceDirect, Mustansiriyah. desarrollaron una investigación con el objetivo de examinar de qué manera los desechos de polvo mármol influyen en el desempeño de la subrasante del suelo ; se utilizaron diversas proporciones de polvo mármol (MD) (0, 3, 6, 9, 12, 15); la distribución del tamaño de las partículas, la densidad seca máxima, el contenido de humedad óptimo y la resistencia a la compresión libre (UCS) se determinaron mediante pruebas de laboratorio; además, concluyen que la curva de distribución del tamaño de grano se desplazó hacia abajo para el suelo arcilloso tratado con polvo de mármol (MD) a medida que el contenido de arena aumenta del 3% al 28%, mientras que el contenido de arcilla y el contenido de limo se redujeron en aproximadamente un 42% cuando el contenido de MD aumentó; del 0% al 15%. De igual manera, esta investigación



resulta relevante puesto que analiza uno de los factores que se busca examinar en el presente estudio.

### 3.1.2 Antecedentes nacionales

Quispe (2021), en su artículo “Estabilización de suelos expansivos con ceniza de mazorca de maíz en la ciudad del Cusco”. Establece que el estudio busca evaluar las características físicas y mecánicas del terreno expansivo localizado en la vía rápida de la ciudad del Cusco, incorporando diversas cantidades de ceniza de mazorca de maíz con el objetivo de determinar la proporción óptima de ceniza a incorporar a esta tipología de suelos; de igual manera, se determina que el terreno examinado en el presente estudio correspondió a una arcilla mal graduada con arena (CL) con alta plasticidad ( $IP=10.14$ ) y una resistencia de soporte deficiente ( $CBR=7.2$ ); no obstante, al incorporar ceniza de mazorca de maíz se logró optimizar sus características tanto físicas como mecánicas; la dosificación óptima de ceniza para esta tipología de suelo fue de 8%. Por tanto, esta investigación resulta relevante dado que examina una de las variables que se busca analizar en el presente estudio.

De la Cruz (2024), en su tesis titulada “Estabilización de suelos arcillosos incorporando porcentajes de vidrio pulverizado y ceniza de bagazo de caña de azúcar” Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo – Chiclayo. En su investigación tiene como finalidad examinar de qué manera incide la adición de proporciones de vidrio triturado y ceniza de residuo de caña azúcar en las muestras de capas de fundación arcillosas. Se desarrolló la metodología de ensayos de campo y laboratorio conforme establecen los manuales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Se extrajo muestra de suelo natural de las 3 calicatas, para el examen de la incidencia de los aditivos con las incorporaciones de 4%,7%,10%,15% de vidrio triturado (VP) y 5%,8%,11%,16% de ceniza de residuo de caña azúcar (CDBC). Los hallazgos que se obtuvieron en laboratorio al incorporar humedad, índice de plasticidad, contenido de humedad óptimo, densidad máxima seca, índice de CBR y ensayos químicos; Además, se registraron resultados de CBR superiores para proporciones de aditivo con el 15% VP y 16% CDBC, como también con la mezcla de 10% VP + 16% CDBC, optimizando la capa de fundación de categoría (Subrasante inadecuada) a (Subrasante apropiada).



Por tanto, esta investigación resulta relevante debido a que examina uno de los componentes que se busca analizar en el presente estudio.

Barreto (2020), en su tesis titulada “Estabilización de Suelos Cohesivos Incorporando Ceniza Oriza Sativa y Melaza Saccharum Officinarum en la av. Esones Muro-Chiclayo 2020 – Chiclayo”. Establecieron que la finalidad es el mejoramiento de terreno cohesivos empleando los componentes que se obtienen excesivamente. Los materiales se extrajeron de una planta procesadora de azúcar y de una apiladora de arroz, los ensayos ejecutados fueron CBR, desarrollando estudios con COS en dosificaciones de 2.5%; 5%; 7.5%; al igual que MSO en proporciones de 2.5%; 5%; 7.5% y dosificaciones de mezclas de ambos componentes que son de 2.5% COS y 2.5%; 5%; 7.5% MSO, 5% COS y 2.5%; 5%; 7.5% MSO, 7.5% COS y 2.5%; 5%; 7.5% MSO. Consiguiendo un hallazgo para mejoramiento de terreno favorable con la dosificación de 5% COS y 5% MSO, lo que nos condujo a conseguir una densidad máxima seca 1.953 gr/cm<sup>3</sup> y contenido de humedad óptimo 14.56% y un CBR 23%; concluyendo que la Ceniza de Cáscara de Arroz Sativa (COS) y Melaza Saccharum Officinarum (MSO) optimiza el CBR estabilizan el terreno cohesivo para capa de fundación, encontrar nuevos aprovechamientos para COS y MSO, implica incorporar valor a estos desperdicios y disminuir el efecto perjudicial en el entorno ecológico y la producción de enfermedades respiratorias o de otro tipo. En este sentido, la relevancia de esta investigación se fundamentó en que examina una de las variables que se busca evaluar dentro del presente estudio.

Ricra (2022), en su tesis titulada “Adición de ceniza de caña de azúcar en la estabilización de suelos tropicales en el centro poblado Naranjal, Selva Central – 2021 – Huancayo”, Universidad continental. Establecieron que la finalidad general fue establecer la incidencia de la incorporación de ceniza de caña azúcar en el mejoramiento de terrenos tropicales en la Selva Central. El procedimiento de investigación fue científico, de tipo aplicativo, con alcance explicativo y estructura experimental debido a la incorporación de ceniza de caña azúcar en diversas proporciones. La población estuvo delimitada por los terrenos tropicales del distrito de San Ramón, provincia de Chanchamayo, Junín. La muestra estuvo representada por 240 Kg de suelo tropical de la Avenida Jhan Franco Munier del Centro Poblado Naranjal del distrito de San Ramón que pertenece a la provincia



de Chanchamayo. Los hallazgos de la investigación evidenciaron que la proporción de 10% y 15% de ceniza de caña azúcar logran mejorar el terreno tropical a nivel de capa de fundación debido a que los valores de CBR conseguidos superaron el 6% mínimo para ser aceptada como capa de fundación, los cuales fueron 43.8% y 38.9% respectivamente. Se llegó a la determinación que la ceniza de caña azúcar incide favorablemente en el mejoramiento de terrenos tropicales de la selva central debido al componente puzolánico de la misma que brinda resistencia al terreno tropical.

Ari (2024), en su tesis titulada "Estudio comparativo del efecto de ceniza de concha de abanico y polvo de mármol sobre las propiedades de la subrasante de la vía Caminaca - Achaya". se desarrolló para examinar cómo la incorporación de ceniza de cáscara de quinua y desechos de polvo marmóreo en proporciones del 4% y 8% influye en las características de la capa de fundación de la vía mencionada. Se utilizó una estructura experimental que incluyó varios ensayos para evaluar las características propuestas. Los hallazgos conseguidos de la capa de fundación de la vía Caminaca – Achaya, evidencian que el IP en tres puntos de muestreo PM-1, PM-2 y PM-3 fue del 18.16%, 18.93% y 18.40% respectivamente. En cuanto al grado de compactación, medido por la MDS y el OCH, se registraron valores de 1.755 gr/cm<sup>3</sup> y 9.72% para el PM-1, 1.76 gr/cm<sup>3</sup> y 9.56% para el PM-2, y 1.762 gr/cm<sup>3</sup> y 9.98% para el PM-3. En relación al CBR al 95% de la MDS, se registraron valores de 5.07%, 5.09% y 5.30% para PM-1, PM-2 y PM-3 respectivamente. Al incorporar cenizas de cáscara de quinua y desechos de polvo marmóreo en proporciones de 4% y 8% el IP disminuyó. Además, se registró que la incorporación de ceniza de cáscara de quinua y desechos de polvo marmóreo en proporciones del 4% y 8% optimizó el grado de compactación de la capa de fundación. Con el 8% de ceniza de cáscara de quinua, se obtuvieron valores de MDS y OCH de 1.994 gr/cm<sup>3</sup> y 7.65% para PM-1, 1.998 gr/cm<sup>3</sup> y 7.40% para PM-2, y 2.006 gr/cm<sup>3</sup> y 7.25% para PM-3. Mientras que con el 8% de desechos de polvo marmóreo, los valores fueron de 2.015 gr/cm<sup>3</sup> y 7.25% para PM-1, 2.019 gr/cm<sup>3</sup> y 7.16% para PM-2, y 2.025 gr/cm<sup>3</sup> y 7.13% para PM-3. Finalmente, se determinó que la incorporación de ceniza de cáscara de quinua y desechos de polvo marmóreo en proporciones del 4% y 8% incrementó el CBR de la capa de fundación. Con un 8% de ceniza de cáscara de quinua, se registraron valores de

CBR al 95% de la MDS del 14.35%, 14.59% y 14.73% para PM-1, PM-2 y PM-3 respectivamente. Mientras que con un 8% de desechos de polvo marmóreo, los valores fueron del 15.77%, 15.80% y 16.26% para los mismos puntos de muestreo.

### 3.1.3 Antecedentes locales

Ustua (2022), en su tesis “Incorporación de cenizas caña de azúcar en la subrasante de la carretera Aymas baja - Quisapata, Apurímac-2022”. Universidad Cesar Vallejo. desarrolló un estudio enfocado en determinar cómo la adición de cenizas de caña de azúcar (CCA) modifica las características físicas y mecánicas del suelo de subrasante en la carretera Aymas baja – Quisapata; se trabajó con dos muestras de suelo (C-2 y C-5), ensayadas con diferentes porcentajes de adición de CCA (9%, 10%, 11% y 12%); estos resultados mostraron mejoras significativas en propiedades clave como el índice de plasticidad (IP), la humedad óptima (OCH), la máxima densidad seca (MDS) y el soporte California Bearing Ratio (CBR); en ambos casos, se observó una disminución del IP y un aumento del CBR, con una dosificación óptima del 12%; también la investigación concluyó que las cenizas de caña de azúcar tienen un efecto positivo en la estabilización de suelos para subrasante, aunque en el caso de la humedad óptima, los resultados fueron variables. Así mismo, este antecedente resulta relevante y significativo para la presente investigación, ya que aborda directamente mis de variables que se pretende analizar.

Salas (2022), en su trabajo de titulación denominado “Mejoramiento de la subrasante del camino vecinal San Gabriel incorporando ceniza de bagazo de caña de azúcar, Abancay Apurímac 2022”. Universidad Cesar Vallejo. planteó como finalidad analizar el efecto que produce la ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre las características geotécnicas de la subrasante del camino vecinal San Gabriel; se aplicaron tres dosificaciones del material estabilizante (5%, 10% y 15%), evaluando indicadores como contenido de humedad, límites de Atterberg e índice CBR; estos resultados demostraron que la adición de ceniza de bagazo reduce el contenido de humedad y el índice de plasticidad del suelo; la dosificación del 15% mostró la mayor efectividad, disminuyendo significativamente el contenido de agua y aumentando el CBR hasta cuatro veces su valor inicial, lo que sugiere que esta proporción es la más adecuada para la mejora de suelos arcillosos en condiciones similares. Así mismo, esta investigación aporta información



experimental útil sobre la aplicación de ceniza de bagazo de caña como aditivo natural en la estabilización de subrasantes

## **3.2 Marco teórico**

### **3.2.1 Polvo de mármol en la estabilización de suelos**

El polvo de mármol es el residuo que se obtiene durante el corte y limpieza del mármol; el rápido desarrollo de las empresas comerciales de mármol produce material de desecho; se convierte en un problema importante para las personas que los rodean y, además, va como una toxina para influir en el entorno natural de la Tierra; ha sido observado que los residuos de mármol constituyen un material residual efectivo en la estrategia de estabilización del suelo lo que mejora las cualidades de compactación, las características de la subrasante, las características de hinchazón y las características de compresibilidad (Priyanka y Arora 2019).

#### **3.2.1.1 Polvo de mármol como estabilizante**

El polvo de mármol es un subproducto generado durante los procesos de corte y limpieza del mármol, compuesto principalmente de carbonato de calcio; este material de desecho encuentra aplicaciones útiles en diversas industrias, como la estabilización de suelos y la fabricación de materiales de construcción, gracias a su capacidad para mejorar propiedades físicas y químicas (Neeladharan et al. 2018).

#### **3.2.1.2 Caracterización origen y composición de química del polvo de mármol**

El mármol se categoriza como una formación rocosa metamórfica compacta, que se origina de rocas calcáreas sometidas a temperaturas y presiones elevadas, lo cual genera un alto nivel de cristalización; su estructura básica corresponde al carbonato de calcio, representando más del 90% de su estructura; los elementos restantes, considerados como impurezas, son responsables de la amplia gama de colores que presentan los mármoles y establecen sus características físicas específicas (Olague et al. 2016).



Tabla 2 — Análisis químico por fluorescencia de rayos X.

Propiedades químicas del polvo de mármol	
Compuestos de oxido	Porcentaje de polvo de mármol por peso
SiO <sub>2</sub>	0.33%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08%
CaO	55.06%
MgO	0.36%
SiO <sub>3</sub>	0.16%
P x C	43.43%
FUENTE: COMACSA 2021.	

### 3.2.1.3 Teorías y modelos de estabilización con polvo de mármol

La adición de residuos de mármol posibilita modificar las propiedades de plasticidad del terreno, aprovechando la ventaja extra de emplear un desecho industrial; el impacto de este aditivo mineral es reducir el límite plástico del suelo en proporción a la cantidad de polvo de mármol añadido, lo que mejora su manejabilidad y resistencia mecánica; la disminución del índice plástico del suelo conlleva una reducción de su potencial expansivo, transformándolo en un suelo inactivo; además, este proceso de adición de mármol al suelo genera una modificación en sus propiedades plásticas, lo que puede resultar en un cambio en la clasificación del material; es posible evaluar estos cambios mediante los sistemas de clasificación de suelos más comunes, como el SUCS y el AASTHO (Olague et al. 2016).

## 3.2.2 Ceniza de *sugarcane* como estabilizador de suelos

### 3.2.2.1 Características de la *sugarcane*

#### a) Proceso de obtención

El bagazo es la materia fibrosa que queda después de extraer todo el jugo de la caña de azúcar (*sugarcane*) y se depositan como residuos y polución del entorno ambiental; estos desechos se emplean como

material combustible en las plantas de caña de azúcar para producir vapor que finalmente se convierte en ceniza (Mishra y Arora 2019).

### b) Composición química

En la inspección visual las cenizas de bagazo aparecieron de color negro; las propiedades químicas de la ceniza de bagazo se determinan y se expresan como (Ali, Khan y Shah 2014).

**Tabla 3 — Propiedades químicas de la ceniza de bagazo.**

<b>PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CENIZA DE BAGAZO.</b>		
S.N°	Elemento químico	Porcentaje por peso
1	SiO <sub>2</sub>	63.45
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.34
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.68
4	K <sub>2</sub> O	2.64
5	CaO	8.84
6	SO <sub>3</sub>	1
7	Mn	0.4
8	Cu	0.2
9	Zn	0.3
10	Na <sub>2</sub> O	1.77
11	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.23

FUENTE: Ali, Khan y Shah 2014.

### c) Caracterización como material puzolánico

Esta SBA constituye un excelente material puzolánico al poseer óxidos de sílice y aluminio, permitiendo su uso como estabilizador de terrenos salinos (Mishra y Arora 2019).

#### 3.2.2.2 Teorías y modelos de estabilización con ceniza de *sugarcane*

El suelo más disponible en la India es de tipo aluvial identificado como arcilla plástica intermedia (CI) bajo el sistema de clasificación estándar de la India fue tratado utilizando tres tipos de cenizas de desecho: RHA (ceniza de cáscara de arroz), SCBA (ceniza de bagazo de caña de azúcar) y CDA (ceniza de estiércol de vaca); se observó que al incrementar la proporción de estas cenizas de un 2,5% a un 12,5%, el índice de plasticidad



del suelo disminuyó significativamente; las reducciones específicas en el índice de plasticidad variaron de 13 a 24 para RHA, de 16,8 a 50 para SCBA, y de 13 a 52,4 para CDA; además, se determinó que las características de compactación dependían de la plasticidad del suelo; en suelos de plasticidad media, la adición de estabilizantes redujo la densidad seca máxima y aumentó el contenido de humedad óptimo, independientemente del tipo de estabilizador; en términos de capacidad de carga (CBR), tanto en condiciones empapadas como no empapadas, los valores mostraron un incremento inicial con el aumento en el contenido de cenizas hasta alcanzar un valor máximo, tras lo cual disminuyeron; el óptimo se logró con una composición de 92,5% de suelo y 7,5% de cenizas, donde el valor de CBR empapado aumentó en un 134%, 79,81% y 48,92% para suelos estabilizados con RHA, SCBA y CDA, respectivamente, en comparación con el suelo sin estabilizar (Yadav et al. 2017). Estos resultados destacan la eficacia de las cenizas como estabilizantes, promoviendo mejoras significativas en las propiedades mecánicas del suelo tratado.

### **3.2.2.3 Teorías y modelos de estabilización combinada**

Se investigó el efecto de los Residuos Industriales de Mármol (MIW) y la Ceniza de Bagazo (BA) sobre los límites de Atterberg, las características de compactación, los parámetros de hinchamiento y la resistencia a la compresión libre (a los 3, 7, 14 y 28 días) y se determinó el contenido óptimo para cada caso; dado que se requirió un estudio detallado para cada modificador para estudiar el efecto sobre el hinchamiento del suelo, no se hicieron comparaciones para comparar los estabilizadores MIW y BA; también reducen la plasticidad y mejoran la textura de los suelos expansivos; los suelos tratados con MIW muestran una reducción considerable (Shahzada et al. 2017).

La estabilización del suelo mediante el uso de desechos industriales como polvo de mármol y cenizas de bagazo está mejorando con éxito las malas propiedades del suelo expansivo; el polvo de mármol y las cenizas de bagazo se encuentran disponibles localmente en grandes cantidades, por lo que son una forma económica de estabilizar el suelo; el polvo de mármol y



las cenizas de bagazo se vierten directamente al río, lo que afecta la vida acuática y ya es una carga para nuestro medio ambiente natural. Por lo tanto, la mejor alternativa es utilizar estos desechos para mejorar el suelo expansivo local; la adición de 4%, 8% y 12% de polvo de mármol y ceniza de bagazo reduce los límites líquidos, los límites plásticos, el índice de plasticidad y el índice de expansión; por lo tanto, el aumento de polvo de mármol y ceniza de bagazo reduce las propiedades del índice del suelo expansivo; la adición de un 12% de polvo de mármol reduce la presión de elevación del suelo de 9,02 psi a 5,56 psi, mientras que un 12% de ceniza de bagazo reduce la presión de elevación del suelo de 9,02 psi a 4,72 psi, lo que demuestra que las cenizas de bagazo son más efectivas para disminuir la presión de elevación del suelo; el suelo también aumenta con la adición de polvo de mármol y ceniza de bagazo y permanece como máximo aproximadamente con una adición del 8%, pero nuevamente disminuye con la adición de un 12% de polvo de mármol y ceniza de bagazo (Ali, Khan y Shah 2014).

El polvo de mármol se mezcló con el suelo expansivo en diferentes proporciones (5%, 10%, 15%, 20% y 25%) según el peso seco del suelo; para lograr los objetivos de este estudio, se realizaron una serie de pruebas de laboratorio en suelo expansivo no tratado (UECS) y tratado (TECS) mediante la realización del análisis de tamiz, de acuerdo con ASTM D6913, 2017, límites de Atterberg, de acuerdo con ASTM D4318 10e1, 2010, características de compactación (densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo), de acuerdo con ASTM D698, 2003, resistencia a la compresión libre (UCS), de acuerdo con ASTM D2166, 2003, relación de carga de California (CBR), de acuerdo con ASTM D 1883, ensayos de hinchamiento unidimensionales, de acuerdo con ASTM D4546 (Abdelkader 2021).

### **3.2.3 Suelos arcillosos de subrasante**

#### **3.2.3.1 Definición y características de suelos arcillosos**

Los suelos arcillosos se caracterizan típicamente como aquellas partículas del suelo cuyas dimensiones no superan los 0,002 milímetros; no obstante, en ciertos contextos y clasificaciones, esta definición puede ampliarse para



incorporar también aquellas partículas cuyos tamaños se encuentran en el rango intermedio entre 0,002 y 0,005 milímetros (Das 2015). Así mismo, según (Lifeder 2022), la característica principal de los suelos arcillosos es su capacidad para absorber y retener agua, lo que resulta en un drenaje deficiente y una mala aireación del suelo. Además, poseen un comportamiento plástico cuando están húmedos, y al secarse tienden a formar terrones compactos.

### 3.2.3.2 Composición mineralógica

La composición mineralogía de los suelos arcillosos está compuesta en gran parte por minerales arcillosos, destacándose principalmente:

- **El grupo caolinítico:** Estas arcillas poseen una capa fina silíceo y una capa fina alumínica dispuestas continuamente, con enlaces que evitan el ingreso de agua, generando un estrato electrónicamente equilibrado; esto produce arcillas estables con mínima retención hídrica (Villalaz 2004).
- **El grupo montmorilonítico:** Se forma por la disposición de una capa fina de aluminio entre dos capas finas de sílice, con enlaces frágiles, lo que facilita la penetración de agua en su estructura; como consecuencia, estas arcillas experimentan una fuerte expansión al contacto con el agua, provocando inestabilidad (Villalaz 2004).
- **El grupo ilítico:** resultado de la hidratación de las micas, exhibe estructura similar a las arcillas montmoriloníticas, con tendencia a agregarse por iones de potasio; esto disminuye el área expuesta al agua, siendo menos expansivas (Villalaz 2004).

Según Gallardo, Martínez y Muñoz (2020) los suelos con considerable material arcilloso y elevada plasticidad muestran comportamiento específico que los predispone a problemas de baja resistencia al corte, cambios volumétricos excesivos y gran deformabilidad.

### 3.2.4 Ensayos índices

#### a) Contenido de humedad

El ensayo de laboratorio conocido como contenido de humedad se emplea para cuantificar el agua presente en una muestra de suelo, manifestándola como un



porcentaje de su masa; el método consiste en secar la muestra en un horno con temperatura regulada de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ; este procedimiento se mantiene hasta que el peso de la muestra se mantiene constante, indicando que toda el agua evaporable ha sido removida; en la práctica, se asume que tras un período de calentamiento de entre 12 y 18 horas (frecuentemente dejando la muestra en el horno durante la noche), se alcanza este estado de peso constante; en este punto, se registra el peso final, que corresponde a la suma del peso del suelo deshidratado y el del contenedor utilizado (Bowles 1981).



FUENTE: COOPERSCONSULT 2023.

**Figura 1 — Determinación del contenido de humedad.**

#### **b) Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico consiste en la separación de las partículas de suelo por rangos de tamaños, empleando mallas o tamices de aberturas cuadradas; a través de procesos de vibración se realiza la separación de las partículas en fracciones, que se pesan expresando el material retenido como porcentajes del peso total de la muestra y pese a que se considera físicamente inviable

establecer el tamaño preciso de cada partícula, el ensayo granulométrico permite clasificarlas por intervalos de tamaño. A nivel mundial se ha determinado el tamiz No. 200 (0.075mm) como límite divisorio para la clasificación de suelos: finos y gruesos (Botía 2015).

**Tabla 4 — Dimensiones y abertura para evaluación granulométrica.**

Tamices	Abertura (mm)	Peso ret. (g.)	% Ret.	% Ret. acumulado	% Que pasa
3"	75,000				
2"	50,800				
1 ½"	38,100				
1"	25,400				
¾"	19,000				
3/8"	9,500				
N° 4	4,760				
N° 10	2,000				
N° 20	0,840				
N° 40	0,425				
N° 60	0,260				
N° 140	0,106				
N° 200	0,075				
FONDO					

FUENTE: MTC 2013.

### c) Plasticidad de los suelos

Constituye la característica de consistencia que exhiben los suelos hasta determinado nivel de humedad sin desintegrarse, por consiguiente, el índice plástico de un suelo está condicionado exclusivamente por sus componentes finos y no por los elementos gruesos que posee (MTC 2014).

- **Limite líquido**

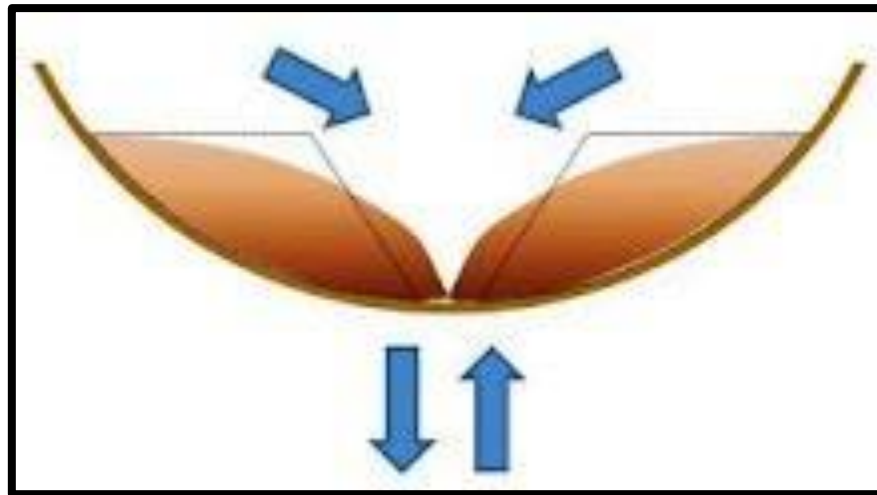
El límite de liquidez se establece como el porcentaje de contenido hídrico del terreno, por debajo del cual se manifiesta un comportamiento plástico, los especímenes de donde se extraiga el material de prueba, deben constituir especímenes representativos y su contenido hídrico natural debe preservarse hasta el instante previo al ensayo para establecer el límite de liquidez se



necesita material que atraviese la malla N°40 (425  $\mu$ m) en una proporción mínima de 150 g (Botía 2015).

Así mismo, según (Botía 2015) el método para determinar el límite de liquidez comprende lo siguiente:

- Después de haber preparado el material, se deposita una porción de este en el recipiente y se compacta y distribuye sobre el mismo, evitando formar burbujas de aire y que su valor máximo de profundidad sea aproximadamente 10 mm.
- Se opera el recipiente a un ritmo de aproximadamente 2 golpes por segundo, contabilizando el número de golpes requerido hasta que la hendidura se una a lo largo de 13mm. La hendidura debe cerrarse por flujo del material, pero no por el deslizamiento del suelo sobre el recipiente
- Se retira una porción del material existente en el recipiente, garantizando que provenga de ambos lados de la hendidura y se deposita en un contenedor de peso conocido y se cubre.
- El material restante se traslada al área de mezclado y mediante agua destilada se modifica su contenido hídrico según se requiera incrementar o reducir el número de golpes.
- Se limpia y lava tanto el acanalador como el recipiente y se efectúan dos intentos adicionales.
- Es indispensable que los valores de golpes se encuentren dentro de los rangos: 25-35, 20-30, 15-25.
- Se anota el valor del peso del contenedor más la muestra de material. Se somete a secado en el horno a una temperatura de  $\pm 110$  °C y una vez se obtengan valores de masa invariable se registra el peso del material seco más contenedor.



FUENTE: GEOSUPPORT 2013.

**Figura 2 — Desplazamiento y cierre del surco en Casagrande.**

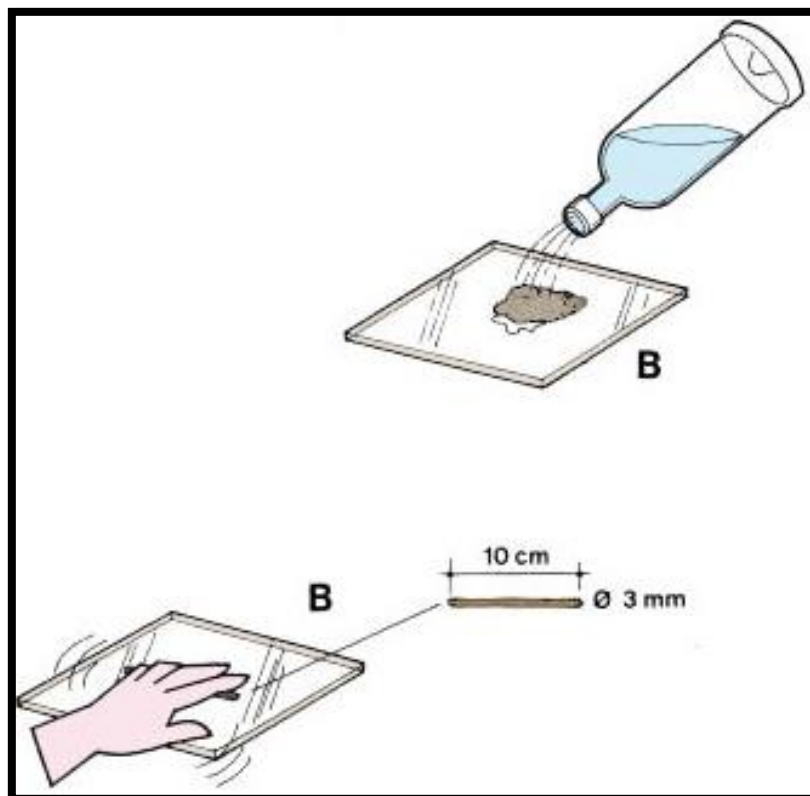
- **Límite plástico**

Atterberg estableció el límite plástico como el umbral divisorio que demarca la transición entre las condiciones plástica y semisólida del suelo (Botía 2015).

De manera concordante, según las especificaciones de (Botía 2015), la metodología para establecer el límite plástico comprende las siguientes etapas:

- Extraer una fracción de 1.5 – 2.0 g del espécimen seleccionado.
- Manipular la muestra con movimientos circulares sobre vidrio esmerilado, aplicando presión moderada para formar cilindros.
- Configurar un cilindro de diámetro uniforme hasta alcanzar aproximadamente 3.2 mm.
- Si al conseguir estas dimensiones no presenta fisuramiento ni desmoronamiento, el material posee humedad superior a su límite plástico. Se reagrupa el material en una esfera y se manipula para reducir su contenido hídrico.
- Se reitera el proceso previo hasta conseguir que cuando el material alcance el diámetro de 3.2 mm, se genere fisuramiento y fragmentación del cilindro.

- Se deposita en un contenedor de masa previamente determinada y se documenta el peso del espécimen más contenedor.



FUENTE: FAO 2017.

**Figura 3 — Límite plástico.**

- **Índice plasticidad**

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica y permite clasificar bastante bien un suelo, un IP grande corresponde a un suelo muy arcilloso; por el contrario, un IP pequeño es característico de un suelo poco arcilloso (MTC, 2014).

**Tabla 5 — Clasificación de suelos según índice de plasticidad.**

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

FUENTE: MTC 2014.

### 3.2.4.1 Clasificación de suelos

Los esquemas clasificatorios de suelos constituyen metodologías sistemáticas que dividen y organizan los materiales del suelo en categorías y subcategorías diferenciadas, fundamentándose en características geotécnicas compartidas y propiedades mecánicas específicas tales como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. En el ámbito de la ingeniería geotécnica contemporánea, existen dos esquemas clasificatorios fundamentales de aplicación generalizada: 1) el esquema desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y 2) el Sistema unificado de clasificación de suelos (Unified Soil Classification System, también denominado sistema de la ASTM). Es importante señalar que el esquema de la AASHTO se emplea primordialmente para la categorización y evaluación de los materiales constituyentes del pavimento de carreteras y vías de transporte, mientras que no se emplea de manera convencional en la edificación y diseño de cimentaciones estructurales (Das 2011).

#### a) Sistema de la AASHTO

El esquema de categorización de suelos de la AASHTO conforme a la configuración actual de este esquema, los suelos se pueden categorizar según ocho categorías fundamentales, A-1 a A-8, con fundamento en su granulometría, límite líquido e índice de plasticidad; los suelos catalogados en las categorías A-1, A-2 y A-3 son materiales de granulometría gruesa, y aquellos en las categorías A-4, A-5, A-6 y A-7 son materiales de granulometría fina; la turba, el fango y otros suelos con alto contenido orgánico se categorizan en la clasificación A-8 y se identifican mediante una evaluación visual (Das 2011).



**Tabla 6 — Clasificación de suelos – método AASHTO.**

Clasificación general	Suelos granulares							Materiales limo arcillosos				
	35% Máximo que pasa por el tamiz de 0.075 mm (Ni 200)							35% Máximo que pasa por el tamiz de 0.075 mm (No 200)				
Clasificación de grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Análisis granulométrico												
% que pasa por el tamiz de:												
2mm (No 10)	máx. 50											
0.425 mm (No 40)	máx. 30	máx. 50	máx. 51									
F: 0.0075mm (No 100)	máx. 15	máx. 25	máx. 10	máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 36	máx. 36	máx. 36	máx. 36	máx. 36
Características de la fracción que pasa el tamiz 0.425 (No 40)												
Características de la fracción que pasa el tamiz (Ni 40)												
LL: Limite líquido				máx. 40	máx. 41	máx. 40	máx. 41	máx. 40	máx. 41	máx. 40	máx. 41	máx. 41
IP: índice de plasticidad	máx. 6	máx. 6	NP	máx. 10	máx. 10	máx. 11	máx. 11	máx. 10	máx. 10	máx. 11	máx. 11(a)	máx. 11(b)
Tipo de material	Piedras, gravas y arenas		Arenas finas	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Estimación general del suelo como subrasante	Excelente a bueno						Regular a insuficiente					

FUENTE: MTC 2014.

**b) Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)**

Desarrollado por (Casagrande 1942) y modificado posteriormente por el organismo de ingenieros de los Estados Unidos para la edificación de aeropuertos; en la actualidad, este esquema se emplea con adaptaciones mínimas en la gran parte de las naciones fuera de los Estados Unidos; dentro de los Estados Unidos el esquema es extensamente empleado por entidades tales como el organismo de ingenieros, la Oficina de Reclamos, y con ligeras adaptaciones por la gran parte de las empresas.

DIVISIONES MAYORES	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN	
	SUCS	GRÁFICO		
SUELOS GRANULARES	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	GW		GRAVA BIEN GRADUADA
		GP		GRAVA MAL GRADUADA
		GM		GRAVA LIMOSA
		GC		GRAVA ARCILLOSA
	ARENA Y SUELOS ARENOSOS	SW		ARENA BIEN GRADUADA
		SP		ARENA MAL GRADUADA
		SM		ARENA LIMOSA
		SC		ARENA ARCILLOSA
SUELOS FINOS	LIMOS Y ARCILLAS (LL<50)	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		CL		ARCILLA INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		OL		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD
	LIMOS Y ARCILLAS (LL>50)	MH		LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD
		CH		ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD
		OH		LIMO INORGÁNICO O ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	PT		TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	

FUENTE: MVCS 2018.

Figura 4 — Sistema de clasificación unificado de suelos.



Así mismo, según (Bowles 2015), menciona que el sistema unificado de clasificación de suelos es el siguiente:

- **Gravas o arenas son:**

(GW, GP, SW o SP) cuando menos del 5% del material atraviesa el tamiz No. 200; G = grava; S = arena; W= adecuadamente graduada; P = deficientemente graduada. La denominación correctamente graduada o deficientemente graduada depende de dos parámetros distintivos para Cu y Cc.

- **Gravas y arenas son:**

(GM, GC, SM o SC) cuando más del 12 % del material atraviesa el tamiz No. 200; M = limo; C = arcilla. La denominación limo o arcilla se establece después de conseguir los parámetros de los límites líquido y plástico de la porción menor al tamiz No. 40, y empleando los parámetros de la carta de plasticidad. Esta tabla representa otra aportación de Casagrande al esquema, y la línea A que se localiza en él, se denomina como la línea A de Casagrande.

- **Las gravas y las arenas se pueden clasificar:**

GW – GC      SW – SC      GP – GC      SP – SC

GW – GM      SW – SM      GP – GM      SP – SM

cuando 5 y 12 % del material atraviesa el tamiz No. 200.

- **Los suelos de grano fino (más del 50% pasa el tamiz N°. 200) son:**

(ML, OL, o CL) cuando los límites líquidos son inferiores a 50%; M=limo; O = suelos orgánicos; C=arcilla.

- **Los suelos de grano fino son:**

(MH, OH, o CH)

cuando los límites líquidos son superiores a 50%; H = mayor que 50%. Los límites líquido y plástico se determinan sobre material correspondiente a la porción inferior al tamiz No. 40 de todos los materiales, incluyendo gravas, arenas, y suelos finos.

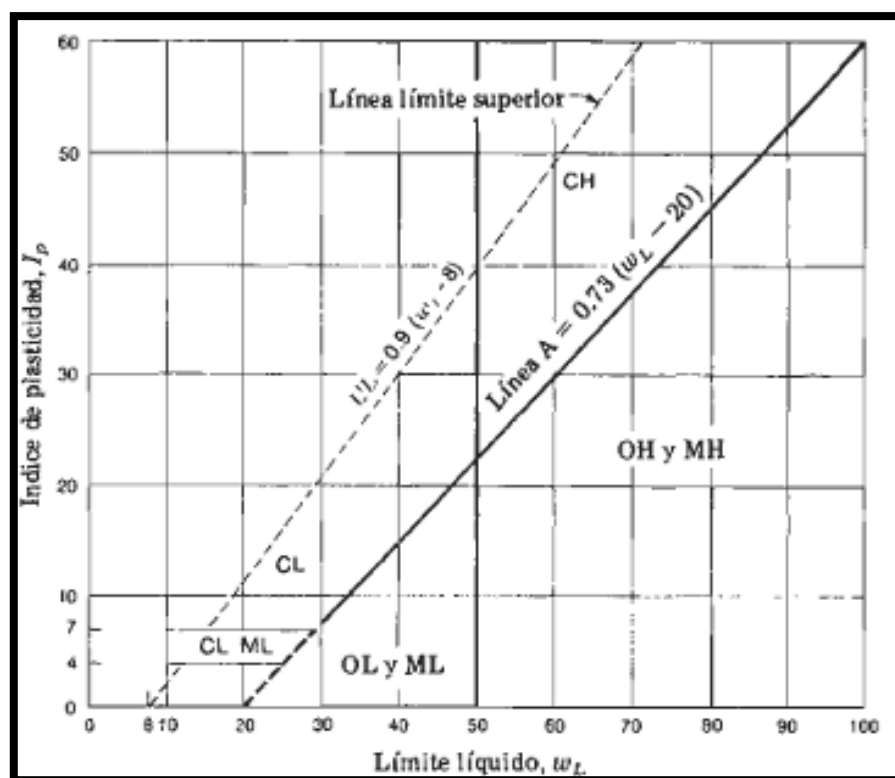


Tabla 7 — Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.).

Divisiones mayores		Símbolo de grupo	Nombres típicos		Criterios de Clasificación para suelos granulares		
Suelos de grano grueso (mas del 50% del material es mayor en tamaño que el tamiz N° 200)	Gravas (mas de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N° 4)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas gravosas, poco o ningún fino		Cu=D60/D10 >4 Cc= 1 < (D30)²/D10 x D10 <3		
		GP	Gravas pobremente graduadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino		No cumplir todos los requisitos de gradación para GW		
		GM	$\frac{d}{u}$	Gravas limosas, mezcla grava-arena-limo	Limites de Atterbeg por debajo de la "línea A" o IP < 4	Los materiales sobre la "línea A" con 4 < IP < 7 se considera se considera de frontera y se les asigna doble símbolo	
		GC		Gravas arcillosas, mezcla grava-arena-arcillas	Limites de Atterbeg por encima de la "línea A" o IP > 7		
	Arenas (mas del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz N° 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien graduadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino		Cu = D60/D10 >4 Cc = 1 < (D30)²/D10 x D60 < 3	
			SP	Arenas pobremente graduadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.		No cumplir todos los requisitos de gradación para SW	
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	$\frac{d}{u}$	Arenas limosas, mezcla de arena-limo	Limites de Atterbeg por debajo de la "línea A" o IP < 4	Los materiales sobre la "línea A" con 4 < IP < 7 se considera se considera de frontera y se les asigna doble símbolo
			SC		Arenas arcillosas, mezcla arena-arcilla	Limites de Atterbeg por encima de la "línea A" o IP > 7	
Suelos de grano fino (mas del 50% del material pasa por el tamiz N° 200)	Limos y arcillas (limite liquido LL<50)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillas, o limos arcillosos con poca plasticidad.		1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de granulometría . 2. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el matiz N°. 200 los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% = GW, GP,SW,SP Mas del 12% = GM, GC, SM,SC de 5 a 12% = casos de frontera que requieren doble signo.		
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcilla limosa, arcillas magras.				
		OL	Limos inorgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad				
	Limos y arcillas (limite liquido LL>50)	MH	Limos inorgánicas, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos.				
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas				
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos				
	Suelos altamente orgánicos	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

FUENTE: (Bowles 1981).





FUENTE: Bowles 1981.

Figura 5 — Carta de plasticidad de clasificación de suelos.

### 3.2.4.2 Ensayos mecánicos

#### a) Proctor Modificado

El procedimiento artificial mediante el cual las partículas de un material del suelo son forzadas a permanecer más próximas y por consiguiente más en contacto unas de otras, generando una disminución en su relación de vacíos se le ha denominado compactación; el procedimiento de compactación en los materiales del suelo genera un incremento notable en sus características geotécnicas, en el aumento de su resistencia al corte, la reducción en su deformabilidad sin incremento en su peso específico seco y mejoramiento de su condición de permeabilidad; es relevante destacar que los métodos empleados para la compactación varían dependiendo las características de los materiales del suelo a compactar, existiendo entonces gran variedad de equipos disponibles en la industria para tal fin (Botía 2015).



FUENTE: ABC GEOTECHNICAL CONSULTING 2006.

**Figura 6 — Herramientas para realizar el Proctor modificado.**

**Tabla 8 — Requerimientos para el ensayo Proctor modificado.**

Concepto	Método "A"	Método "B"	Método "C"
Diámetro de molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen de molde	944 cm <sup>3</sup>	945 cm <sup>3</sup>	2124 cm <sup>3</sup>
Masa del pisón	4.54 kg	4.54 kg	4.54 kg
Altura de caída del pisón	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
N° de golpes del pisón por capa	25	25	56
N° de capas de compactación	5	5	5
Energía de comparación	2700 kN*m/m <sup>3</sup>	2701 kN*m/m <sup>3</sup>	2702 kN*m/m <sup>3</sup>
Compactación de suelo para usarse	Fracción que atraviesa la malla N° 4 (4.75 mm). Puede emplearse el 20% o inferior en peso de material se retiene en la malla N° 4.	Fracción que atraviesa la malla de 9.5 mm. Puede emplearse si suelo retenido en la malla N° 4 es más que 20%, y 20% o inferior en peso se retiene en la malla de 9.5 mm.	Fracción que atraviesa malla de 19.0 mm (4.3"). Se emplea si >20% se retiene en malla 9.5 mm y <30% en malla 19.0 mm.

FUENTE: Das 2011.



Así mismo, Bowles (1981) indica que en forma de ecuación esto es:

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

El índice de CBR se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de los suelos principalmente con fines de aplicación con base y subrasante bajo pavimentos de carretera y aeropista (Bowles 1981).

**Tabla 9 — Categorías de subrasante.**

Nº. CBR	Clasificación general	Usos	Sistema unificado de clasificación	
			SUCS	AASHTO
0 - 3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3 - 7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7 - 20	Regular	Sub - base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Base, sub - base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

FUENTE: Bowles 1981.

### 3.2.5 Caracterización de la subrasante

Para evaluar las características físico-mecánicas de los materiales de la sub rasante, se realizarán estudios mediante la excavación de pozos exploratorios o calicatas con una profundidad mínima de 1.5 m. (MTC 2014).



### **Estabilización de suelos**

La estabilización de suelos es un proceso que busca mejorar las características físicas del terreno a través de métodos mecánicos y la incorporación de aditivos químicos, ya sean naturales o artificiales. Estas técnicas se implementan principalmente en terrenos de cimentación que no cumplen con las condiciones técnicas requeridas. Dependiendo del tipo de suelo, se pueden emplear diferentes métodos conocidos como estabilización con cemento, cal, asfalto y otras alternativas que varían según el aditivo seleccionado. Cuando el propósito es mejorar una capa granular o base granular para incrementar su calidad, el método se llama tratamiento de subbase o base granular, especificando el aditivo utilizado cemento, cal, asfalto, etc. (MTC 2014).

#### **3.2.5.1 Criterios geotécnicos para establecer la estabilización de suelos**

De acuerdo con MTC (2014), se pueden identificar diversos parámetros para determinar la necesidad de estabilización de suelos:

- Se considerarán aptos para la sub rasante aquellos materiales cuyo índice CBR sea igual o mayor al 6%.
- Cuando la sub rasante esté compuesta por arcillas o limos susceptibles de penetrar y contaminar las capas granulares superiores al humedecerse, será necesario incorporar una capa protectora anticontaminante de 10 cm de espesor.
- La distancia mínima entre la superficie de la sub rasante y el nivel freático variará según la calidad del suelo: 0.60 m para sub rasantes excepcionales y óptimas, 0.80 m para aquellas de calidad buena y media, 1.00 m para las de capacidad limitada, y 1.20 m para las inadecuadas. En caso de no cumplirse estas condiciones, se recurrirá a la instalación de sistemas de drenaje, capas protectoras o a la elevación de la rasante según sea necesario.
- En zonas ubicadas por encima de los 4,000 metros sobre el nivel del mar, es necesario analizar los efectos que produce el congelamiento en el suelo, ya que este proceso está directamente relacionado con la cercanía del agua subterránea y la susceptibilidad del terreno al hielo.



- La selección del método de estabilización más apropiado requiere una caracterización previa del suelo existente; en este ámbito, predominan los suelos limosos, arcillosos, o las combinaciones arenosas con presencia de limo o arcilla.

### 3.3 Marco conceptual

#### a) CBR

La relación de Soporte de California (CBR) evalúa la resistencia potencial de sub rasante, sub base y material de base del suelo donde se tiene proyectada la construcción de vías de pavimento, (Eugenio y Ventura 2021).

#### b) Ceniza de *sugarcane*

Es un residuo agroindustrial sólido resultante de la quema del bagazo en calderas para cogeneración de energía, llama la atención por su alta disponibilidad (Figueredo y Pavía 2020).

#### c) Contenido de humedad

El contenido de humedad es una característica que indica la cantidad de agua presente en un material y su importancia radica en que cuando se especifica la densidad de la masa empleada (Martines y Lira 2010).

#### d) Contenido de Humedad Óptimo

Representa la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance su máxima compactación al peso unitario seco más alto mediante un esfuerzo de compactación modificado (ASTM D1557-00 2000).

#### e) Densidad seca máxima

Se refiere a la mayor densidad que es posible obtener en un suelo cuando es compactado con la humedad óptima (Gabriel 2020).

#### f) Polvo de mármol

El polvo de mármol tiene un alto contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que se puede agregar a los morteros y hormigones a base de cemento Portland para aumentar la vida útil, funcionando como relleno de poros (Singh et al. 2017).



**g) Suelos arcillosos**

Los suelos arcillosos se definen como materiales cohesivos compuestos principalmente por partículas minerales de tamaño inferior a 0,002 mm, que presentan estructura laminar y propiedades plásticas cuando contienen humedad. Están formados por minerales arcillosos como caolinita, illita y montmorillonita, que influyen directamente en su comportamiento geotécnico (Das 2015).

**h) Estabilización de suelos**

La estabilización de suelos es un proceso que consiste en modificar las características físicas, químicas o biológicas de un suelo para mejorar su comportamiento y su resistencia (CONARSAC 2023).

**i) Límite líquido:**

El límite líquido se define como un porcentaje de contenido de humedad que indica la transición entre los estados líquido y plástico del suelo (GIG 2023).

**j) Límite plástico**

El límite plástico se define como un porcentaje de contenido de humedad que indica la transición entre los estados plástico y semi-sólido del suelo (GIG 2023).

**k) Índice de plasticidad**

El índice plástico es una medida que indica la plasticidad de un suelo, calculada como la diferencia entre el LL y el límite plástico (Studysmarter GmbH 2024).

**l) Propiedades físicas del suelo**

Las propiedades físicas más importantes de un suelo son aquellas que nos permiten caracterizar su composición, estructura y comportamiento físico, como la granulometría, los límites de consistencia, la densidad, la permeabilidad y la plasticidad, las cuales determinan la respuesta del suelo ante diferentes condiciones de carga y humedad. (Lambe y Whitman 1979).

**m) Propiedades mecánicas de suelos**

Las propiedades mecánicas más importantes de un suelo son aquellas que nos permiten establecer leyes de resistencia y de comportamiento, como la cohesión, el ángulo de fricción interna y su capacidad expansiva (González y Pérez 2024).



## CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

### 4.1 Tipo y nivel de investigación

La Este trabajo se clasifica como una investigación de naturaleza aplicada, puesto que (Hernández, Fernández y Baptista 2014), establecen que este tipo de estudio tiene como finalidad la generación de conocimientos con una orientación práctica, dirigido hacia la resolución de problemáticas específicas y hacia la creación de tecnologías o metodologías de utilidad en el ámbito práctico. Es así que se enfocó en encontrar soluciones prácticas a problemas reales, en este caso, optimizar las características de los terrenos arcillosos con el fin de que resulten más apropiados como material de subrasante en la edificación de vías, mediante el empleo de desechos como las cenizas de carbón y el polvo de mármol, se buscó aprovechar materiales de desecho y de esta manera poder reducir el impacto ambiental que pueden generar esos residuos.

Respecto al nivel investigativo, este trabajo posee naturaleza descriptiva, ya que según (Cabezas et al. 2018), esta clase de investigación se enfoca en describir y especificar fenómenos brindando información acerca de sus atributos principales sin establecer relaciones de causalidad. En el presente trabajo se caracterizan los efectos de diferentes dosificaciones de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en suelos arcillosos, determinando sus principales propiedades físicas y mecánicas sin analizar los mecanismos causales internos.

### 4.2 Diseño de investigación

Este estudio se basa en un diseño experimental puro, puesto que según (Martínez 2012), esta configuración conlleva el manejo intencional y sistemático de las variables independientes en condiciones estrictamente controladas, con el propósito de analizar sus efectos sobre las variables dependientes, asegurando así la validez interna y confiabilidad de los resultados obtenidos, en este estudio se manipularon específicamente las proporciones y combinaciones de los materiales estabilizadores aplicados a los suelos arcillosos (variables independientes), mediante procedimientos estandarizados de



laboratorio que permitieron el control preciso de las condiciones experimentales, los ensayos fueron realizados siguiendo protocolos normalizados de geotecnia, lo que permitió cuantificar con exactitud las modificaciones en las propiedades mecánicas del suelo tratado (variables dependientes), estableciendo relaciones causales verificables entre la dosificación aplicada y el grado de estabilización alcanzado, este enfoque experimental permitió no solo identificar la existencia de efectos estabilizadores, sino también determinar su magnitud y significancia estadística bajo diferentes condiciones de tratamiento.

### 4.3 Descripción ética de la investigación

A nivel internacional, la ética en ingeniería civil se fundamenta en los principios de la World Federation of Engineering Organizations, organización internacional no gubernamental que representa a la profesión de ingeniería a nivel mundial desde 1968, agrupando organizaciones de ingeniería de más de 90 naciones (WFEO 2023). Asimismo, el Código de Ética de la American Society of Civil Engineers establece en su Canon 1 que "los ingenieros deben mantener como primordial la seguridad, salud y bienestar del público y deben esforzarse por cumplir con los principios del desarrollo sostenible en el desempeño de sus deberes profesionales" (ASCE 2020).

A nivel nacional, las regulaciones técnicas relacionadas con la estabilización de suelos determinan que las técnicas empleadas deben enfocarse en optimizar las características físico-mecánicas de los suelos destinados a subrasante, fomentando el uso de materiales novedosos y ecológicamente responsables que favorezcan el desarrollo de una economía sustentable, reduzcan el impacto medioambiental y ofrezcan solidez y perdurabilidad a las estructuras del pavimento (MTC 2013).

La investigación se desarrolló en estricto cumplimiento del Código de Ética para la Investigación del Vicerrectorado de Investigación de la UNAMBA (Resolución N° 010-2018-VRINV-UNAMBA), observando el rigor científico y la transparencia en todo el proceso. Se respetaron los principios de integridad académica mediante la adecuada citación de fuentes según la normativa ISO 690, preservando así la propiedad intelectual. Asimismo, se garantizó la autenticidad y autonomía del trabajo a través de la verificación de originalidad con el sistema Turnitin.



## 4.4 Población y muestra

### 4.4.1 Población

Según (Hernández, Fernández y Baptista 2014), el universo de estudio en una investigación hace referencia al total de elementos que poseen características similares sobre los cuales se desea realizar inferencias. En el presente trabajo, el universo está constituido por los terrenos arcillosos de la subrasante del tramo de la carretera Tarampampa, Abancay, los cuales serán evaluados para determinar el impacto de la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en su estabilización, la población total abarca aproximadamente 1.25 km de vía, con una extensión de 5,000.00 metros cuadrados de subrasante, donde se identifican sectores críticos con problemas de estabilidad.

### 4.4.2 Muestra

Según (Hernández, Fernández y Baptista 2014) la muestra constituye una fracción del universo de interés sobre la cual se recopilarán datos, y que requiere ser definida y delimitada previamente con exactitud, además de que debe ser representativa del universo de estudio.

Para el desarrollo de esta investigación, se empleó el muestreo no probabilístico debido a que este tipo de selección se realiza mediante un procedimiento no aleatorio, lo que facilita la selección según criterios particulares del estudio. Este tipo de muestras, denominadas también dirigidas, emplean un proceso de selección informal y son frecuentemente utilizadas en estudios cuantitativos y cualitativos (Hernández, Fernández y Baptista 2006).

**Tabla 10 — Total de muestras testeadas.**

Ensayos	Suelo natural	CCA	PM	CCA	PM	CCA	PM	Total
		5%	5%	7.5%	7.5%	10.0%	10.0%	
<b>Propiedades físicas</b>								
Contenido de humedad natural	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
Análisis granulométrico	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
Límites de Atterberg	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	12.00
<b>Propiedades mecánicas</b>								
Proctor Modificado	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	12.00
CBR	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	12.00
								42

## 4.5 Procedimiento

El procedimiento para la estabilización de suelos arcillosos de la carretera Tarampampa inicia con una investigación bibliográfica y delimitación del área, seguido por la extracción, transporte y conservación de muestras representativas. Posteriormente, se caracteriza el suelo natural mediante ensayos de contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR para establecer parámetros base. Se acopian los aditivos estabilizantes (ceniza de bagazo de caña y polvo de mármol) y se preparan mezclas homogéneas con diferentes porcentajes (5%, 7.5% y 10%) de cada aditivo. Estas mezclas son sometidas a ensayos de laboratorio para determinar sus límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR, cuyos resultados son comparados directamente con el suelo patrón para evaluar mejoras en CBR, densidad y humedad óptima, culminando con conclusiones técnicas sobre la efectividad de los aditivos para la estabilización de la subrasante.

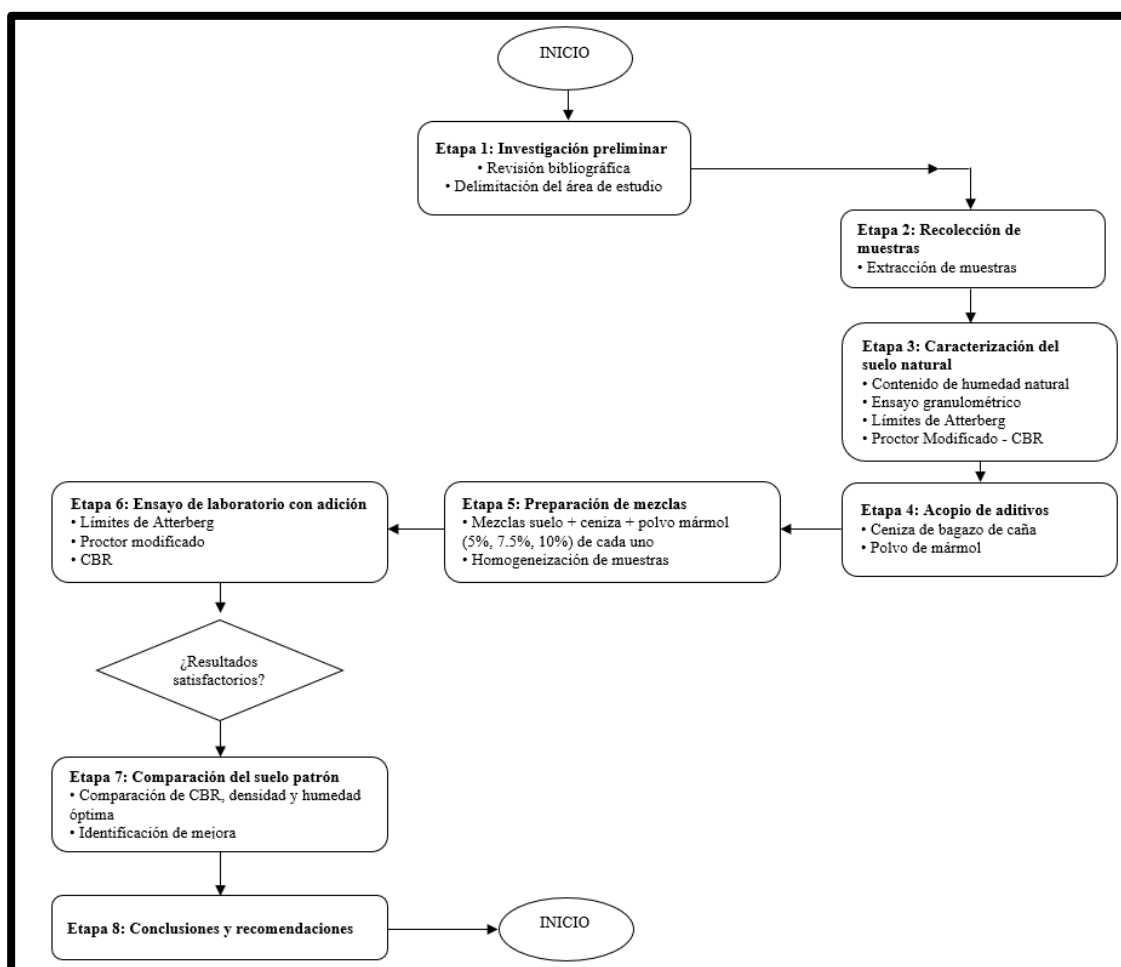


Figura 8 — Flujograma de procedimiento de investigación.

## 4.6 Técnicas e instrumentos

### 4.6.1 Técnicas

Para este estudio se identificó la observación como técnica principal, complementada con ensayos de laboratorio especializados para suelos.

La técnica de observación, según (Hernández y Mendoza 2018), consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables, a través de un conjunto de categorías y subcategorías". En este estudio, se implementó específicamente la observación visual directa, permitiendo registrar detalladamente los cambios físicos en el suelo durante las fases de preparación, mezcla y ejecución de los diversos ensayos.

En cuanto a las técnicas de laboratorio, estas se aplicaron para evaluar la interacción entre las variables independientes (polvo de mármol y ceniza de *sugarcane*) y las variables dependientes (propiedades de los suelos arcillosos). Los ensayos realizados incluyeron: determinación del contenido de humedad, análisis granulométrico, límites de Atterberg, Proctor modificado y California Bearing Ratio (CBR), permitiendo cuantificar científicamente cómo los aditivos estudiados modifican las propiedades mecánicas y físicas de los suelos arcillosos.

### 4.6.2 Instrumentos

La investigación garantizó la precisión de los hallazgos mediante la implementación de documentación estructurada, rigurosamente validada por evaluación especializada (según valoración del test de expertos), alcanzando coeficientes elevados de fiabilidad. Estos formatos facilitaron la captura sistemática de información crucial durante el proceso experimental.

#### **Formatos manuales**

- a) Formato de instrumento: Contenido de humedad elaborado en base a la norma MTC E 108/ASTM D2216
- b) Formato de instrumento: Análisis granulométrico elaborado en base a la norma MTC E-107/ASTM D422
- c) Formato de instrumento: Límites de Atterberg elaborado en base a la norma MTC E-110/111/ASTM D4318



- d) Formato de instrumento: Proctor modificado elaborado en base a la norma MTC E-115/ASTM D1557
- e) Formato de instrumento: CBR elaborado en base a la norma MTC E-132/ASTM D1883

**Tabla 11 — Validadores instrumentales.**

Nº	Experto	Especialidad	Grado Académico	Veredicto
1	Erick Alarcón Camacho	Ingeniero Civil	Doctor	Es aplicable
2	Jinner Bravo Apaza	Ingeniero Civil	Magister	Es aplicable
3	Américo Huachaca Barazorda	Ingeniero Civil	Magister	Es aplicable
4	Jhon Fuentes Huamán	Metodólogo	Magister	Es aplicable
5	Wilson John Mollocondo Flores	Estadístico	Doctor	Es aplicable

El análisis estadístico aplicado a los instrumentos de medición y su correspondiente evaluación métrica (detallada en el anexo 4) arrojó un índice de confiabilidad interna mediante el coeficiente Alfa de Cronbach equivalente a 0.886, lo cual, según los parámetros establecidos, representa un nivel de validez catalogado como buena. Este resultado confirma la solidez metodológica y ratifica la legitimidad científica de los instrumentos empleados en este estudio.

#### 4.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico es fundamental para analizar datos recolectados en estudios científicos, permitiendo organizar, resumir y tomar decisiones basadas en evidencia (Hernández y Mendoza 2018). Se divide en:

- Estadística descriptiva
- Estadística Inferencial

##### 4.7.1 Estadística descriptiva

Según (Córdova 2003) la estadística descriptiva el propósito es describir las características principales de un conjunto de datos sin sacar conclusiones más allá de los datos mismos; así mismo, indica que utilizando esta estadística se puede hacer resumen datos mediante medidas de tendencia central y de dispersión.



#### a) Conceptos elementales

- **Media**

La media constituye una medida de tendencia central que se obtiene mediante la suma de todos los valores de un grupo de datos dividida entre el número total de elementos; representa un concepto básico en estadística, empleado frecuentemente en el análisis de información y conocido habitualmente como la media. (Triola 2004).

- **Medidas de dispersión**

Las medidas de dispersión representan valores numéricos que indican cuán alejados están los datos de un punto de referencia, el cual generalmente corresponde a la media aritmética; estos indicadores contribuyen a entender la variabilidad presente en el conjunto de información, (Córdova 2003). Así mismo, las principales medidas de dispersión incluyen la varianza, la desviación típica, la desviación promedio, junto con otros parámetros como las frecuencias, los momentos y los rangos.

- **La varianza ( $S^2$ )**

La varianza se define como una medida estadística que representa el promedio de los cuadrados de las diferencias entre cada dato y su media aritmética; esta métrica determina el nivel de variabilidad de los valores en una distribución, mostrando si los datos se concentran próximos a la media o se distribuyen alrededor de ella. (Córdova 2003). La intención de la estadística descriptiva es obtener datos de la muestra para generalizarla a la población de estudio. Al respecto (Navidi 2006), nos dice que la idea básica que yace en todos los métodos estadísticos de análisis de datos es inferir respecto de una población por medio del estudio de una muestra relativamente pequeña elegida de ésta.

#### 4.7.2 Estadística inferencial

Esta estadística nos hace predicciones sobre una población a partir de una muestra de datos. Así mismo, permite hacer inferencias sobre una población a partir de una muestra (Hernández y Mendoza 2018).

En esta investigación se aplicó estadística inferencial para evaluar el efecto de la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en la estabilización de suelos arcillosos. Este enfoque cuantitativo permitió analizar la relación entre variables a través de pruebas estadísticas, determinando si las diferencias observadas en las propiedades físicas y mecánicas del suelo son estadísticamente significativas.

#### a) Conceptos elementales

- **Normalidad**

El test de normalidad según (Romero 2016) señala que estos análisis permiten identificar el tipo de distribución de los datos y, consecuentemente, qué pruebas (paramétricas o no paramétricas) aplicar en el análisis estadístico.

Para (Romero 2016), indica que para establecer la normalidad de los datos se empleará el test de Shapiro-Wilk con muestras menores a 50 observaciones. En muestras de mayor tamaño, se aplicará la prueba de Kolmogórov-Smirnov. Si los datos muestran una distribución normal, se considerarán como paramétricos y se realizará un análisis ANOVA. De lo contrario, se utilizará una prueba no paramétrica, específicamente la prueba de Kruskal-Wallis.

Además, se utilizó el programa SPSS para analizar los resultados de las pruebas estadísticas inferenciales. La inferencia estadística, mediante este software, se aplicará en:

- La hipótesis general
- Las hipótesis específicas
- Los resultados de las tablas
- Pasos para realizar las pruebas de hipótesis

- **Prueba de Hipótesis**

El contraste de hipótesis puede definirse, conforme a (Elorza 2000), como una: Metodología estandarizada para verificar o evaluar hipótesis estadísticas que consiste en: establecer el nivel de significancia  $\alpha$  (que representa la probabilidad de rechazar incorrectamente la hipótesis nula  $H_0$ ) con el valor más reducido factible; posteriormente, en función de la hipótesis alternativa  $H_1$ , determinar una zona crítica de rechazo de tal



manera que la probabilidad de obtener un valor muestral dentro de dicha zona sea equivalente o inferior al nivel  $\alpha$  establecido, considerando que la hipótesis nula  $H_0$  sea verdadera.

#### 4.7.3 Pasos para ejecutar las pruebas de hipótesis

##### a) Paso 01. Plantear la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_a$ )

- **Hipótesis nula.** Afirmación o enunciado acerca del valor de un parámetro poblacional.
- **Hipótesis alternativa.** Afirmación que se aceptará si los datos muestrales proporcionan amplia evidencia que la hipótesis nula es rechazada.

##### b) Paso 02. Seleccionar el nivel de significancia

En Ingeniería, generalmente se selecciona el nivel de significancia de 0.05 para proyectos de investigación y análisis técnicos, lo que corresponde a un nivel de confianza del 95%, siendo este el estándar más utilizado en la práctica profesional de la ingeniería.

##### c) Paso 03. Calcular el valor estadístico de la prueba

En la tesis se aplicó la prueba ANOVA por las siguientes razones:

- **Comparación entre múltiples grupos:** Se evalúan diferentes dosificaciones de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* (0%, 5%, 7.5% y 10%) en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, lo que requiere comparar más de dos grupos.
- **Variables cuantitativas y paramétricas:** Los parámetros como el CBR, límite líquido, índice de plasticidad, etc., son continuos y numéricos, y se verificó que cumplen con normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk.
- **Diseño experimental:** Se manipuló una variable independiente (porcentaje de adición) para observar su efecto sobre variables dependientes, lo cual encaja con el enfoque de ANOVA.
- **Homogeneidad de varianzas esperada:** Se asumió que las varianzas de los grupos son homogéneas, premisa importante para aplicar ANOVA y válida dada la naturaleza controlada del experimento.

Así mismo, en investigación se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para contrastar las hipótesis de trabajo y evaluar la relación entre las variables



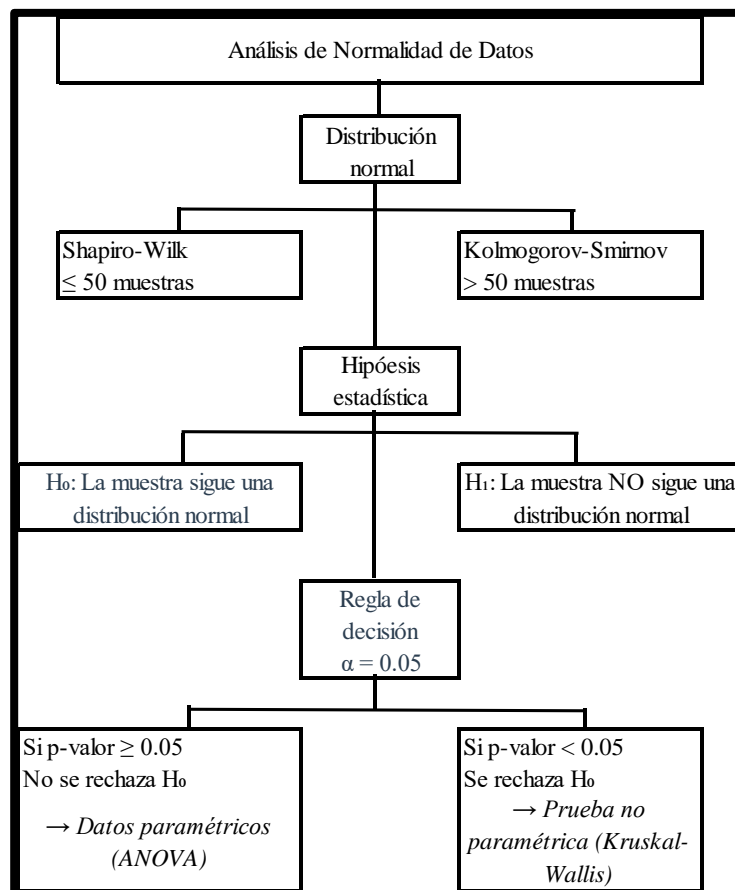
estudiadas. ANOVA es una técnica estadística que permite determinar si existen diferencias significativas entre los grupos en función de una variable independiente, evaluando la influencia de la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso.

**d) Paso 04. Formular la regla de decisión**

Una norma de decisión constituye la declaración de los criterios conforme a los cuales se acepta o rechaza la hipótesis nula. La zona de rechazo establece la localización de todos los valores excesivamente altos o bajos, siendo muy baja la probabilidad de que se presenten cuando la hipótesis nula es correcta.

**e) Paso 05. Tomar una decisión**

Se contrasta el valor obtenido del estadístico muestral con el valor crítico del estadístico de contraste. Posteriormente se acepta o rechaza la hipótesis nula. Al rechazarla, se acepta la alternativa.



FUENTE: Romero, 2016.

**Figura 9 — Esquema de criterios de una distribución normal.**



## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 Resultados

Se procederá a presentar el análisis de los resultados obtenidos en relación con el objetivo general y los objetivos específicos establecidos en la investigación.

##### 5.1.1 Resultados del objetivo general

El objetivo general de la investigación es determinar la influencia de la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.

Los resultados de la investigación confirman que la adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* ejerce una influencia altamente positiva y significativa en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay, manifestándose esta influencia a través de mejoras sustanciales en las propiedades físicas del suelo mediante la reducción del índice de plasticidad (transformando materiales de plasticidad media-baja en suelos más estables), la modificación favorable de los parámetros de compactación con incrementos del óptimo contenido de humedad y reducciones controladas de la densidad seca máxima, debido a reacciones químicas de cementación, así como en las propiedades mecánicas a través del incremento extraordinario de la capacidad portante donde los valores de CBR se elevaron de rangos inadecuados (2-10%) a rangos excelentes (53-90% al 100% de compactación), transformando suelos no aptos para subrasante en materiales de calidad superior incluso para bases granulares, siendo la dosificación óptima de 7.5% de polvo de mármol más 7.5% de ceniza de *sugarcane* la que logra el mejor balance entre estabilidad física y capacidad mecánica mediante la acción sinérgica de ambos materiales donde el carbonato de calcio actúa como agente cementante y la ceniza aporta propiedades puzolánicas, generando reacciones químicas que crean enlaces permanentes en la matriz del suelo y estableciendo esta técnica como una alternativa técnicamente



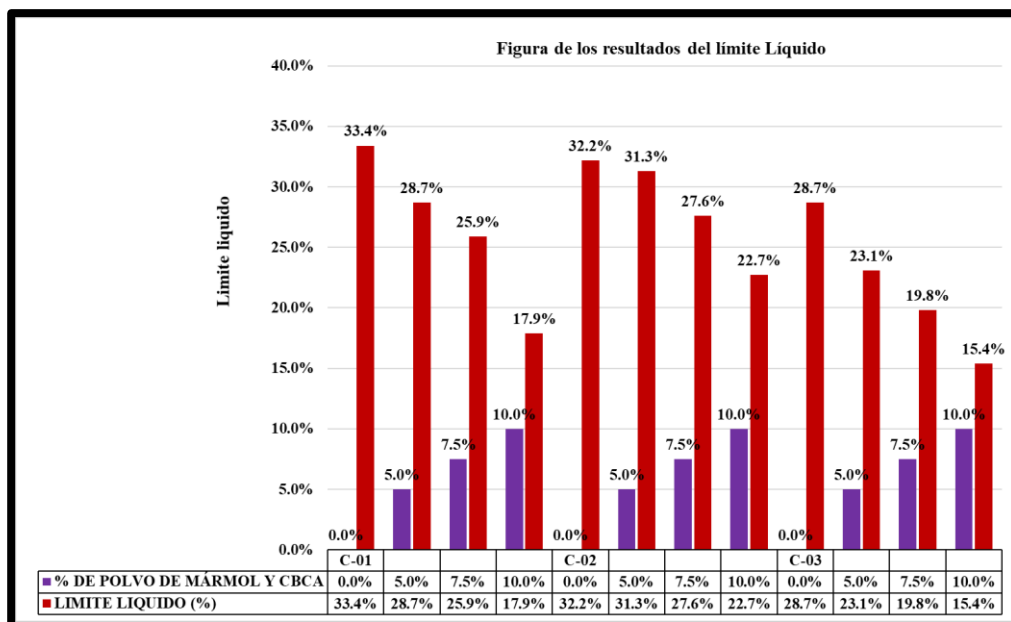
viable y altamente efectiva para el mejoramiento de subrasantes en la zona de estudio.

### 5.1.2 Resultados del objetivo específico N° 01

El objetivo específico 1 consistió en determinar la influencia en las propiedades físicas de un suelo arcilloso al adicionar polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* para estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024; y está dada de la siguiente manera.

- **Determinación del Límite líquido (LL)**

En la figura 10 se muestran los resultados de las pruebas relacionadas al límite líquido incorporando en idénticas proporciones de 0%, 5%, 7.5% y 10% de polvo de mármol y 0.00%, 5.00%, 7.50% y 10% de ceniza de *sugarcane* de las muestras extraídas en cada una de las excavaciones ejecutado conforme a lo establecido en la normativa (MTC E – 110).



**Figura 10 — Resultados del ensayo de límite líquido.**

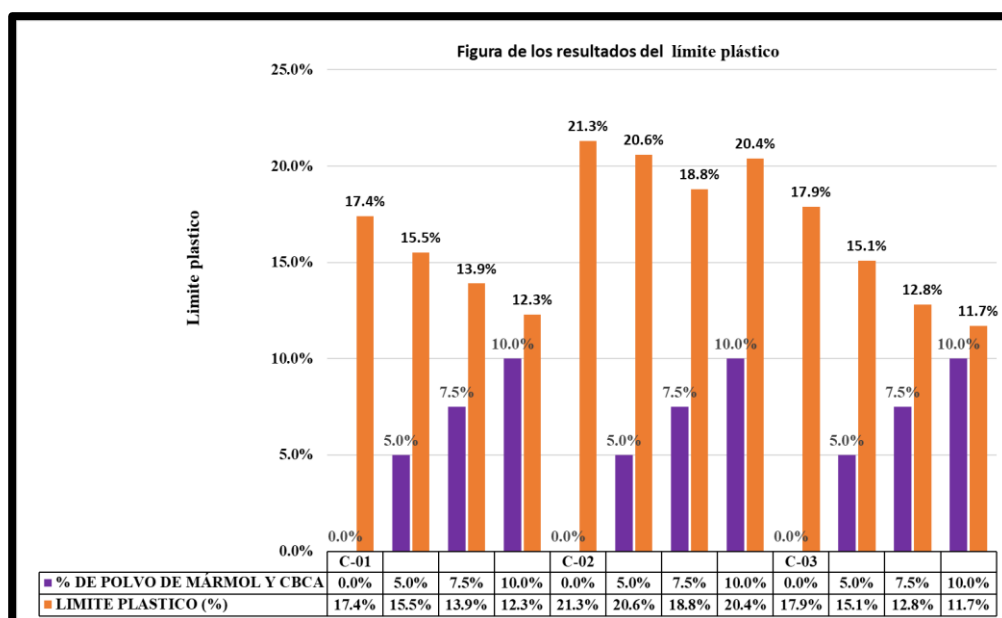
Los resultados del suelo natural del límite líquido obtenidos en las tres calicatas muestran valores iniciales de 33.4%, 32.2% y 28.7% para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, clasificándose como suelos de plasticidad baja a media. La incorporación simultánea de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en cantidades equivalentes (5%, 7.5% y 10% de cada material) evidencia una disminución progresiva y significativa del límite líquido en todas las muestras,



logrando disminuciones notables que van dependiendo del porcentaje de adición y la calicata evaluada, siendo la mayor reducción observada en C-01 con la combinación del 10% (polvo de mármol + ceniza de *sugarcane*) donde el límite líquido disminuyó de 33.4% a 17.9% y en la C-2 disminuyó de 32.2% a 22.7% y en la C-3 disminuyó de 28.7% a 15.4%, evidenciando que la acción combinada de estos materiales calcáreos y puzolánicos actúa sinérgicamente como agente estabilizador que optimiza considerablemente las características geotécnicas del terreno al reducir su plasticidad de forma más eficiente que empleándolos individualmente, propiciando la creación de una estructura más sólida y menos vulnerable a modificaciones volumétricas por cambios de humedad, perfeccionando notablemente el desempeño mecánico del suelo para usos geotécnicos..

- **Determinación del límite plástico (LP)**

En la tabla se exhiben los resultados de las pruebas relacionadas al límite plástico incorporando en idénticas proporciones de 0%, 5%, 7.5% y 10% de polvo de mármol y 0%, 5%, 7.5% y 10% de ceniza de *sugarcane* de las muestras extraídas en cada una de las excavaciones ejecutado conforme a lo establecido en la normativa (MTC E – 111).



**Figura 11 — Resultados de los ensayos de límite plástico.**

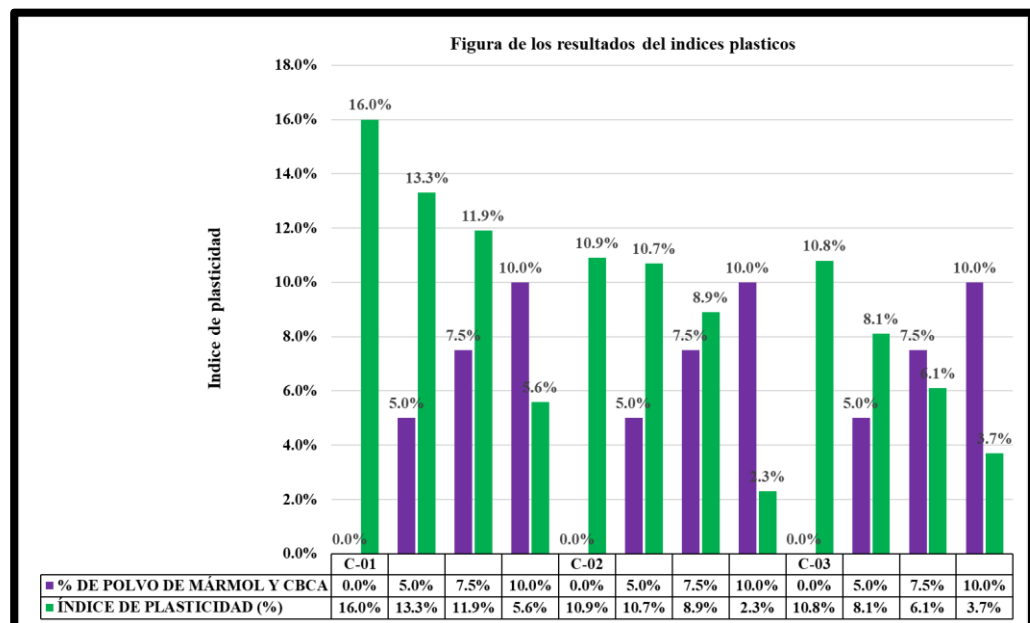
Los resultados del límite plástico muestran valores iniciales de 17.4%, 21.3% y 17.9% para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, donde C-02 presenta la mayor



plasticidad inicial. La adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* produce una reducción sistemática del límite plástico en todas las muestras, con disminuciones que van desde 2% hasta 6% según el porcentaje de adición. Las mayores reducciones se observan en C-03 (de 17.9% a 11.7% con 10% de adición) y C-01 (de 17.4% a 12.3%), mientras que C-02 muestra menor reducción (de 21.3% a 20.4%). Esta tendencia decreciente indica que la acción sinérgica de ambos materiales estabilizadores modifica favorablemente las propiedades de plasticidad del suelo, reduciendo su rango plástico y mejorando su comportamiento geotécnico al generar una matriz menos susceptible a deformaciones plásticas bajo diferentes condiciones de humedad.

- **Índice de plasticidad**

Los valores conseguidos señalan una reducción considerable en los índices de plasticidad respecto al terreno en su condición original, lo que se demuestra claramente en la figura expuesta a continuación.



**Figura 12 — Resultados de índices de plasticidad.**

Los resultados del índice de plasticidad obtenidos en las tres calicatas muestran valores iniciales de 16%, 11% y 11% para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, donde C-01 presenta el mayor índice de plasticidad inicial, clasificando todos los suelos como arcillas de baja plasticidad (CL) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. La adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de



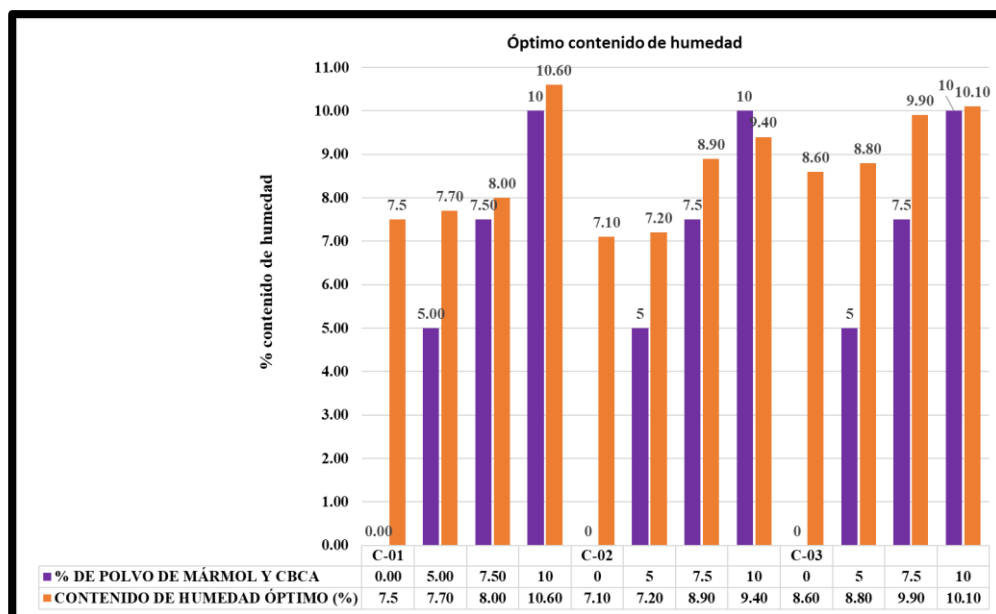
*sugarcane* en proporciones iguales (5%, 7.5% y 10% de cada material) demuestra una reducción drástica y progresiva del índice de plasticidad en todas las muestras, siendo las mayores reducciones observadas en C-01 donde el índice disminuyó de 16% a 6% con el tratamiento del 10%, seguido por C-03 que redujo de 11% a 4%, mientras que C-02 mostró la mayor reducción relativa de 11% a 2% con el tratamiento del 10%. Esta significativa reducción del índice de plasticidad confirma que la acción combinada de ambos materiales estabilizadores transforma efectivamente las características plásticas del suelo, reduciendo sustancialmente su susceptibilidad a cambios volumétricos y deformaciones plásticas, lo que resulta en un material geotécnicamente más estable y predecible para aplicaciones de ingeniería civil.

Al analizar la información de la figura 10, 11, 12, se concluye que la combinación óptima para la muestra ensayada corresponde a la dosificación de Suelo Natural con 7.5% de PM y 7.5% de Ceniza de *sugarcane* ya que presenta las mejores condiciones de estabilidad y desempeño

**Nota;** a partir del 10% de adición, el índice de plasticidad cae de forma muy brusca, llegando a valores incluso por debajo de 6%, lo cual podría ser indicativo de que el suelo pierde cohesión.

- **Compactación de suelos en laboratorio (Proctor modificado)**

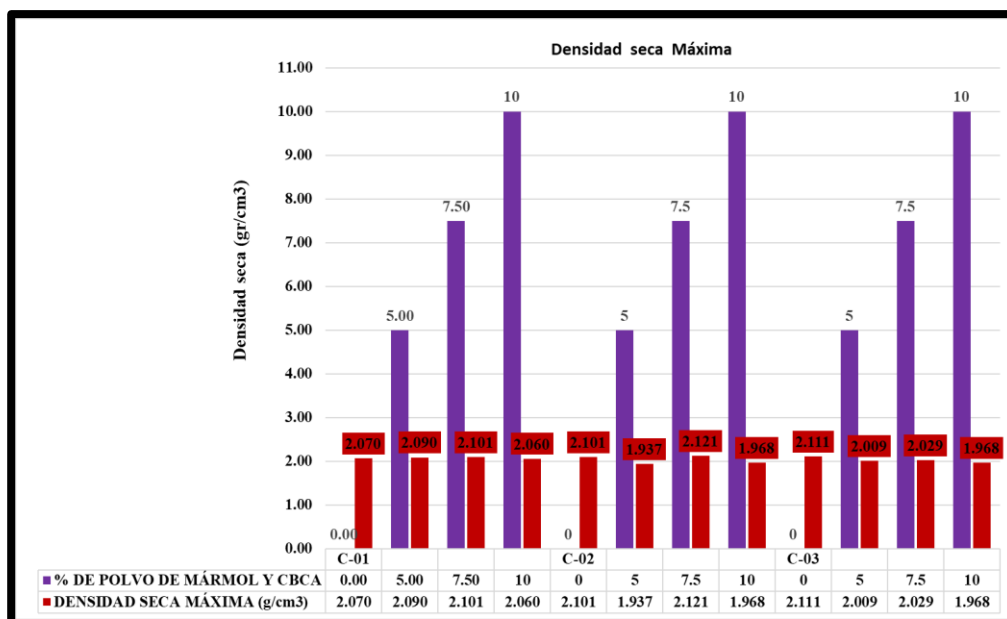
Los resultados del óptimo contenido de humedad obtenidos en las tres calicatas muestran valores iniciales de 7.5%, 7.1% y 8.6% para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, evidenciando un comportamiento relativamente homogéneo en el suelo natural con contenidos de humedad óptima característicos de suelos finos de baja a media plasticidad.



**Figura 13 — Contenidos de humedad óptimos del ensayo de Proctor modificado.**

La adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en proporciones iguales (5%, 7.5% y 10% de cada material) demuestra un incremento sistemático y progresivo del óptimo contenido de humedad en todas las muestras, logrando aumentos que van desde aproximadamente 0.2% hasta 3.1% dependiendo del porcentaje de adición y la calicata evaluada, siendo los mayores incrementos observados en C-01 donde el contenido óptimo de humedad aumentó de 7.5% a 10.6% con el tratamiento del 10%, seguido por C-02 que incrementó de 7.1% a 9.4%, mientras que C-03 mostró el menor incremento relativo de 8.6% a 9.9% con el tratamiento del 10%. Este aumento del óptimo contenido de humedad indica que la incorporación de ambos materiales estabilizadores modifica la estructura interna del suelo, requiriendo mayor cantidad de agua para alcanzar la máxima densidad seca durante la compactación, lo cual puede atribuirse a las reacciones puzolánicas y la mayor superficie específica de los materiales añadidos que demandan agua adicional para los procesos de hidratación y cementación, resultando en una matriz más densa y estable una vez compactada adecuadamente.





**Figura 14 — Densidades secas máximas del ensayo de Proctor modificado.**

Los resultados de la densidad seca máxima obtenidos en las tres calicatas muestran valores iniciales de 2.070 g/cm<sup>3</sup>, 2.101 g/cm<sup>3</sup> y 2.111 g/cm<sup>3</sup> para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, donde C-03 presenta la mayor densidad inicial, indicando características de compactación ligeramente superiores en el suelo natural. La adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en proporciones iguales muestra un comportamiento interesante: inicialmente se observa una disminución de la densidad seca máxima con la adición del 5%, seguida de una recuperación significativa con el 7.5% de adición, donde se alcanzan los valores máximos de densidad seca (2.121 g/cm<sup>3</sup> en C-02 y valores similares en las otras calicatas), superando incluso a las muestras sin tratamiento. Sin embargo, con la adición del 10% se presenta una disminución considerable, convergiendo todas las muestras hacia 1.968 g/cm<sup>3</sup>. Este comportamiento sugiere que existe un porcentaje óptimo de adición (7.5%) donde las reacciones químicas de cementación y puzolánicas entre el polvo de mármol (carbonato de calcio) y la ceniza de *sugarcane* (material puzolánico) generan la mejor sinergia, creando compuestos cementantes que maximizan tanto la densidad como la resistencia mecánica del suelo, mientras que porcentajes mayores pueden generar un exceso de material cementante que reduce la eficiencia de compactación pero mantiene las propiedades de resistencia a través de enlaces químicos permanentes.



### 5.1.3 Resultados del objetivo específico N° 02

El objetivo específico 2 consistió en determinar la influencia en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.

- **California Bearing Ratio CBR**

En la figura 15 se exhiben los resultados de la prueba CBR de las muestras extraídas en las excavaciones 01, 02 y 03 con incorporación de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane*; ejecutado conforme la normativa (MTC E – 132).

En el análisis del CBR efectuado en este estudio, se identificó una mejora significativa tras incorporar los aditivos estabilizadores, registrándose los valores de CBR al 100% y 95% en profundidades de 0.1" y 0.2" de penetración.

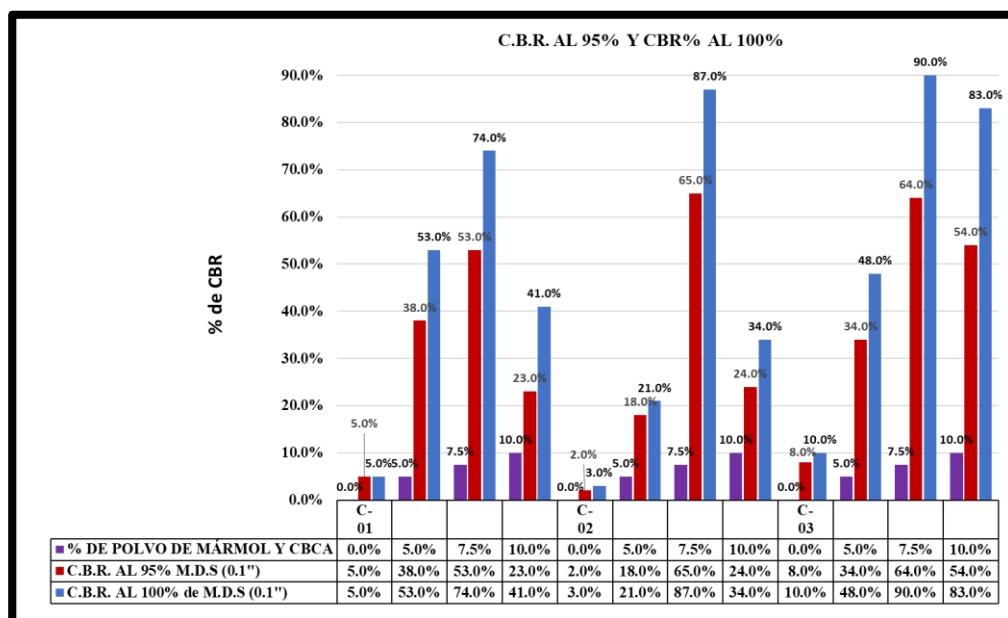


Figura 15 — Diagrama de porcentajes de CBR al 100%.

Los resultados de la prueba CBR conseguidos en las tres excavaciones localizadas a profundidades de 1.50 m en las progresivas 0+350, 0+700 y 1+050 respectivamente, exhiben valores iniciales del terreno natural al 95% de compactación de (5.0%, 2.0% y 8.0%) y al 100% de compactación de (5.0%, 3.0% y 10.0%) para C-01, C-02 y C-03, demostrando condiciones de capacidad portante deficientes en el suelo original que lo catalogan como inapropiado para subrasante conforme a especificaciones técnicas (CBR < 6%), la incorporación simultánea de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en cantidades



equivalentes (5%, 7.5% y 10% de cada material) demuestra incrementos extraordinarios y sistemáticos en ambos niveles de compactación, siendo los resultados más destacados observados con el tratamiento del 7.5% donde al 95% C-1 alcanzó 53.0%, C-02 alcanzó 65.0% y C-03 logró 64.0%, mientras que al 100% de compactación estos valores se incrementaron significativamente a 74.0%, 87.0% y 90.0% respectivamente, confirmando que el mayor nivel de compactación potencia aún más los efectos beneficiosos de la estabilización química, estos resultados demuestran que las reacciones químicas de cementación entre ambos materiales no solo mejoran la capacidad portante sino que esta mejora se maximiza cuando se alcanza la compactación óptima al 100%, transformando suelos inadecuados en materiales de excelente calidad para bases granulares (CBR > 80% al 100% de compactación), estableciendo que el porcentaje óptimo de estabilización se encuentra en el 7.5% donde se maximiza la eficiencia de las reacciones puzolánicas en ambos niveles de compactación.

## 5.2 Contrastación de hipótesis

### 5.2.1 Prueba de normalidad

Para la evaluación de la prueba de normalidad se hizo uso del Shapiro-Wilk, este se utiliza cuando los datos son menores iguales a 35 o 50 y en este caso cumple este criterio. Así mismo, se introdujeron los datos el software estadístico IBM SPSS, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 12 — Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk).**

Parámetro Evaluado	Prueba de Shapiro-Wilk	Valor p	Conclusión
Límites de Atterberg	0.967	> 0.05	Distribución normal
Humedad	0.141	> 0.05	Distribución normal
Densidad	0.232	> 0.05	Distribución normal
CBR al 100%	0.291	> 0.05	Distribución normal
CBR al 95%	0.333	> 0.05	Distribución normal

- **Hipótesis nula (H<sub>0</sub>):** Los datos siguen una distribución normal.
- **Hipótesis alterna (H<sub>1</sub>):** Los datos no siguen una distribución normal.



Los resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk indican que todas las variables analizadas siguen una distribución normal, ya que todos los valores p son mayores que 0.05. Específicamente, los valores p para Límites de Atterberg (0.967), Humedad (0.141), Densidad (0.232), CBR100 (0.291) y CBR95 (0.333) son todos superiores a 0.05, lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de normalidad. Esto significa que los datos de estas variables se ajustan a una distribución normal, lo que permite utilizar pruebas estadísticas paramétricas para la comparación de grupos como sería la prueba ANOVA.

### 5.2.2 Contrastación de la hipótesis general

La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, logrando su estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

#### a) Formulación de hipótesis estadística

La hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) se definen como sigue:

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* NO influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, logrando su estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.
- **Hipótesis alterna ( $H_1$ ):** La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* SÍ influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, logrando su estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

#### b) Nivel de significancia

Se empleó un nivel de confianza del 95% en la investigación, lo que se traduce en un valor de prueba de 0.05.

#### c) Regla de decisión

- **Se acepta  $H_0$ :** si el nivel de significancia es mayor o igual a 0.05
- **Se rechaza  $H_0$ :** si el nivel de significancia es menor a 0.05



En la tabla 13, 2 de 4 parámetros muestran influencia estadísticamente significativa, incluyendo los parámetros más críticos para la estabilización de suelos (plasticidad y capacidad de soporte).

**Tabla 13 — Parámetros físicos y mecánicos del suelo arcilloso.**

Parámetro	% Adición	Media	Desv. Est.	F (ANOVA)	Valor P
Límites de Atterberg	0%	12.6	3	6.27	0.017
	5%	10.7	2.6		
	7.50%	9	2.9		
	10%	3.9	1.7		
Humedad (%)	0%	0.08	0.01	2.75	0.112
	5%	0.08	0.01		
	7.50%	0.08	0.01		
	10%	0.10	0.01		
Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )	0%	2094	21.4	2.43	0.141
	5%	2012	76.5		
	7.50%	2083.7	48.4		
	10%	2002	50.5		
CBR (100%)	0%	0.1	0	12	0.003
	5%	0.4	0.2		
	7.50%	0.8	0.1		
	10%	0.5	0.3		

**d) Análisis de ANOVA**

El análisis ANOVA muestra que dos de los cuatro parámetros evaluados presentan diferencias estadísticamente significativas:

Límites de Atterberg con un valor p de 0.017, menor que el nivel de significancia establecido (0.05), indicando que existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes porcentajes de adición.

CBR con un valor p de 0.003, considerablemente menor que 0.05, demostrando diferencias estadísticamente significativas en la capacidad de soporte del suelo.

Los parámetros de humedad y densidad no muestran diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ), pero esto no invalida la hipótesis general ya que los parámetros más críticos para la estabilización (plasticidad y capacidad de soporte) sí presentan diferencias estadísticamente significativas.



**e) Análisis complementario del tamaño del efecto (Eta cuadrado -  $\eta^2$ )**

Para complementar el análisis de significancia estadística obtenido mediante ANOVA, se calculó adicionalmente el tamaño del efecto mediante  $\eta^2$  según los criterios de (Cohen 1988):

- **Criterios de interpretación:**
  - $\eta^2 \geq 0.14$  (14%) = Efecto grande
  - $\eta^2 = 0.06$  (6%) = Efecto mediano
  - $\eta^2 = 0.01$  (1%) = Efecto pequeño

**Tabla 14 — Análisis del tamaño del efecto.**

Propiedad	F (ANOVA)	P - valor	Cálculo $\eta^2$	% de var. Expli.	Interpretación
CBR	12.0	0.003	$(12.0 \times 3) / (12.0 \times 3 + 8) = 36/44$	0.82 82%	Efecto grande
Límites de Atterberg	6.27	0.017	$(6.27 \times 3) / (6.27 \times 3 + 8) = 18.81/26.81$	0.70 70%	Efecto grande
Densidad	2.43	0.141	$(2.43 \times 3) / (2.43 \times 3 + 8) = 7.29/15.29$	0.48 48%	Efecto grande
Humedad	2.75	0.112	$(2.75 \times 3) / (2.75 \times 3 + 8) = 8.25/11.25$	0.51 51%	Efecto grande

Este análisis complementario del tamaño del efecto muestra que todos los parámetros presentan efecto grande ( $\eta^2 > 0.14$ ) según los criterios de Cohen (1988). Sin embargo, es importante destacar que para la toma de decisión estadística se considera primordialmente el análisis ANOVA de significancia estadística.

**f) Decisión estadística**

Se RECHAZA la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se ACEPTA la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) con base en los resultados del análisis ANOVA:



Dos de los cuatro parámetros evaluados presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

Los parámetros críticos (CBR y plasticidad) presentan diferencias estadísticamente significativas, confirmando que existe influencia significativa de los aditivos según el análisis ANOVA.

La presencia de significancia estadística en los parámetros más relevantes para estabilización de suelos proporciona evidencia robusta de la efectividad del tratamiento.

#### g) Conclusión estadística

Existe evidencia estadística suficiente para afirmar que la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* SÍ influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, logrando su estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024. Los parámetros críticos (CBR y plasticidad) muestran diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) según el análisis ANOVA, confirmando que la influencia de los aditivos es estadísticamente significativa.

### 5.2.3 Contratación de la hipótesis específica N° 01

La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* influye significativamente en las propiedades físicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

#### a) Hipótesis estadística

La hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) se definen de la siguiente manera:

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* no influye significativamente en las propiedades físicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.
- **Hipótesis alterna ( $H_i$ ):** La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* si influye significativamente en las propiedades físicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.



**b) Nivel de significancia**

Se empleó un nivel de confianza del 95% en la investigación, lo que se traduce en un valor de prueba de 0.05.

**c) Regla de decisión.**

- **Se acepta Ho:** si el nivel de significancia es mayor o igual a 0.05
- **Se rechaza Ho:** si el nivel de significancia es menor o igual a 0.05

En la tabla 15 se presenta un nivel de significancia fue de 0.017 del límite de Atterberg lo cual permite el rechazo de la hipótesis nula pues el valor es menor a 0.05.

**Tabla 15 — Parámetros físicos del suelo arcilloso.**

Parámetro	Porcentaje de adición	Media	Desviación estándar	ANOVA	Valor p
Límites de Atterberg	0%	12.6	3	6.27	0.017
	5%	10.7	2.6		
	7.50%	9	2.9		
	10%	3.9	1.7		
Humedad	0%	0.08	0.01	2.75	0.112
	5%	0.08	0.01		
	7.50%	0.08	0.01		
	10%	0.10	0.01		
Densidad	0%	2094	21.4	2.43	0.141
	5%	2012	76.5		
	7.50%	2083.7	48.4		
	10%	2002	50.5		

**d) Análisis ANOVA**

El análisis ANOVA para las propiedades físicas muestra los siguientes resultados:

Límites de Atterberg presenta un valor p de 0.017, menor que el nivel de significancia establecido (0.05), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes porcentajes de adición.

Humedad y densidad presentan valores p de 0.112 y 0.141 respectivamente, mayores que 0.05, por lo que no muestran diferencias estadísticamente significativas.



e) **Análisis complementario del tamaño del efecto (Eta cuadrado -  $\eta^2$ )**

Para complementar el análisis de significancia estadística obtenido mediante ANOVA, se calculó adicionalmente el tamaño del efecto mediante  $\eta^2$  según los criterios de (Cohen 1988):

- **Criterios de interpretación:**
  - $\eta^2 \geq 0.14$  (14%) = Efecto grande
  - $\eta^2 = 0.06$  (6%) = Efecto mediano
  - $\eta^2 = 0.01$  (1%) = Efecto pequeño

**Tabla 16 — Análisis del tamaño del efecto para propiedades físicas.**

Propiedad	F (ANOVA)	p - valor	Cálculo $\eta^2$	% de var. Expl.	Interpretación
Límites de Atterberg	6.27	0.017	$(6.27 \times 3) / (6.27 \times 3 + 8) = 18.81/26.81$	0.70 (70%)	Efecto grande
Densidad	2.43	0.141	$(2.43 \times 3) / (2.43 \times 3 + 8) = 7.29/15.29$	0.48 (48%)	Efecto grande
Humedad	2.75	0.112	$(2.75 \times 3) / (2.75 \times 3 + 8) = 0.876/8.876$	0.51 (51%)	Efecto grande

Este análisis complementario del tamaño del efecto muestra que todas las propiedades físicas presentan efecto grande ( $\eta^2 > 0.14$ ) según los criterios de Cohen (1988). La plasticidad del suelo (Límites de Atterberg) es la propiedad física más crítica para evaluar el comportamiento del suelo arcilloso. Sin embargo, es importante destacar que para la toma de decisión estadística se considera primordialmente el análisis ANOVA de significancia estadística.

f) **Decisión estadística**

Se RECHAZA la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se ACEPTA la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) con base en los resultados del análisis ANOVA:

Una de las tres propiedades físicas evaluadas presenta diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), la propiedad estadísticamente significativa (Límites de Atterberg) es la más relevante desde el punto de vista

geotécnico para las propiedades físicas del suelo arcilloso. Así mismo, la reducción estadísticamente significativa de la plasticidad confirma que existe influencia significativa de los aditivos en las propiedades físicas del suelo.

**g) Conclusión estadística**

Existe evidencia estadística suficiente para afirmar que la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* SÍ influye significativamente en las propiedades físicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024. Los Límites de Atterberg muestran diferencias estadísticamente significativas ( $p = 0.017 < 0.05$ ) según el análisis ANOVA, confirmando que la influencia de los aditivos en las propiedades físicas es estadísticamente significativa.

**5.2.4 Contrastación de la hipótesis específicas N° 2**

La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* influye significativamente en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso, aumentando su resistencia en capacidad de soporte (CBR) en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

**a) Hipótesis estadística**

La hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) se definen de la siguiente manera:

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* no influye significativamente en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso, aumentando su resistencia en capacidad de soporte (CBR) en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.
- **Hipótesis alterna ( $H_1$ ):** La adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* si influye significativamente en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso, aumentando su resistencia en capacidad de soporte (CBR) en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.

**b) Nivel de significancia**

Se empleó un nivel de confianza del 95% en la investigación, lo que se traduce en un valor de prueba de 0.05.



c) **Regla de decisión.**

- **Se acepta Ho:** si el nivel de significancia es mayor o igual a 0.05
- **Se rechaza Ho:** si el nivel de significancia es menor o igual a 0.05

En la tabla 16 se presenta un nivel de significancia fue de 0.003 lo cual permite el rechazo de la hipótesis nula pues el valor es menor a 0.05.

**Tabla 17 — Evaluación de la capacidad de soporte del suelo.**

Parámetro	Porcentaje de adición	Media CBR 100%	DE CBR 100%	Media CBR 95%	DE CBR 95%	ANOVA	Valor p
CBR	0%	0.1	0	0	0	12	0.003
	5%	0.4	0.2	0.3	0.1		
	7.50%	0.8	0.1	0.6	0.1		
	10%	0.5	0.3	0.3	0.2		

d) **Análisis ANOVA**

El análisis ANOVA muestra un valor p de 0.003, que resulta notablemente inferior al nivel de significancia fijado (0.05), en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula. Esto señala que se presentan diferencias estadísticamente significativas en la capacidad portante (CBR) entre las distintas proporciones de incorporación de polvo de mármol y ceniza de caña de azúcar. La robustez estadística de estos resultados confirma que existe una influencia directa y medible de las proporciones de aditivos sobre el comportamiento mecánico del material. Por tanto, se valida la efectividad del tratamiento experimental aplicado en la modificación de las propiedades geotécnicas del suelo estudiado.

e) **Análisis complementario del tamaño del efecto (Eta cuadrado -  $\eta^2$ )**

Para complementar el análisis de significancia estadística obtenido mediante ANOVA, se calculó adicionalmente el tamaño del efecto mediante  $\eta^2$  según los criterios de (Cohen 1988):

- **Criterios de interpretación:**
  - $\eta^2 \geq 0.14$  (14%) = Efecto grande
  - $\eta^2 = 0.06$  (6%) = Efecto mediano
  - $\eta^2 = 0.01$  (1%) = Efecto pequeño



**Tabla 18 — Análisis del tamaño del efecto para CBR.**

Propiedad	F (ANOVA)	p-valor	Cálculo $\eta^2$	% de v. Expl.	Interpretación
CBR	12.0	0.003	$(12.0 \times 3) / (12.0 \times 3 + 8) = 36/44$	0.82 (82%)	Efecto grande

Este análisis complementario del tamaño del efecto muestra que el CBR presenta efecto grande ( $\eta^2 > 0.14$ ) según los criterios de Cohen (1988). Sin embargo, es importante destacar que para la toma de decisión estadística se considera primordialmente el análisis ANOVA de significancia estadística.

#### f) Decisión estadística

Se RECHAZA la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se ACEPTA la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) con base en los resultados del análisis ANOVA:

Existe una diferencia estadísticamente significativa ( $p = 0.003 < 0.05$ ) en la capacidad de soporte del suelo.

Los resultados del análisis ANOVA confirman que los diferentes porcentajes de adición influyen significativamente en las propiedades mecánicas del suelo.

El orden de efectividad según las medias obtenidas es:  $7.5\% > 10\% > 5\% > 0\%$ , donde el 7.5% demuestra ser el porcentaje óptimo para maximizar la capacidad de soporte del suelo.

#### g) Conclusión estadística

Existe evidencia estadística suficiente para afirmar que la adición de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* SÍ influye significativamente en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024. El CBR muestra diferencias estadísticamente significativas ( $p = 0.003 < 0.05$ ) según el análisis ANOVA, confirmando que la influencia de los aditivos en las propiedades mecánicas es estadísticamente significativa.

## 5.3 Discusión

### 5.3.1 Discusión del objetivo general

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la combinación sinérgica de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* ejerce una influencia altamente efectiva en la estabilización de suelos arcillosos, superando significativamente los hallazgos reportados por investigaciones previas que emplearon estos materiales de manera individual. La reducción del índice de plasticidad observada concuerda con los estudios de (Abdelkader, Hussein y Ye 2021) y (Haque et al. 2024), quienes reportaron efectos similares utilizando polvo de mármol y ceniza de bagazo respectivamente, mientras que el incremento extraordinario del CBR de rangos inadecuados (2-10%) a excelentes (53-90%) supera ampliamente las mejoras reportadas por (Ricra 2022), con 43.8% y (Ahmed et al. 2024) con 69% de incremento, utilizando únicamente ceniza de *sugarcane* o combinaciones con cal. La dosificación óptima de 7.5% de polvo de mármol más 7.5% de ceniza de *sugarcane* se aproxima a los rangos reportados por (Ari 2024), con 8% de polvo de mármol, pero la combinación específica de ambos materiales en proporciones iguales representa una contribución original que aprovecha simultáneamente las propiedades cementantes del carbonato de calcio y las características puzolánicas de la ceniza y transformando materiales no aptos para subrasante en suelos de calidad superior incluso para bases granulares, estableciendo esta técnica como una alternativa técnicamente superior y ambientalmente sostenible que utiliza materiales de desecho disponibles, coincidiendo con los principios de desarrollo sostenible destacados por (Ranjan y Sharma 2023), sobre la utilización de materiales de desecho en la estabilización de suelos.

### 5.3.2 Discusión del objetivo específico N° 01: Propiedades físicas.

Los resultados obtenidos en las propiedades físicas del suelo arcilloso mediante la adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* confirman la efectividad de esta combinación sinérgica y encuentran respaldo en múltiples investigaciones previas. La reducción sistemática del límite líquido observada, donde los valores disminuyeron de rangos iniciales de 28.7%-33.4% hasta 15.4%-22.7% con la dosificación del 10%, concuerda con los hallazgos de (Abdelkader, Hussein y Ye 2021), quienes reportaron que "a medida que el porcentaje de polvo



de mármol aumenta, el índice de plasticidad del suelo arcilloso expansivo disminuye", mientras que la reducción simultánea del límite plástico desde valores iniciales de 17.4%-21.3% hasta 11.7%-20.4% encuentra sustento en los estudios de (Haque et al. 2024), quienes determinaron que la ceniza *sugarcane* reduce el Índice de Plasticidad (IP), confirmando el efecto complementario de ambos materiales. La drástica reducción del índice de plasticidad observada, transformando suelos con IP inicial de 11%-16% a valores finales de 2%-6% con la dosificación óptima del 7.5%, supera significativamente las mejoras reportadas por investigaciones nacionales como (Ari 2024), quien con 8% de polvo de mármol logró reducciones del IP pero no alcanzó los niveles de estabilización obtenidos en este estudio. Los incrementos observados en el óptimo contenido de humedad de 7.1%-8.6% inicial a 9.4%-10.6% final concuerdan con los reportes de (Ranjan y Sharma 2023), quienes indicaron "un aumento de la OMC al aumentar el contenido de polvo de mármol". Así mismo el incremento controlado de la densidad seca máxima presenta variaciones desde valores iniciales de 2.070-2.111 g/cm<sup>3</sup> hasta rangos finales de 2.101-2.121 g/cm<sup>3</sup> en las calicatas C-01 y C-02 respectivamente, alcanzando su comportamiento óptimo al 7.5% con un valor máximo de 2.121 g/cm<sup>3</sup> (C-02). Este comportamiento se explica por las reacciones puzolánicas y de cementación que generan enlaces químicos permanentes, mejorando sustancialmente la estabilidad del suelo. Sin embargo, dosificaciones excesivas (10%) pueden provocar una ligera disminución de la densidad (1.968 g/cm<sup>3</sup>), evidenciando que la dosificación óptima de 7.5% de cada material logra el mejor balance en la modificación de las propiedades físicas, transformando suelos de plasticidad media-baja en materiales geotécnicamente más estables y menos susceptibles a cambios volumétricos por variación de humedad.

### 5.3.3 Discusión del objetivo específico N° 02: Propiedades mecánicas.

Los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso mediante la adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* demuestran incrementos extraordinarios en la capacidad portante que superan significativamente los hallazgos reportados en investigaciones previas que emplearon estos materiales de manera individual. La transformación de valores CBR iniciales inadecuados de 2.0%-8.0% al 95% de compactación y 3.0%-10.0% al 100% de compactación, hasta valores excepcionales de 53.0%-65.0% al 95% y



74.0%-90.0% al 100% con la dosificación óptima del 7.5%, representa mejoras de hasta 32 veces el valor inicial y supera ampliamente las mejoras reportadas por (Ahmed et al. 2024), quienes lograron "un aumento del 69% por encima del suelo puro" utilizando ceniza de bagazo con cal, así como los hallazgos de (Ricra 2022), que alcanzó valores de 43.8% y 38.9% con ceniza de *sugarcane* individual, y los resultados de (Ustua 2022), quien trabajando únicamente con cenizas de *sugarcane* en condiciones similares se observó mejoras significativas pero sin alcanzar los niveles extraordinarios obtenidos en este estudio. La progresión sistemática de mejora observada desde el 5% (CBR promedio de 35% al 95%) hasta el 7.5% (CBR promedio de 61% al 95%) confirma que la combinación sinérgica de ambos materiales genera reacciones químicas de cementación y puzolánicas que se potencian mutuamente, donde el carbonato de calcio del polvo de mármol actúa como agente cementante y la ceniza de *sugarcane* aporta propiedades puzolánicas que crean enlaces químicos permanentes en la matriz del suelo, transformando materiales inadecuados para subrasante (CBR < 6%) en suelos de calidad superior incluso para bases granulares (CBR > 80%), estableciendo que la dosificación del 7.5% de cada material representa el punto óptimo donde se maximiza la eficiencia de estas reacciones químicas y se logra el mejor desempeño mecánico del suelo estabilizado, coincidiendo con los principios de mejoramiento de suelos mediante materiales puzolánicos destacados por diversos autores pero alcanzando niveles de efectividad superiores debido a la acción combinada de ambos estabilizadores.

#### 5.3.4 Análisis crítico de los resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación representan un avance significativo en el campo de la estabilización de suelos para ingeniería vial, estableciendo una nueva alternativa técnica que aprovecha materiales de desecho industrial y agrícola para resolver problemas geotécnicos críticos. La comparación con los antecedentes nacionales demuestra que nuestros resultados superan consistentemente los valores reportados en investigaciones similares realizadas en el Perú, como los estudios de (Quispe, 2021) quien utilizó ceniza de mazorca de maíz con una proporción óptima del 8% en suelos expansivos del Cusco, logrando mejoras en un suelo con CBR inicial de 7.2%, valores significativamente menores a nuestros resultados iniciales y finales. La metodología empleada, fundamentada en normas técnicas nacionales (MTC) e internacionales (ASTM), garantiza la confiabilidad y reproducibilidad de



los resultados, mientras que el diseño experimental con tres dosificaciones permitió identificar la combinación óptima que maximiza los beneficios sin comprometer la estabilidad del material. Los resultados excepcionales obtenidos, especialmente los incrementos extraordinarios del CBR que transforman suelos inadecuados en materiales de calidad superior para bases granulares, confirman la efectividad de la acción sinérgica entre el polvo de mármol y la ceniza de *sugarcane*, validada mediante ensayos estandarizados que demuestran la formación de enlaces químicos permanentes en la matriz del suelo. El alcance de la investigación se enfocó en la evaluación de propiedades geotécnicas bajo condiciones controladas de laboratorio a corto plazo, sin considerar efectos de durabilidad temporal extendida ni variabilidad estacional de las propiedades del suelo, estableciendo los parámetros fundamentales para la aplicación de esta técnica de estabilización. La investigación establece bases sólidas que abren oportunidades para futuras líneas de investigación complementarias que incluyan evaluaciones de durabilidad a largo plazo, análisis de variabilidad estacional, estudios de sostenibilidad ambiental, análisis de costo-beneficio comparativo con métodos tradicionales de estabilización, y estudios de implementación en tramos piloto para validar el desempeño in situ de la técnica propuesta, considerando las condiciones climáticas y geológicas específicas de la región de Apurímac como ventajas adicionales para la aplicabilidad del método.



## CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- Del objetivo general se concluye: La adición conjunta de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* en proporciones iguales demuestra una influencia significativa en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante de la carretera Tarampampa. Los resultados descriptivos evidencian que la combinación óptima corresponde al 7.5% de polvo de mármol 7.5% de ceniza de *sugarcane*, la cual transformó suelos inicialmente inadecuados para subrasante (CBR < 6%) en materiales de excelente calidad para bases granulares, alcanzando valores de CBR al 100% de compactación de 74.0%, 87.0% y 90.0% para las calicatas C-01, C-02 y C-03 respectivamente. Los datos inferenciales corroboran estadísticamente esta mejora significativa, donde las pruebas ANOVA para CBR al 100% ( $p=0.003$ ) y CBR al 95% ( $p=0.002$ ) confirman diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de adición, siendo el 7.5% el que presenta las medias superiores (0.8 para CBR al 100% y 0.6 para CBR al 95%). Esta evidencia estadística demuestra que la acción sinérgica de ambos materiales estabilizadores genera reacciones químicas de cementación y puzolánicas que mejoran sustancialmente la capacidad portante del suelo arcilloso.
- Del objetivo específico 1 se concluye: Los datos descriptivos demuestran una reducción drástica y progresiva del índice de plasticidad en todas las muestras, los valores iniciales de 16%, 11% y 11% para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, se redujeron significativamente con el tratamiento óptimo del 7.5%, las mayores reducciones se observaron en C-02 donde el índice disminuyó de 11% a 2% , los datos inferenciales confirman estadísticamente esta mejora, donde la prueba ANOVA ( $p=0.017$ ) rechaza la hipótesis nula, demostrando que existen diferencias estadísticamente significativas en los límites de Atterberg entre los diferentes porcentajes de adición. De las Propiedades de Compactación los datos descriptivos del contenido óptimo de humedad muestran incrementos sistemáticos de 7.5%, 7.1%

y 8.6% iniciales a valores que van desde 0.2% hasta 3.1% dependiendo del porcentaje de adición, siendo los mayores incrementos observados en C-01 (41% de aumento). Sin embargo, los datos inferenciales mediante ANOVA ( $p=0.830$ ) indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes evaluados para la humedad. Respecto a la densidad seca máxima, los datos descriptivos evidencian variaciones entre los diferentes porcentajes de adición, con valores que oscilan entre 1.937 y 2.121 g/cm<sup>3</sup> según se observa en las muestras C-01, C-02 y C-03. Los datos inferenciales confirman que no hay diferencias estadísticamente significativas en la densidad ANOVA ( $p=0.141$ ), lo que indica que estas variaciones son resultado de la variabilidad natural del ensayo y de las reacciones puzolánicas de cementación que ocurren con la adición de los materiales estabilizadores.

- Del objetivo específico 2 se concluye: Relación de rodamiento de California (CBR): Los datos descriptivos del CBR demuestran incrementos extraordinarios y sistemáticos en ambos niveles de compactación. Los valores iniciales del suelo natural al 95% de compactación de 5.0%, 2.0% y 8.0% para C-01, C-02 y C-03 respectivamente, se incrementaron significativamente con el tratamiento óptimo del 7.5%, alcanzando 53.0%, 65.0% y 64.0%. Al 100% de compactación, estos valores se incrementaron a 74.0%, 87.0% y 90.0% respectivamente, los datos inferenciales corroboran estadísticamente estas mejoras excepcionales. Para CBR al 100%, la prueba ANOVA ( $p=0.003$ ) rechaza la hipótesis nula, confirmando diferencias estadísticamente significativas entre porcentajes, siendo el 7.5% el de mejor rendimiento, para CBR al 95%, la prueba ANOVA ( $p=0.002$ ) también rechaza la hipótesis nula, confirmando que el 7.5% presenta la media superior, estos resultados estadísticos demuestran que las reacciones químicas de cementación entre ambos materiales no solo mejoran la capacidad portante, sino que esta mejora se maximiza cuando se alcanza la compactación óptima, transformando suelos inadecuados en materiales de excelente calidad para aplicaciones geotécnicas avanzadas.

## 6.2 Recomendaciones

- A futuros investigadores se recomienda explorar combinaciones asimétricas de polvo de mármol y ceniza de *sugarcane* (10%-5%, 5%-10%, 12.5%-2.5%) que puedan superar la proporción óptima 1:1 identificada, evaluando porcentajes superiores al 7.5% y realizando estudios de durabilidad a largo plazo mediante ciclos de humedecimiento-secado para validar la permanencia de la transformación extraordinaria de  $CBR < 6\%$  a  $CBR > 70\%$ .
- Es sugiere a investigadores subsecuentes profundizar en los mecanismos químicos responsables de la reducción drástica del índice de plasticidad mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) y microscopia electrónica de barrido (SEM), evaluando la evolución temporal de las propiedades de consistencia a 7, 14, 28 y 90 días de curado para establecer correlaciones predictivas en diferentes tipos de suelos arcillosos.
- Se recomienda a próximas investigaciones realizar ensayos de campo piloto en secciones de prueba para validar los resultados de laboratorio, desarrollar estudios comparativos con estabilizadores convencionales (cemento, cal) y evaluar el comportamiento del CBR bajo condiciones de saturación prolongada y cargas repetitivas para posicionar competitivamente esta alternativa sustentable en aplicaciones geotécnicas avanzadas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC GEOTECHNICAL CONSULTING. 2006.** *Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada.* 2006.
- ABDELKADER, H, HUSSEIN, M. y YE, H. 2021.** *Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils.* Wuhan : Hindawi, 2021. Vol. 2021.
- AHMED, Abrar, et al. 2024.** *Estabilización de suelos arcillosos de pavimento bajo rasante utilizando ceniza de caña de azúcar y cal.* Basel : MDPI, 2024. 2076-3263.
- ALI, R, KHAN, H y SHAH, A. 2014.** *Expansive soil stabilization using marble dust and bagasse ash.* Peshawar, Pakistán. : International Journal of Science and Research - IJSR, 2014. Vol. 3. 2812-2816.
- ARI HUANATICO, Jose Luis. 2024.** *Estudio comparativo del efecto de ceniza de concha de abanico y polvo de mármol sobre las propiedades de la subrasante de la vía Caminaca Achaya.* Juliaca : Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, 2024.
- ASCE . 2020.** *Report Card for America's Infrastructure.* Reston : ASCE, 2020.
- ASTM D1557-00. 2000.** *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)).* West Conshohocken, PA : ASTM International, 2000.
- BARRETO FLORES, Paul Paul. 2020.** *Estabilización de Suelos Cohesivos Incorporando Ceniza Oriza Sativa y Melaza Saccharum Officinarum en la av. Mesones Muro-Chiclayo 2020.* Chiclayo : universidad Señor de Sipan, 2020.
- BOTÍA, W. 2015.** *Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo.* Bogota : Universidad Militar Nueva Granada, 2015.
- BOWLES, J. 1981.** *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.* Mexico : McGRAW-HILL, 1981. 968-451-046-2.
- CABALLERO, C. 2016.** *Estabilización química de arcillas mediante polvo de mármol.* Chihuahua : universidad Autonoma de Chihuahua, 2016.
- CABEZAS, E., ANDRADE, D. y TORRES, J. 2018.** *Introducción a la metodología de la.* Sangolquí : Universidad de las Fuerzas Armadas, 2018.
- CASAGRANDE , A. 1942.** *Quinto informe sobre la marcha de los trabajos de investigación triaxial.* Universidad de Harvard : Universidad de Harvard, 1942.



**CHÁVEZ, J, y otros. 2015.** *Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción.* Durango : Revista de Arquitectura e Ingeniería, 2015. Vol. 9. 1990-8830.

**CIP. 2019.** *Código de Ética del Colegio de Ingenieros del Perú.* Lima : CIP, 2019.

**COMACSA. 2021.** - *Análisis químico por fluorescencia de rayos X: polvo de mármol.* Lima : s.n. LAB-PR-007.

**COMEXPERU. 2020.** *Infraestructura vial: gobiernos subnacionales estancados.* Lima : COMEXPERU, 2020.

**CONARSAC. 2023.** *¿Qué es la estabilización del suelo y cómo se hace?* 2023.

**COOPERSCONSULT INGENIERÍA Y LABORATORIO. 2023.** *Contenido de humedad .* Huancayo : s.n., 2023.

**CÓRDOVA ZAMORA, Manuel. 2003.** *Estadística descriptiva e Inferencial Aplicaciones 5 Ed.* Lima : Editorial Moshera, 2003.

**DAS, Braja M. 2011.** *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones.* Santa Fe : Cengage., 2011. 98-7607-481-823-9.

—. **2013.** *Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición.* Ciudad de México : Cengage Learning, 2013. 978-1-111-57675-2.

**DE LA CRUZ SANTA MARIA, Marcelo Jesus. 2024.** *Estabilización de suelos arcillosos incorporando porcentajes de vidrio pulverizado y ceniza de bagazo de caña de azúcar.* Chiclayo : Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, 2024.

**ELORZA, Haroldo. 2000.** *Estadística para las ciencias sociales y del comportamiento.* México : Oxford University Press, 2000. 970-613-181-7.

**EUGENIO CASTRO, Keila Stefani y VENTURA QUISPE, Geraldine Gabriela. 2021.** *Determinación de la relación de soporte de califonia (CBR) a partir de las propiedades de los suelos para pavimentos de bajo volumen.* Lima : Universidad Ricardo Palma, 2021.

**FAO. 2017.** *Consistencia del suelo.* s.l. : FAO, 2017.

**GABRIEL MAMANI, Henry Luis . 2020.** *Influencia del látex reciclado molido y las cenizas de cáscara de arroz en la resistencia al esfuerzo cortante, humedad óptima y densidad seca máxima de suelos arcillosos a nivel subrasante Lima-Norte 2020.* Lima : Universidad Privada del Norte, 2020.



- GALLARDO AMAYA, Romel Jesús, MARTINES OVALLOS, Ciro Andrey y MUÑOZ QUINTERO, Angie Alejandra. 2020.** *Caracterización de un suelo plástico para estabilización con cementantes.* Ocaña : Respuestas, 2020. Vol. 25. 2422-5053.
- GEOSUPPORT. 2013.** *Descriptorios geotécnicos (5): plasticidad, límites de Atterberg y consistencia.* Barcelona : GEOSUPPORT, 2013.
- GIG. 2023.** *¿Cómo determinar el Límite Líquido del suelo?* Lima : GIG, 2023.
- GONZÁLEZ , M y PÉREZ, M. 2024.** *Análisis de las propiedades mecánicas de un suelo expansivo para la autoconstrucción de una vivienda de interés social.* Querétaro : ALCONPAT , 2024. 2007-6835.
- HAQUE, Rashedul, y otros. 2024.** *Evaluación de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar como Material Estabilizador de Subrasante: Un Estudio de Caso en Bangladesh.* Bangladesh : BAUET Journal , 2024. 2521-5256.
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P. 2014.** *Metodología de la investigación.* Mexico : McGrawHill, 2014.
- HERNÁNDEZ, Roberto y MENDOZA, Christian M. 2018.** *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* México : McGraw Hill, 2018.
- HOSAMANI, S y HULAGABALI, A. 2016.** *Comparative study on stabilization of expansive soil using fly ash, rice husk ash, bagasse ash y marble dust.* Bangalore : Conferencia Internacional sobre Suelo y Medio Ambiente,, 2016.
- JALAL , Fazal E., y otros. 2017.** *Estabilización de suelos de mediana expansión en Pakistán utilizando Residuos Industriales de Mármol y Cenizas de Bagazo.* Peshawar : International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2017. Vol. 10. 0974-5904.
- JASSIM, N, et al. 2022.** *Use of residual marble dust as a sustainable stabilization material for the subgrade layer.* Mustansiriyah : ScienceDirect, 2022. Vol. 14. 100436.
- LAMBE, William y WHITMAN, Robert. 1979.** *Mecánica de suelos.* Nueva York : Limusa, 1979.
- LIFIDER. 2022.** *Suelos arcillosos. Suelos arcillosos.* LIFIDER, 2022.
- LOVERA, E. 2017.** *Modelo de investigaciones geológicas y geotécnicas para definir la cimentación de estructuras de líneas de transmisión eléctrica.* Lima : Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 2017. Vol. 19. 37.



**MARTINES L., Enrique y LIRA C., Leonel . 2010.** *Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos.* Querétaro : Centro Nacional de Metrología (CENAM), 2010. 690-2.

**MARTÍNEZ, M. 2012.** *Metodología de la investigación científica.* s.l. : Editorial Trillas, 2012.

**MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES . 2023.** *Anuario Estadístico.* Lima : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2023.

**MISHRA, P y ARORA, V. 2019.** *Stabilization of silty soils with marble Sugarcane Bagasse Powder and Ash.* Haryana : Springer Singapore, 2019. 136119.

**MTC. 2014.** *Manual de carreteras suelos geología, geotecnia y pavimentos seccion suelos y pavimentos.* Lima : Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014. 2014-08985.

—. **2016.** *Manual de ensayo de materiales.* Lima : Ministerio de transportes y comunicaciones, 2016.

**MVCS. 2018.** *Norma técnica E.050 suelos y cimentaciones.* Lima : El Peruano, 2018.

**NAVIDI, Willian. 2006.** *Estadística para ingenieros y científicos.* México : Mcgraw Hill Interamericana, 2006. 970-10-5629-9.

**NEELADHARAN, C., et al. 2018.** *Estabilización de suelos mediante polvo de mármol con silicato de sodio como aglutinante.* Vellore : Revista internacional de tendencias de investigación avanzada en ingeniería y tecnología, 2018. Vol. 5. 2394-3785.

**NTP 339.127. 2019.** *Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo.* Lima : INACAL, 2019.

**NTP 339.128. 2019.** *Método de ensayo para el análisis granulométrico.* Lima : INACAL, 2019.

**NTP 339.129. 2000.** *Métodos de ensayo para determinar el límite líquido. límite plástico, e índice de plasticidad de suelos.* Lima : INACAL, 2000.

**NTP 339.134. 199.** *Método para la clasificación de los suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS).* Lima : INACAL, 199.

**NTP 339.141. 2014.** *Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>(56 000pie-lbf/pie<sup>3</sup>)).* Lima : INACAL, 2014.



**NTP 339.145. 2015.** *Método de ensayo de CBR (Relacion de Soporte de California) suelos compactados en laboratorio.* Lima : INACAL, 2015.

**QUISPE, D. 2021.** *Estabilización de suelos expansivos con ceniza de mazorca de maíz en la ciudad del Cusco.* Cusco : Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, 2021. 2709-8219X.

**RANJAN, S y SHARMA, T. 2023.** *Evaluating the properties of compressed soil earth blocks after the addition of bagasse ash, marble powder and paddy straw.* Chandigarh : Earth and Environmental Science, 2023. pág. 012005. Vol. 1110.

**RICRA HUAMAN, Carmen Sara . 2022.** *Adición de ceniza de caña de azúcar en la estabilización de suelos tropicales en el centro poblado Naranjal, Selva Central - 2021.* Huancayo : Universidad Continental, 2022.

**ROMERO, SALDAÑA Manuel. 2016.** *Metodología de la investigación Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal.* Madrid : Revista Enfermería del Trabajo, 2016.

**SALAS PALACIOS, Fabio Fabian . 2022.** *Mejoramiento de la subrasante del camino vecinal San Gabriel incorporando ceniza de bagazo de caña de azúcar, Abancay Apurímac 2022.* Abancay : Universidad Cesar Vallejo, 2022.

**SANZ, J. 1975.** *Mecánica de suelos.* Barcelona : EDITIONS EYROLLES, 1975. 84-7146-165-X.

**SINGH, M., et al. 2017.** *El polvo de mármol tiene un alto contenido de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), que se puede agregar a los morteros y hormigones a base de cemento Portland para aumentar la vida útil, funcionando como relleno de poros.* México : Elsevier, 2017. 2352-7102.

**StudySmarter GmbH. 2024.** *Índice plástico: definición y cálculo.* Múnich : StudySmarter, 2024.

**TRIOLA, Mario F. 2004.** *Elementary Statistics.* México : Pearson Educación, 2004. 970-26-0519-9.

**UNAMBA. 2018.** *Código de ética para la investigación.* Abancay : Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, 2018.

**USTUA GUIADO, Rene. 2022.** *Incorporación de cenizas caña de azúcar en la subrasante de la carretera Aymas baja- Quisapata, Apurímac-2022.* Abancay : Universidad Cesar Vallejo, 2022.



**VERMA, A y SHARMA, T. 2021.** *Experimental study of the strength aspects of compressed stabilized earth blocks using marble powder, sugarcane bagasse ash and rice straw fiber.* Chandigarh : Earth and Environmental Science, 2021. Vol. 889.

**VILLALAZ, C. 2004.** *Mecánica de suelos y cimentaciones.* Limusa : NORIEGA EDITORES, 2004. 968-18-6489-1.

**WFEO. 2023.** *Engineering for Sustainable Development: Global Challenges and Solutions.* Paris : WFEO, 2023.

**YADAV, Anjani Kumar, y otros. 2017.** *Estabilización de suelo aluvial para subrasante utilizando ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de estiércol de vaca para caminos rurales.* s.l. : Revista internacional de investigación y tecnología de pavimentos, 2017. Vol. 10.

**ZAMBRANO, F. 2022.** *Análisis comparativo de la capacidad de soporte a nivel de subrasante en suelos arcillosos incorporando ceniza de Saccharum Officinarum y activador alcalino en la trocha carrozable Sahuanay – Umaccata Tamburco Abancay 2021.* Abancay : Universidad Tecnológica de los Andes, 2022.



## ANEXOS





Anexo A

Tabla 19 — Matriz de consistencia.

<i>Problemas</i>	<i>Objetivos</i>	<i>Hipótesis</i>	<i>Variables</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Instrumentos</i>	<i>Método</i>
<i>General</i>	<i>General</i>	<i>General</i>					
¿Cuál es la influencia de la adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024?	Determinar la influencia de la adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	La adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> influye significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, logrando su estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.	Polvo de mármol y Ceniza de <i>sugarcane</i> (V.I)	Adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> (Dx1)	porcentajes de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> (%)		<b>NIVEL</b>
							Aplicada
							<b>DISEÑO</b>
					Límite líquido (LL)	Ficha de recolección de datos	Experimenta
					Límite plástico (LP)		
					Índice de plasticidad (IP)		<b>MÉTODO</b>
					Contenido de humedad óptimo	Ficha de recolección de datos	Deductivo
					Densidad seca máxima (DSM)		<b>ENFOQUE</b>
							Cuantitativo
¿Cuál es la influencia en las propiedades físicas de un suelo arcilloso al adicionar polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> para estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024?	Determinar la influencia en las propiedades físicas de un suelo arcilloso al adicionar polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> para estabilización en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.	La adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> influye significativamente en las propiedades físicas del suelo arcilloso en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.	Estabilización de suelos arcillosos (V.D)	Propiedades físicas (Dy1)			
¿Cuál es la influencia en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024?	Determinar la influencia en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.	La adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> influye significativamente en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso, aumentando su resistencia en capacidad de soporte (CBR) en la subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.		Propiedades mecánicas (Dy2)	Ensayo de CBR (%)	Ficha de recolección de datos	



**Anexo B.**

**(Instrumentos de recolección de datos)**

		UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
<b>MTC E 108 / ASTM D-2216</b>					
Título de la tesis:		Adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.		Fecha:	
Ensayo:		Determinación del Contenido de Humedad del Suelo Natural		Calicata:	
Ubicación:		Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac		Profundidad:	
Responsable:		Bach. Arnold Beltran Ruiz		Ubicación	
Descripción:					
<b>Descripción</b>		<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>	<b>Muestra 03</b>	
Peso de Recipiente (gr)					
Peso de Recipiente +Muestra Húmeda (gr)					
Peso de Recipiente + Muestra Seca (gr)					
Peso del Agua (gr)					
Peso de Muestra Seca (gr)					
Contenido de Humedad					
<b>Contenido de Humedad Promedio</b>					
Observaciones: _____					
TESISTA			ENCARGADO DE LABORATORIO		

**Figura 16 — Formato de instrumento del contenido de humedad del suelo natural.**




	UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
<b>MTC E - / 110 / 111/ASTM D 4318</b>			
<b>Título de la tesis:</b>	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	
<b>Ensayo:</b>	Determinación del Límite líquido Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	Calicata:	
<b>Ubicación:</b>	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	
<b>Responsable:</b>	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación:	
<b>Descripción:</b>			

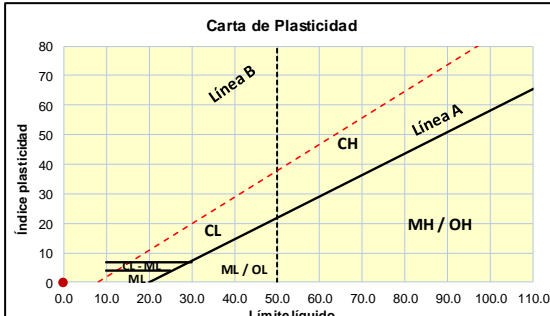
LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO			
Numero de golpes							
Recipiente Número							
Masa Suelo Húmedo + Recipiente (g)							
Masa Suelo Seco + Recipiente (g)							
Masa Recipiente (g)							
Masa Agua (g)							
Masa Suelo Seco (g)							
Humedad Natural (w) (%)							

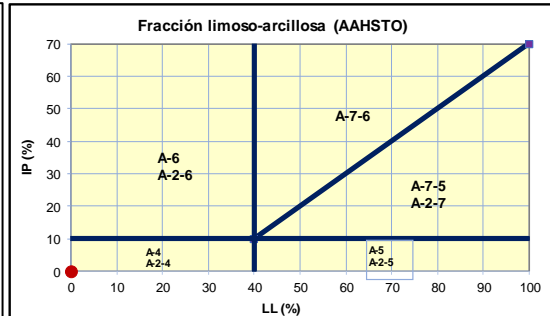
  



RESULTADOS	
LÍMITE LIQUIDO LL (%):	
LÍMITE PLÁSTICO LP (%):	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD IP (%):	







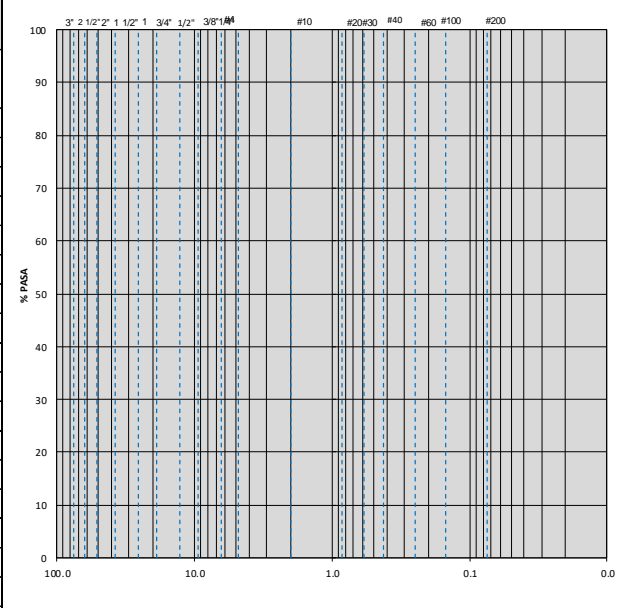
OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

TESISTA	ENCARGADO DE LABORATORIO

Figura 17 — Formato de instrumento de LL, LP e IP del suelo.



	UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
<b>MTC E - 107 / ASTM D422</b>			
<b>Título de la tesis:</b>	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	
<b>Ensayo:</b>	Análisis Granulométrico de suelos por tamizado	Calicata:	
<b>Ubicación:</b>	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	
<b>Responsable:</b>	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación:	
<b>Descripción:</b>			
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MTC E 107 (MÉTODO POR TAMIZADO)</b>		<b>CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA</b>	
Masa húmeda total antes del lavado, g		Masa seca Total antes del lavado, g	
Masa seca después de lavar (g)			
Tamiz (Pulg.) (mm)	Peso Ret (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado
% Pasa			
3"	76.200		
2 1/2"	63.500		
2"	50.800		
1 1/2"	38.100		
1"	25.400		
3/4"	19.000		
1/2"	12.700		
3/8"	9.510		
1/4"	6.350		
#4	4.760		
#10	2.000		
#20	0.840		
#30	0.590		
#40	0.420		
#60	0.250		
#100	0.149		
#200	0.074		
Pasa #200			



RESULTADOS			CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO		
% de Gravas:	D60(mm):	Cu	% Límite Líquido		CLASIFICACIÓN AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION)
% de Arena:	D30(mm):	Cc	% Límite Plástico		
% de Finos:	D10 mm (diámetro efectivo):		% Índice de Plasticidad		SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.

OBSERVACIONES:

TESISTA	ENCARGADO DE LABORATORIO

Figura 18 — Formato de instrumento de análisis granulométrico de suelos por tamizado.





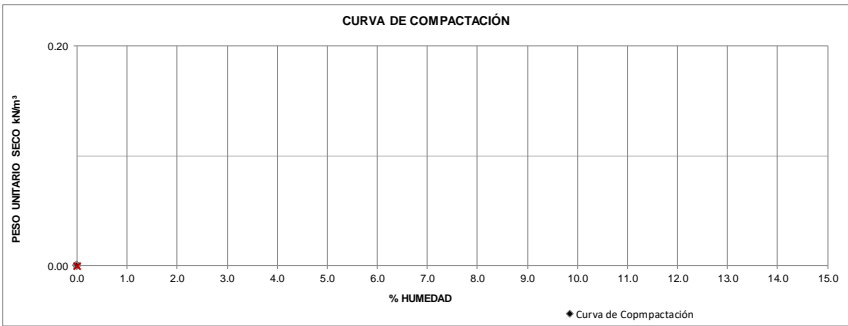
		UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL							
<b>MTC E - 115 / ASTM D-1557</b>									
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:							
Ensayo:	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado	Calicata:							
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:							
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación:							
Descripción:									
<b>COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS</b>				<b>MÉTODO DE ENSAYO:</b>					
PRUEBA	Und	1	2	3	4				
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	gr								
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No								
NUMERO DE MOLDE	No								
VOLUMEN MOLDE	cm <sup>3</sup>								
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr								
MASA DEL MOLDE	gr								
MASA MUESTRA HUMEDA	gr								
<b>HUMEDAD DE COMPACTACIÓN</b>									
NUMERO DE RECIPIENTE	No								
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr								
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	gr								
MASA DEL MOLDE	gr								
MASA DEL AGUA	gr								
MASA DE LA MUESTRA SECA	gr								
% de HUMEDAD	%								
<b>DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES</b>									
DENSIDAD HÚMEDA	gr/cm <sup>3</sup>								
DENSIDAD SECA	gr/cm <sup>3</sup>								
PESO UNITARIO SECO	kN/m <sup>3</sup>								
	lb/ft <sup>3</sup>								
<b>CURVA DE COMPACTACIÓN</b> 				<b>PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;"></td> <td style="width: 20%; text-align: center;">kN/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">gr/cm<sup>3</sup></td> </tr> </table>			kN/m <sup>3</sup>		gr/cm <sup>3</sup>
	kN/m <sup>3</sup>								
	gr/cm <sup>3</sup>								
				<b>HUMEDAD ÓPTIMA (%)</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;"></td> <td style="width: 20%;"></td> </tr> </table>					
<b>OBSERVACIONES:</b>									
Los resultados presentados corresponden unicamente a la muestra entregada al laboratorio y sometida a ensayo.									
<b>TESISTA</b>			<b>ENCARGADO DE LABORATORIO</b>						

Figura 19 — Formato de instrumento ensayo Proctor modificado.





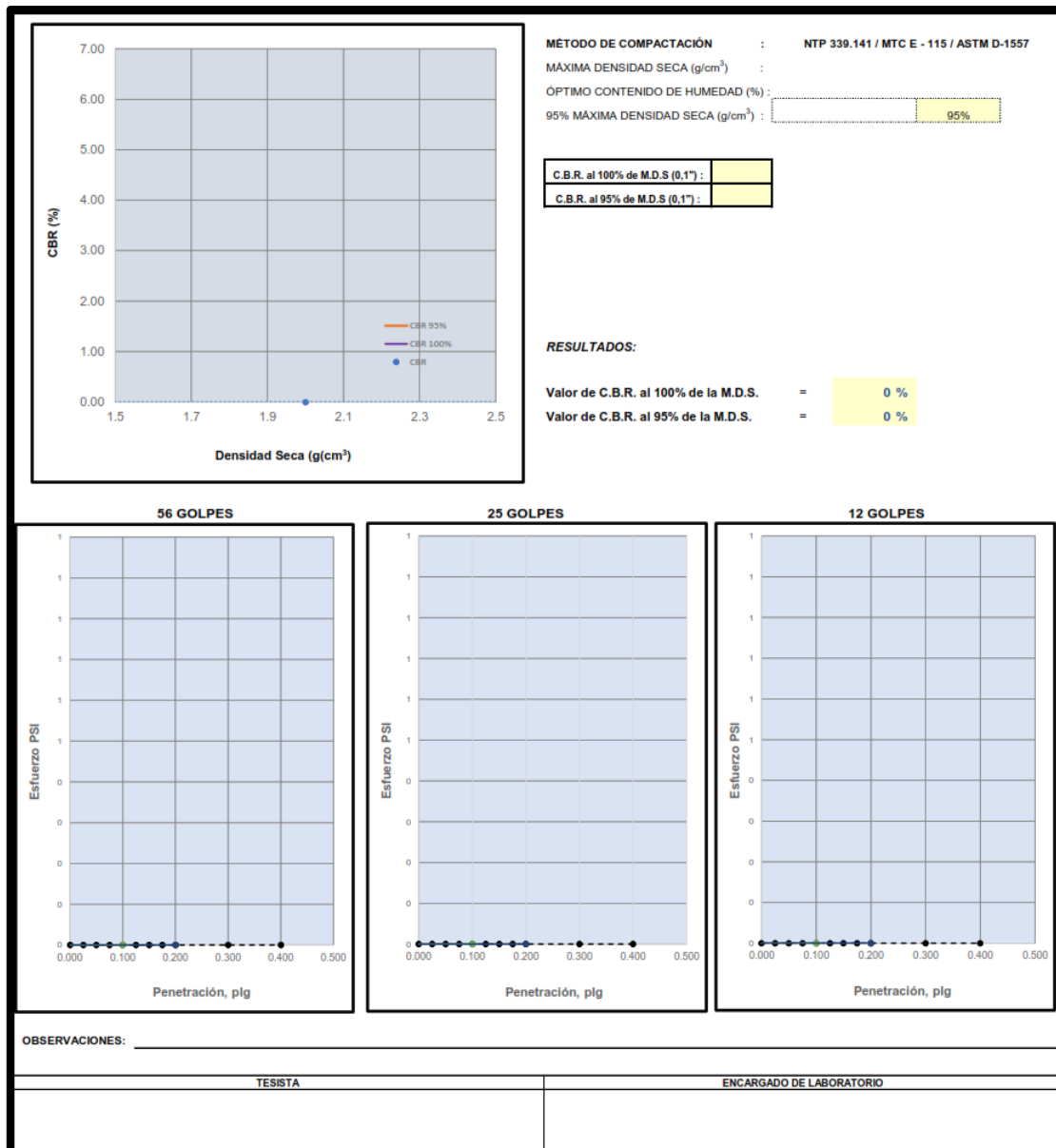


Figura 21 — Formato de instrumento de ensayo de CBR esfuerzo vs penetración.

**Anexo C.**

**(Resumen de resultados.)**

**Tabla 20 — Resumen de resultados de contenido de humedad natural.**

N°	Calicata	Progresiva ( km)	Profundidad ( m)	Promedio W%
1	C-01	0+350	1.50	11.68
2	C-02	0+700	1.50	10.06
3	C-03	1+050	1.50	6.21

**Tabla 21 — Resumen de resultados de límites de Atterberg.**

N°	Calicata	Prof. (m)	Progresiva (km)	% de PM y CBCA	Límite líquido(%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
1	C-01	1.50	Suelo Natural	0.0%	33.4%	17.4%	16.0%
			SN + 5% PM +5% CCA	5.0%	28.7%	15.5%	13.3%
			SN + 7.5% PM +7.5% CCA	7.5%	25.9%	13.9%	11.9%
			SN + 10% PM +10% CCA	10%	17.9%	12.3%	5.6%
2	C-02	1.50	Suelo Natural	0.0%	32.2%	21.3%	10.9%
			SN + 5% PM +5% CCA	5.0%	31.3%	20.6%	10.7%
			SN + 7.5% PM +7.5% CCA	7.5%	27.6%	18.8%	8.9%
			SN + 10% PM +10% CCA	10%	22.7%	20.4%	2.3%
3	C-03	1.50	Suelo Natural	0.0%	28.7%	17.9%	10.8%
			SN + 5% PM +5% CCA	5.0%	23.1%	15.1%	8.1%
			SN + 7.5% PM +7.5% CCA	7.5%	19.8%	12.8%	6.1%
			SN + 10% PM +10% CCA	10%	15.4%	11.7%	3.7%

**Tabla 22 — Resumen resultados de análisis granulométrico.**

N°	Calicata	Material	peso (gr)	proporción (%)
1	C-1	Gravas	68.00	2.75
		Arenas	1672.00	67.69
		Finos	730.00	29.55
		TOTAL	2470.00	100.00
2	C-2	Gravas	188.70	7.13
		Arenas	1113.20	42.09
		Finos	1343.10	50.78
		TOTAL	2645.00	100.00
3	C-3	Gravas	644.60	31.57
		Arenas	931.40	45.61
		Finos	466.00	22.82
		TOTAL	2042.00	100.00

**Tabla 23 — Resumen de resultados de clasificación SUCS Y AASHTO de suelos.**

N°	Calicata	Progresiva (km)	Ensayos	Clasificación	
				SUCS	AASHTO
1	C-01	0+350	Suelo Natural	SC	A-2-6(1)
			SN + 5% PM + 5% CBCA	SC	A-2-6(0)
			SN + 7.5% PM + 7.5% CBCA	SC	A-2-6(0)
			SN + 10% PM + 10% CBCA	SC - SM	A-2-4(0)
2	C-02	0+700	Suelo Natural	CL	A-6(3)
			SN + 5% PM + 5% CBCA	CL	A-6(3)
			SN + 7.5% PM + 7.5% CBCA	CL	A-4(3)
			SN + 10% PM + 10% CBCA	ML	A-4(0)
3	C-03	1+050	Suelo Natural	SC	A-2-6(0)
			SN + 5% PM + 5% CBCA	SC	A-2-4(0)
			SN + 7.5% PM + 7.5% CBCA	SC-SM	A-1-b(0)
			SN + 10% PM + 10% CBCA	SM	A-1-b(0)

**Tabla 24 — Resumen de resultados de la D.S.M. y O.C.H.**






N°	Calicata	Profundidad (m)	Progresiva (km)	% De polvo de mármol y CBCA	DSM (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de humedad óptimo (%)
1	C-01	1.50	0+350	0.00	2.070	7.5
				5.00	2.090	7.70
				7.50	2.101	8.00
				10	2.060	10.60
2	C-02	1.50	0+700	0	2.101	7.10
				5	1.937	7.20
				7.5	2.121	8.90
				10	1.968	9.40
3	C-03	1.50	1+050	0	2.111	8.60
				5	2.009	8.80
				7.5	2.029	9.90
				10	1.968	10.10

**Tabla 25 — Resumen de resultados del ensayo CBR al 95% y al 100%.**

N°	Calicata	Profundidad (m)	Progresiva (km)	% de PM y CBCA	C.B.R. AL 95% M.D.S (0.1")	C.B.R. AL 100% de M.D.S (0.1")
1	C-01	1.50	0+350	0.0%	5.0%	5.0%
				5.0%	38.0%	53.0%
				7.5%	53.0%	74.0%
				10.0%	23.0%	41.0%
2	C-02	1.50	0+700	0.0%	2.0%	3.0%
				5.0%	18.0%	21.0%
				7.5%	65.0%	87.0%
				10.0%	24.0%	34.0%
3	C-03	1.50	1+050	0.0%	8.0%	10.0%
				5.0%	34.0%	48.0%
				7.5%	64.0%	90.0%
				10.0%	54.0%	83.0%

Tabla 26 — Resumen expansión CBR suelo natural vs. suelo con adiciones.


N°	Calicata	Progresiva (km)	Ensayos	Expansión %
1	C-01	0+350	Suelo Natural	0.17%
			SN + 5% PM + 5% CBCA	0.17%
			SN + 7.5% PM + 7.5% CBCA	0.10%
			SN + 10% PM + 10% CBCA	0.10%
2	C-02	0+700	Suelo Natural	0.20%
			SN + 5% PM + 5% CBCA	0.17%
			SN + 7.5% PM + 7.5% CBCA	0.13%
			SN + 10% PM + 10% CBCA	0.10%
3	C-03	1+050	Suelo Natural	0.17%
			SN + 5% PM + 5% CBCA	0.17%
			SN + 7.5% PM + 7.5% CBCA	0.13%
			SN + 10% PM + 10% CBCA	0.10%

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p> 			
<b>MTC E 108 / ASTM D-2216</b>			
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Determinación del Contenido de Humedad del Suelo Natural	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa		
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03
Peso de Recipiente (gr)	720.5	527.6	487.6
Peso de Recipiente + Muestra Húmeda (gr)	683.5	501.5	463.7
Peso de Recipiente + Muestra Seca (gr)	87.6	74.6	84.6
Peso del Agua (gr)	37.00	26.10	23.90
Peso de Muestra Seca (gr)	595.90	426.90	379.10
Contenido de Humedad (%)	6.21	6.11	6.30
Contenido de Humedad Promedio %	6.21		
Observaciones: _____			
TESISTA		ENCARGADO DE LABORATORIO	
		  <p>JOSE AUGUSTO QUISPE MUNARES ING. CIVIL CIP. N° 300569</p>	


NOTA

La figura ilustra la metodología para determinar el contenido de humedad natural en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 17.

Figura 22 — Humedad natural del suelo - calicata C-3.



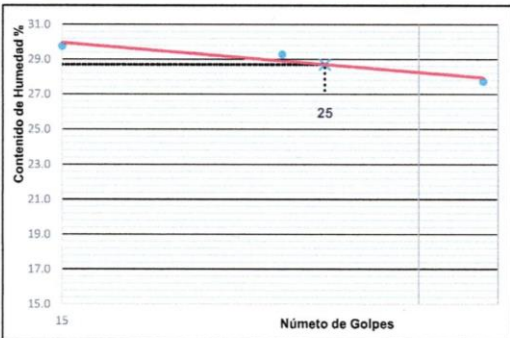
UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



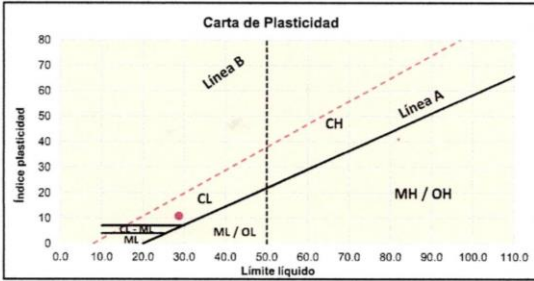
**MTC E - / 110 / 111/ASTM D 4318**

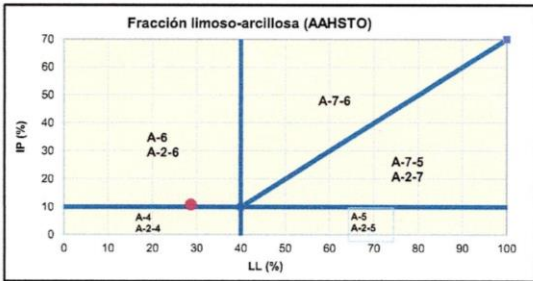
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Determinación del Límite líquido Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación:	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa que pasa la malla #40		

LÍMITE LIQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
Numero de golpes	15	23	34	TC-4	TC-5	TC-6
Recipiente Número	C-4	C-5	C-6			
Masa Suelo Húmedo + Recipiente (g)	45.55	47.36	43.54	8.71	9.77	8.97
Masa Suelo Seco + Recipiente (g)	38.49	39.93	37.21	8.62	9.68	8.90
Masa Recipiente (g)	14.77	14.56	14.39	8.16	9.14	8.50
Masa Agua (g)	7.06	7.43	6.33	0.09	0.09	0.07
Masa Suelo Seco (g)	23.72	25.37	22.82	0.46	0.54	0.40
Humedad Natural (w) (%)	29.76	29.29	27.74	19.57	16.67	17.50






RESULTADOS	
LÍMITE LIQUIDO LL (%):	28.7
LÍMITE PLÁSTICO LP (%):	17.9
ÍNDICE DE PLASTICIDAD IP (%):	10.8





OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

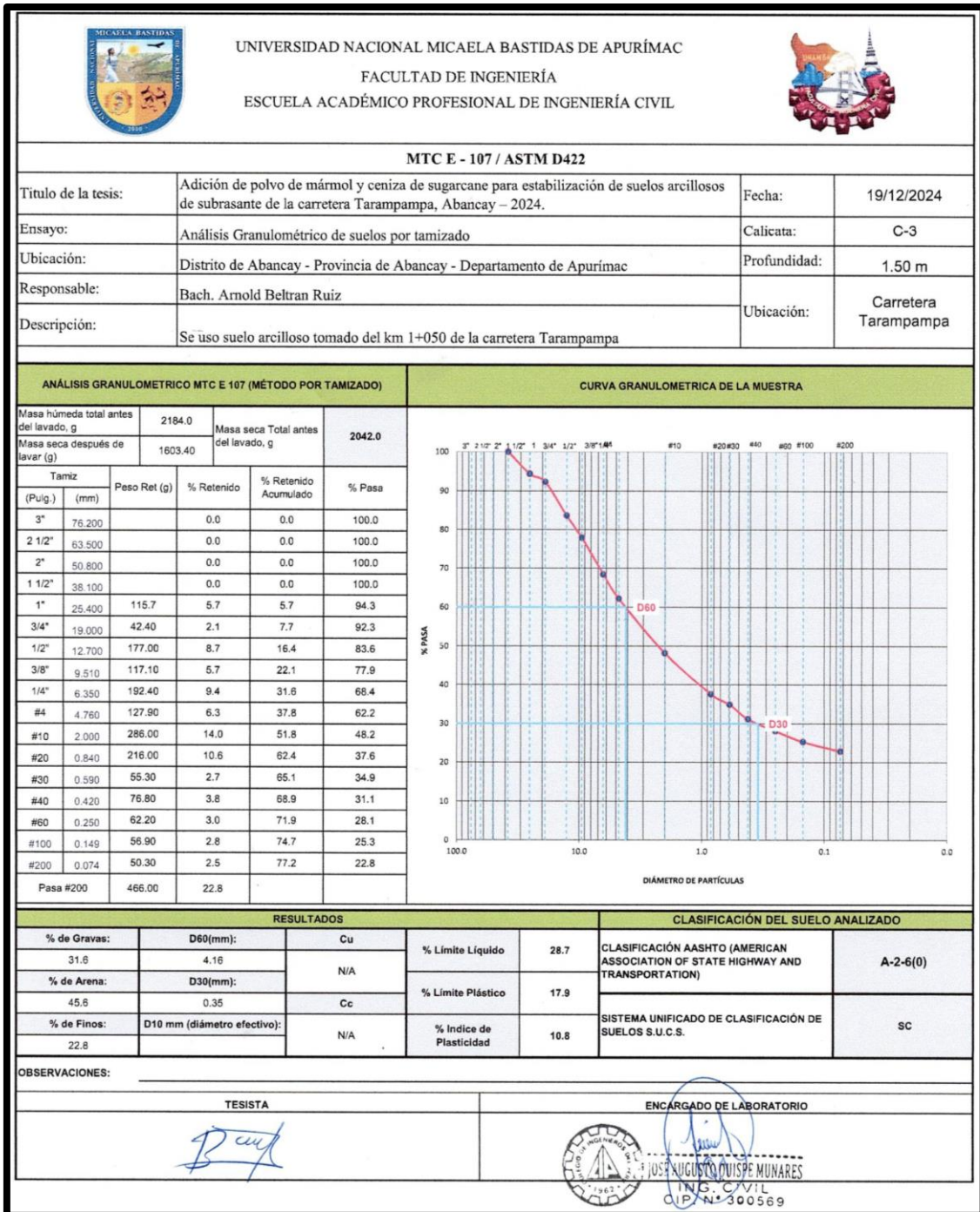
TESISTA	ENCARGADO DE LABORATORIO
	  JOSÉ AUGUSTO QUISPE MUNARES ING. CIVIL CIP: N° 366509

**NOTA**

La figura ilustra la metodología para determinar los límites de Atterberg del suelo natural en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 18.

**Figura 23 — Determinación del LL, LP e IP del suelo natural - C-3.**





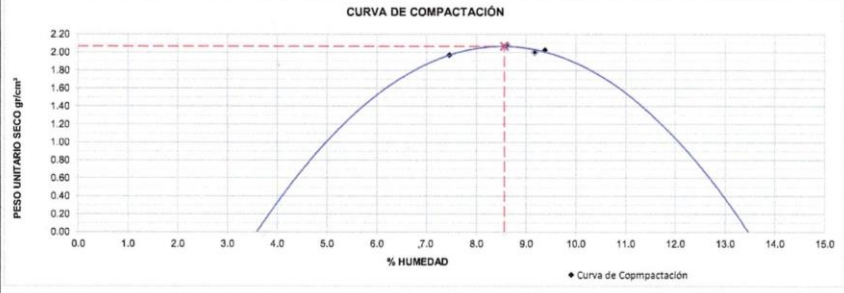




**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el análisis granulométrico y la clasificación de suelos natural en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 19 y tabla 20.

**Figura 24 — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.**





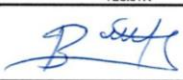

 UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
<b>MTC E - 115 / ASTM D-1557</b>			
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa		
<b>COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS</b>		<b>MÉTODO DE ENSAYO:</b>	
PRUEBA	Und	1	2
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	gr	6000	6000
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	56	56
NUMERO DE MOLDE	No	1	1
VOLUMEN MOLDE	cm <sup>3</sup>	2127	2127
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	10420	10570
MASA DEL MOLDE	gr	5920	5920
MASA MUESTRA HUMEDA	gr	4500	4650
<b>HUMEDAD DE COMPACTACIÓN</b>		<b>B</b>	
NUMERO DE RECIPIENTE	No	R-7	R-1
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	370.10	617.80
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	gr	349.40	575.40
MASA DEL MOLDE	gr	71.90	113.20
MASA DEL AGUA	gr	20.70	42.40
MASA DE LA MUESTRA SECA	gr	277.50	462.20
% de HUMEDAD	%	7.5	9.2
<b>DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECIMENES</b>		<b>R-8</b>	
DENSIDAD HÚMEDA	gr/cm <sup>3</sup>	2.12	2.19
DENSIDAD SECA	gr/cm <sup>3</sup>	1.97	2.00
PESO UNITARIO SECO	kN/m <sup>3</sup>	19.31	19.64
	lb/ft <sup>3</sup>	122.91	125.01
		<b>PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</b>	
		20.70      kN/m <sup>3</sup>	
		2.111      gr/cm <sup>3</sup>	
		<b>HUMEDAD ÓPTIMA (%)</b>	
		8.6	
OBSERVACIONES:			
TESISTA		ENCARGADO DE LABORATORIO	
			

**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el ensayo Proctor modificado del suelo natural en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 21.

**Figura 25 — Determinación del Proctor modificado de suelo natural, C-3.**



		UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL												
MTC E - 132 / ASTM D-1883														
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.					Fecha:	19/12/2024							
Ensayo:	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)					Calicata:	C-3							
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac					Profundidad:	1.50 m							
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz					Ubicación	Carretera Tarampampa							
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	22		23		24									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO		SATURADO		NO SATURADO		SATURADO							
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12910.00	13050.00	12540.00	12790.00	12210.00	12530.00								
Peso de molde (g)	8180.00	8180.00	8160.00	8160.00	8120.00	8120.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4730.00	4870.00	4380.00	4630.00	4090.00	4410.00								
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	2.223	2.29	2.058	2.18	1.922	2.07								
Tara (N°)	C-1	R-4	C-2	C-3	R-3	C-1								
Peso suelo húmedo + tara (g)	208.8	280.9	250.10	275.8	256.80	294.31								
Peso suelo seco + tara (g)	195.1	255.31	233.30	243.8	239.10	255.81								
Peso tara (g)	36.49	36.02	38.13	34.5	35.55	36.48								
Peso de agua (g)	13.70	25.59	16.80	32.2	17.50	38.5								
Peso de suelo seco (g)	158.61	219.29	195.17	209.1	203.55	219.33								
Contenido de humedad (%)	8.64	11.67	8.61	15.40	8.60	17.55								
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.05	2.05	1.90	1.89	1.77	1.76								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN				
				mm	%		mm	%		mm	%			
18/11/24	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
19/11/24	15:30	24.00	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1			
20/11/24	15:30	48.00	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	14	0.140	0.1			
21/11/24	15:30	72.00	12	0.120	0.1	16	0.160	0.1	16	0.160	0.1			
22/11/24	15:30	96.00	16	0.160	0.1	20	0.200	0.2	22	0.220	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN	CARGA ESTAND.	MOLDE N° 22				MOLDE N° 23				MOLDE N° 24				
		mm	pulg.	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)
0.000	0.000		4	1.3	1.3		4	1.3	1.3		2	0.7	0.7	
0.635	0.025		56	18.7	18.7		36	12.0	12.0		12	4.0	4.0	
1.270	0.050		120	40.0	40.0		78	26.0	26.0		26	8.7	8.7	
1.905	0.075		186	62.0	62.0		120	40.0	40.0		40	13.3	13.3	
2.540	0.100	70.455	268	89.3	89.3	8.9	172	57.3	57.3	5.7	58	19.3	19.3	1.9
3.175	0.125		336	112.0	112.0		216	72.0	72.0		72	24.0	24.0	
3.810	0.150		384	128.0	128.0		246	82.0	82.0		82	27.3	27.3	
4.445	0.175		442	147.3	147.3		284	94.7	94.7		94	31.3	31.3	
5.080	0.200	105.680	478	159.3	159.3	10.6	306	102.0	102.0	6.8	102	34.0	34.0	2.3
7.620	0.300		570	190.0	190.0		366	122.0	122.0		120	40.0	40.0	
10.160	0.400		632	210.7	210.7		406	135.3	135.3		134	44.7	44.7	
12.700	0.500		696	232.0	232.0		446	148.7	148.7		148	49.3	49.3	
OBSERVACIONES:														
TESISTA						ENCARGADO DE LABORATORIO								
														

NOTA

La figura ilustra la metodología para el ensayo de CBR del suelo natural en la calicata C-3. El resumen de resultados de CBR se encuentra en la tabla 22.

Figura 26 — Ensayo de (Relación de Soporte de California) de suelo natural, C-3.



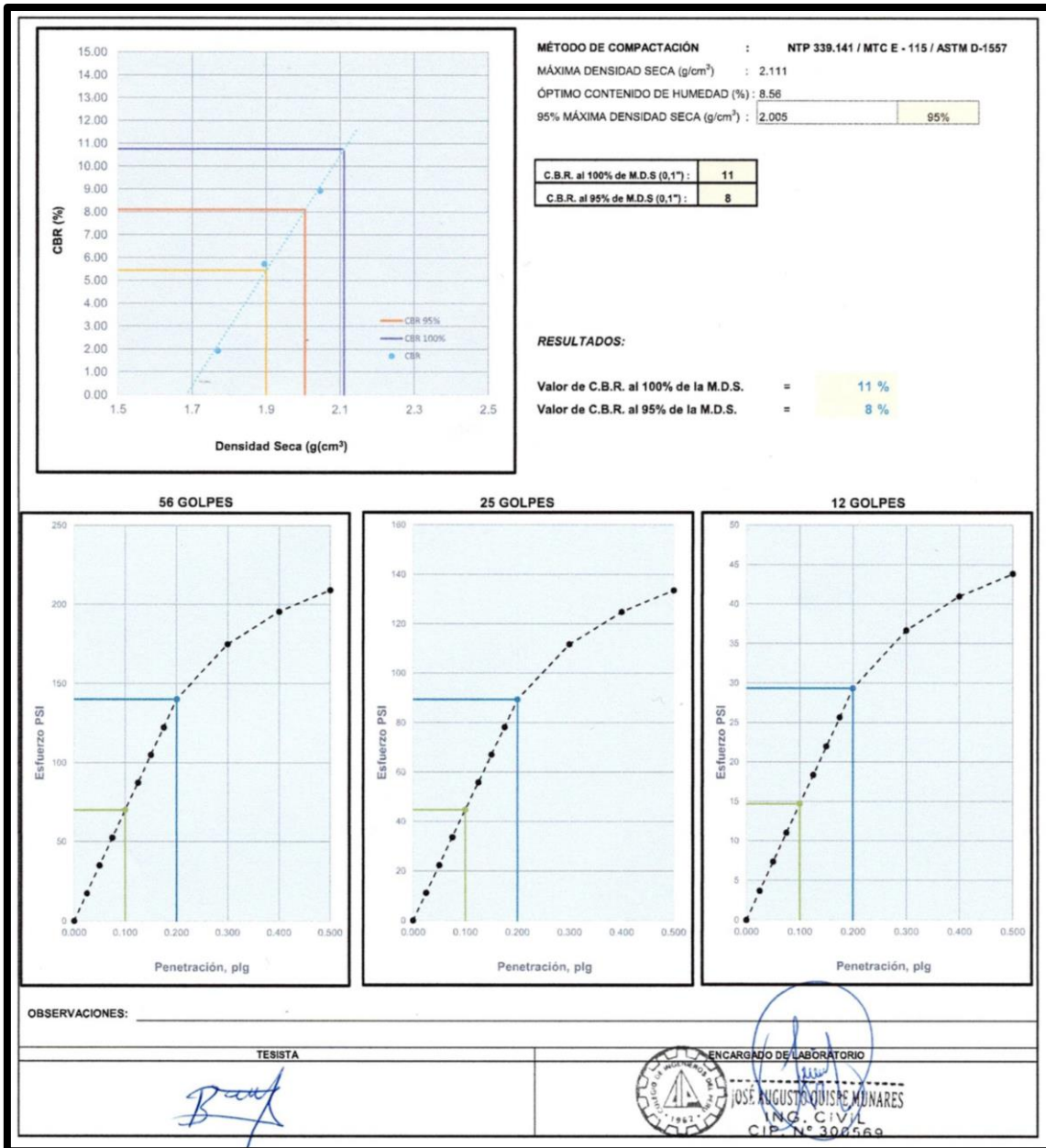
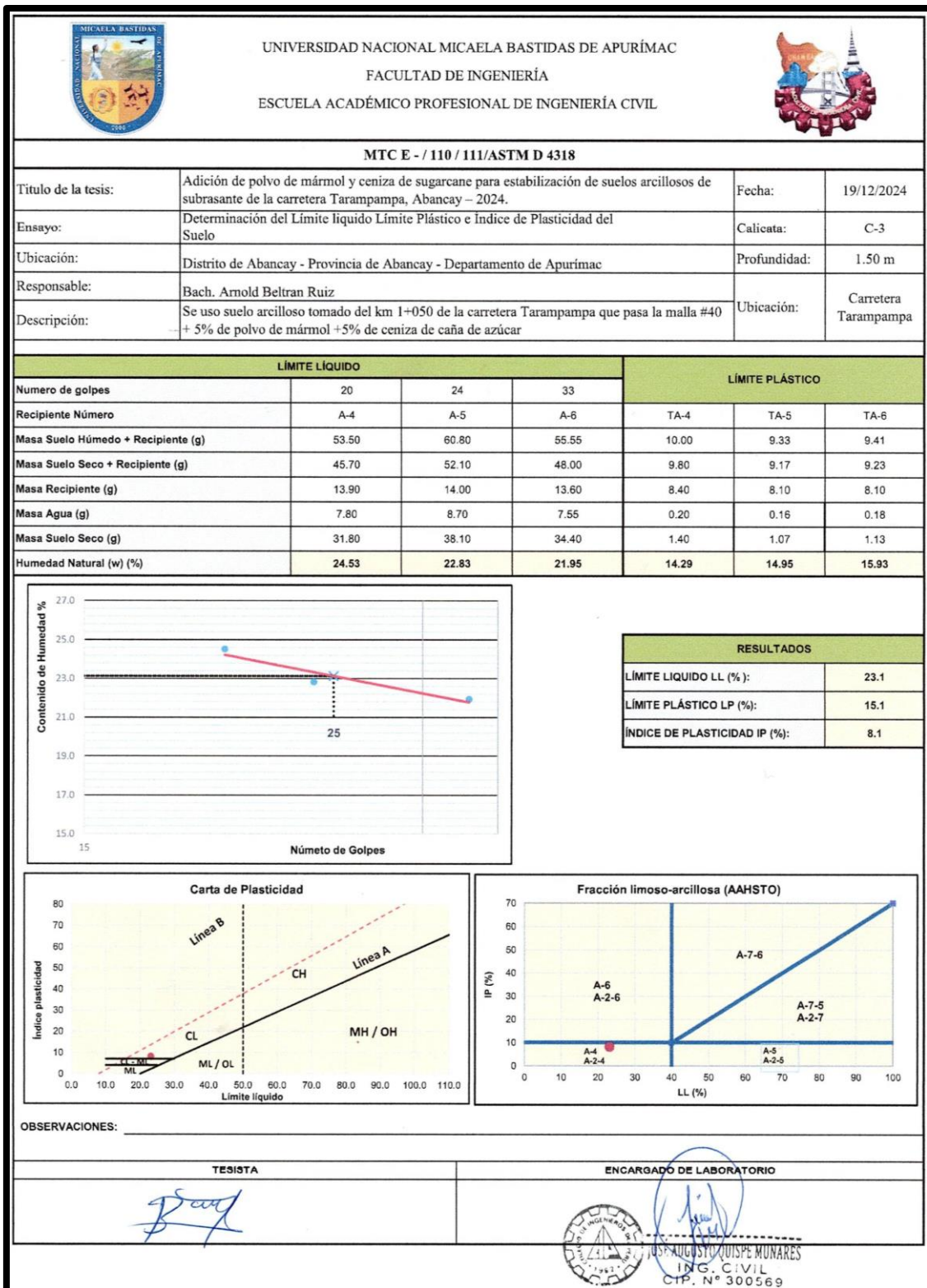


Figura 27 — Gráfico esfuerzo vs penetración de CBR de suelo natural, C-3.

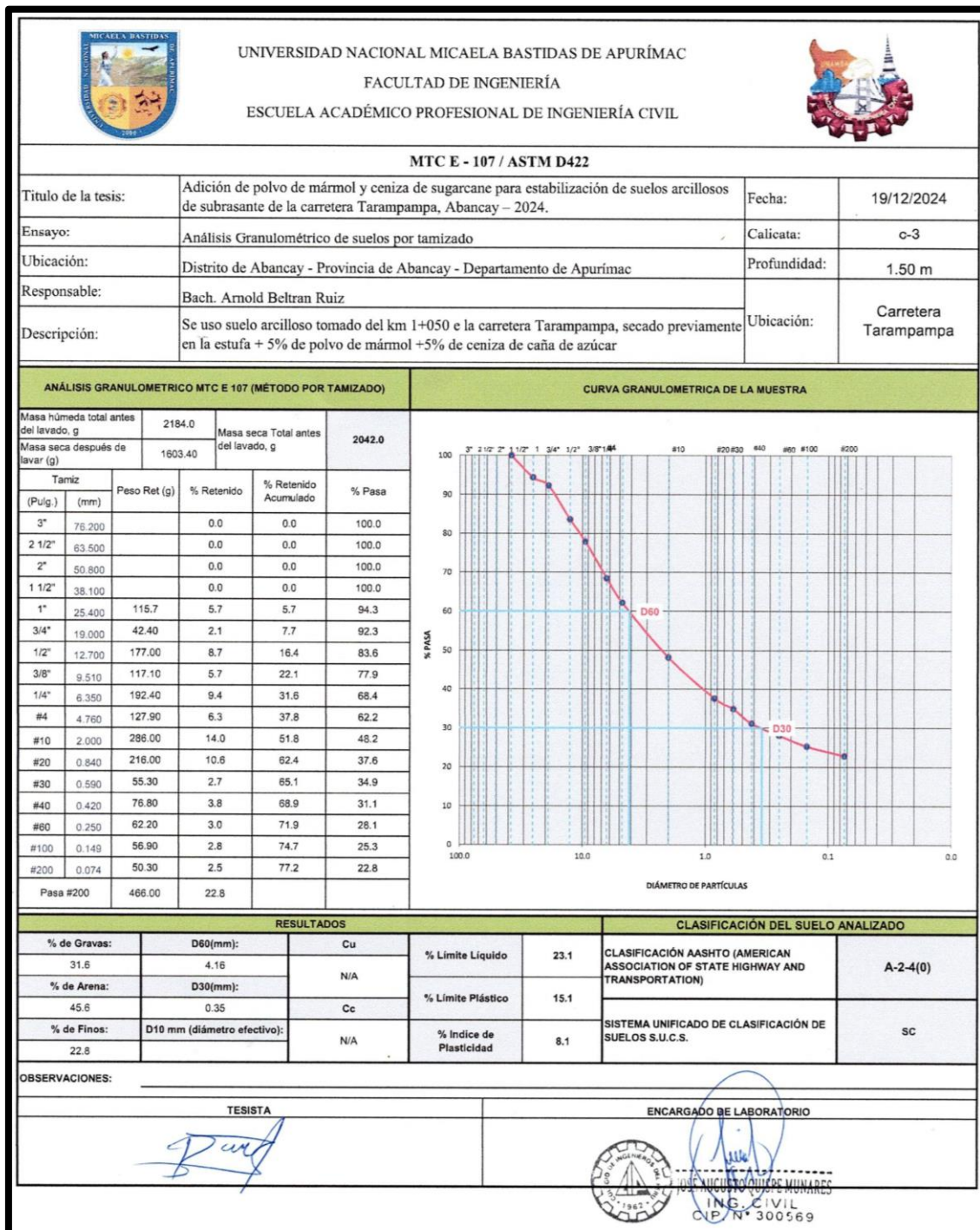


Nota

La figura ilustra la metodología para determinar los límites de Atterberg del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 18.

**Figura 28 — LL, LP e IP: C-3 + 5% PM + 5% ceniza sugarcane del suelo natural.**





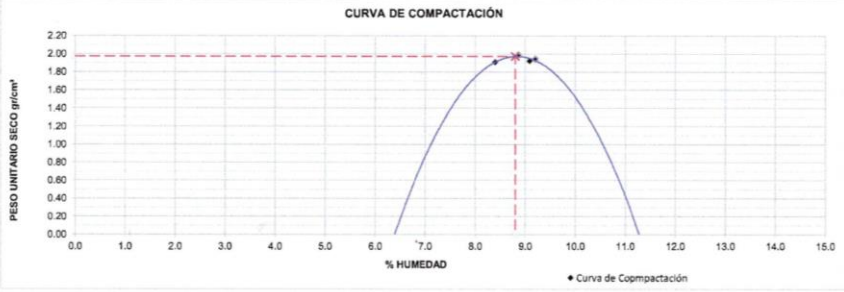




**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el análisis granulométrico y la clasificación de suelos natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 19 y tabla 20.

**Figura 29 — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.**



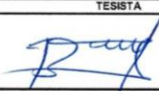



 UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
<b>MTC E - 115 / ASTM D-1557</b>			
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 e la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa + 5% de polvo de mármol +5% de ceniza de caña de azúcar		
<b>COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS</b>		<b>MÉTODO DE ENSAYO:</b>	
PRUEBA	Und	1	2
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	gr	6000	6000
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	56	56
NUMERO DE MOLDE	No	1	1
VOLUMEN MOLDE	cm <sup>3</sup>	2127	2127
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	10320	10440
MASA DEL MOLDE	gr	5920	5920
MASA MUESTRA HUMEDA	gr	4400	4520
<b>HUMEDAD DE COMPACTACIÓN</b>		<b>B</b>	
NUMERO DE RECIPIENTE	No	R-3	R-1
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	289.10	319.26
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	gr	269.30	295.10
MASA DEL MOLDE	gr	33.50	32.46
MASA DEL AGUA	gr	19.80	24.16
MASA DE LA MUESTRA SECA	gr	235.80	262.64
% de HUMEDAD	%	8.4	9.2
<b>DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECIMENES</b>		<b>R-8</b>	
DENSIDAD HÚMEDA	gr/cm <sup>3</sup>	2.07	2.13
DENSIDAD SECA	gr/cm <sup>3</sup>	1.91	1.95
PESO UNITARIO SECO	kN/m <sup>3</sup>	18.71	19.08
	lb/ft <sup>3</sup>	119.14	121.49
<b>CURVA DE COMPACTACIÓN</b>		<b>PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</b>	
		19.70	kN/m <sup>3</sup>
		2.009	gr/cm <sup>3</sup>
OBSERVACIONES:  		<b>HUMEDAD ÓPTIMA (%)</b>	
		8.8	
TESISTA		ENCARGADO DE LABORATORIO	
			

**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el ensayo Proctor modificado del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 21.

**Figura 30 — Proctor modificado de SN, C-3 + 5% PM + 5% ceniza de sugarcane.**



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC		FACULTAD DE INGENIERÍA		ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL													
<b>MTC E - 132 / ASTM D-1883</b>																	
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.			Fecha:	19/12/2024												
Ensayo:	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)			Calicata:	C-3												
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac			Profundidad:	1.50 m												
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz			Ubicación	Carretera Tarampampa												
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 e la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa + 5% de polvo de mármol +5% de ceniza de caña de azúcar																
<b>COMPACTACIÓN</b>																	
Molde N°	1		2		3												
Capas N°	5		5		5												
Golpes por Capa N°	56		25		12												
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO											
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11890.00	12000.00	11580.00	11780.00	11450.00	11750.00											
Peso de molde (g)	7300.00	7300.00	7370.00	7370.00	7330.00	7330.00											
Peso del Suelo húmedo (g)	4590.00	4700.00	4210.00	4410.00	4120.00	4420.00											
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00											
Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	2.157	2.21	1.978	2.07	1.936	2.08											
Tara (N°)	C-1	R-4	C-2	C-3	R-3	C-1											
Peso suelo húmedo + tara (g)	208.9	280.9	249.40	272.8	256.90	292.31											
Peso suelo seco + tara (g)	194.9	255.31	232.30	243.6	239.00	255.81											
Peso tara (g)	36.49	36.02	38.13	34.5	35.55	36.48											
Peso de agua (g)	14.00	25.59	17.10	29.2	17.90	36.5											
Peso de suelo seco (g)	158.41	219.29	194.17	209.1	203.45	219.33											
Contenido de humedad (%)	8.84	11.67	8.81	13.96	8.80	16.64											
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.98	1.98	1.82	1.82	1.78	1.78											
<b>EXPANSIÓN</b>																	
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN							
				mm	%		mm	%		mm	%						
18/11/24	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0						
19/11/24	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0						
20/11/24	15:30	48.00	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	10	0.100	0.1						
21/11/24	15:30	72.00	10	0.100	0.1	16	0.160	0.1	16	0.160	0.1						
22/11/24	15:30	96.00	14	0.140	0.1	18	0.180	0.2	20	0.200	0.2						
<b>PENETRACIÓN</b>																	
PENETRACIÓN	CARGA ESTAND.	MOLDE N°	1			2			3								
			lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido			
mm	pulg.	kg/cm2	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb	lb
0.000	0.000		4	1.3	1.3		4	1.3	1.3		2	0.7	0.7				
0.635	0.025		270	90.0	90.0		166	55.3	55.3		76	25.3	25.3				
1.270	0.050		578	192.7	192.7		354	118.0	118.0		162	54.0	54.0				
1.905	0.075		896	298.7	298.7		548	182.7	182.7		252	84.0	84.0				
2.540	0.100	70.455	1290	430.0	430.0	43.0	788	262.7	262.7	26.3	382	120.7	120.7	12.1			
3.175	0.125		1618	539.3	539.3		988	329.3	329.3		454	151.3	151.3				
3.810	0.150		1848	616.0	616.0		1128	376.0	376.0		518	172.7	172.7				
4.445	0.175		2128	709.3	709.3		1300	433.3	433.3		596	198.7	198.7				
5.080	0.200	105.690	2300	766.7	766.7	51.1	1404	468.0	468.0	31.2	646	215.3	215.3	14.4			
7.620	0.300		2742	914.0	914.0		1674	558.0	558.0		768	256.0	256.0				
10.160	0.400		3040	1013.3	1013.3		1856	618.7	618.7		852	284.0	284.0				
12.700	0.500		3348	1116.0	1116.0		2044	681.3	681.3		938	312.7	312.7				
OBSERVACIONES:																	
TESISTA						ENCARGADO DE LABORATORIO											
																	
																	
ING. CIVIL						CIP. N° 300569											

**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el ensayo de CBR del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de CBR se encuentra en la tabla 22.

**Figura 31 — CBR de SN, C-3 + 5% de PM + 5% de ceniza de sugarcane.**



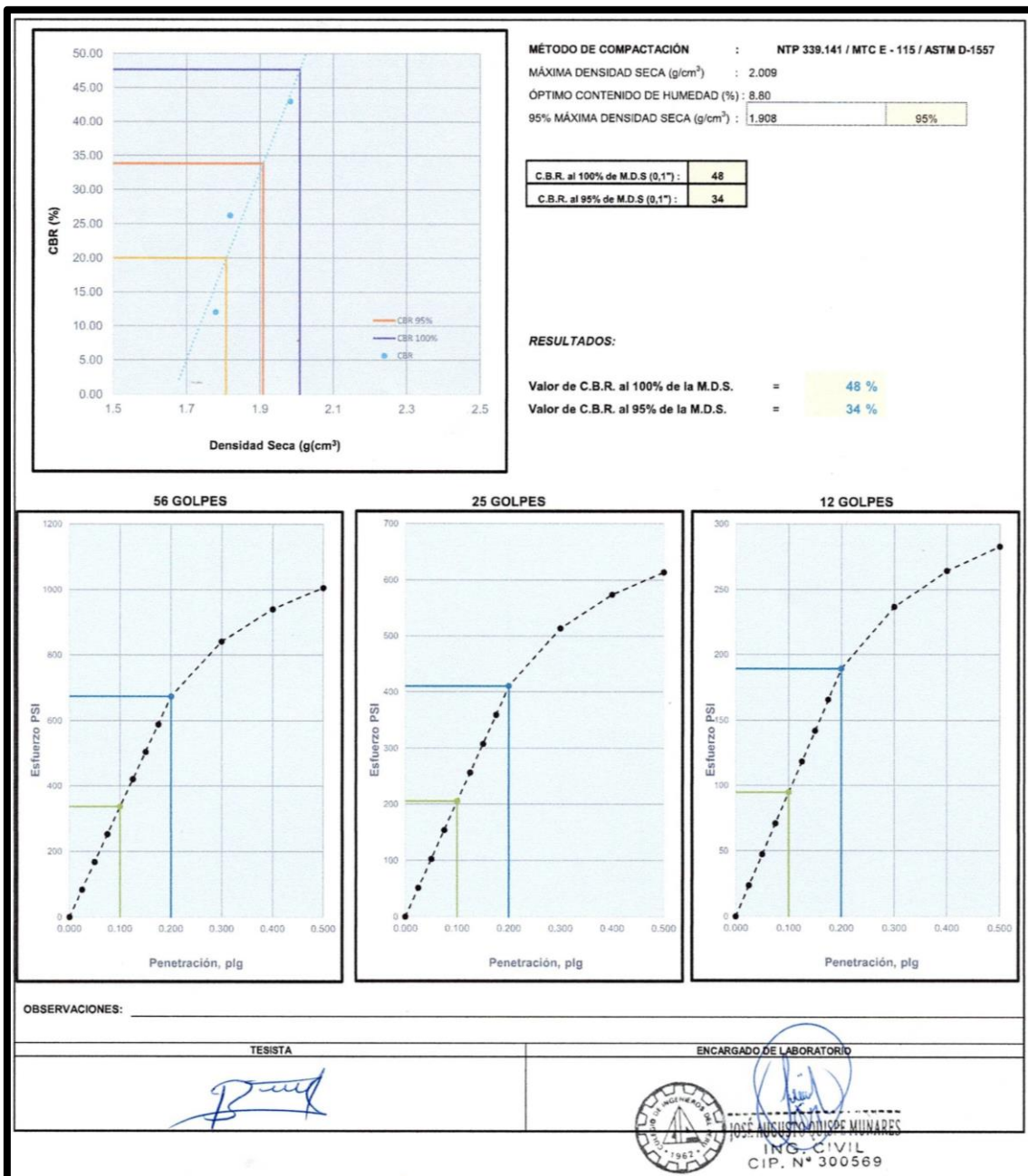




Figura 32 —Esfuerzo vs penetración del SN, C- 3 + 5% PM + 5% ceniza de sugarcane.





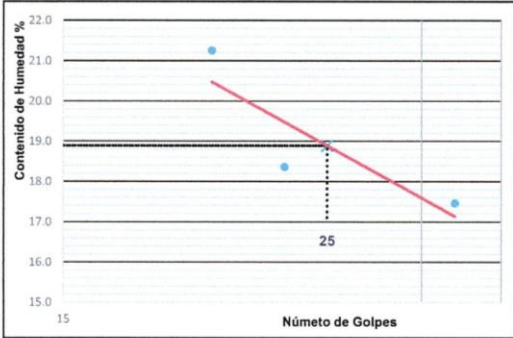
UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



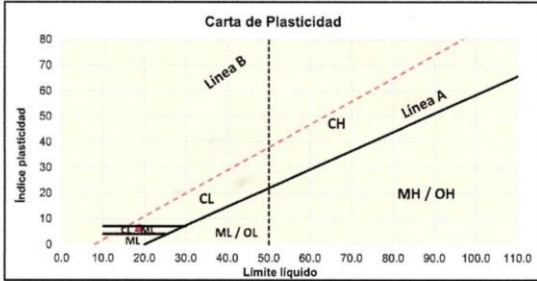
**MTC E - / 110 / 111/ASTM D 4318**

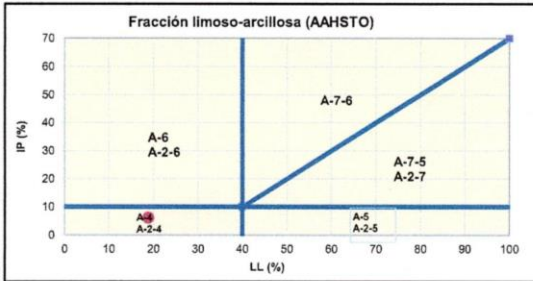
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Determinación del Límite líquido Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación:	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa que pasa la malla #40 + 7.5% de polvo de mármol +7.5% de ceniza de caña de azúcar		

LÍMITE LIQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
Numero de golpes	20	23	32	TA-4	TA-5	TA-6
Recipiente Número	A-4	A-5	A-6			
Masa Suelo Húmedo + Recipiente (g)	51.49	54.80	55.30	9.87	9.33	9.45
Masa Suelo Seco + Recipiente (g)	44.90	48.30	49.10	9.70	9.19	9.30
Masa Recipiente (g)	13.90	14.00	13.60	8.40	8.10	8.10
Masa Agua (g)	6.59	6.30	6.20	0.17	0.14	0.15
Masa Suelo Seco (g)	31.00	34.30	35.50	1.30	1.09	1.20
Humedad Natural (w) (%)	21.26	18.37	17.46	13.08	12.84	12.50

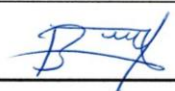




RESULTADOS	
LÍMITE LIQUIDO LL (%):	18.9
LÍMITE PLÁSTICO LP (%):	12.8
ÍNDICE DE PLASTICIDAD IP (%):	6.1





OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

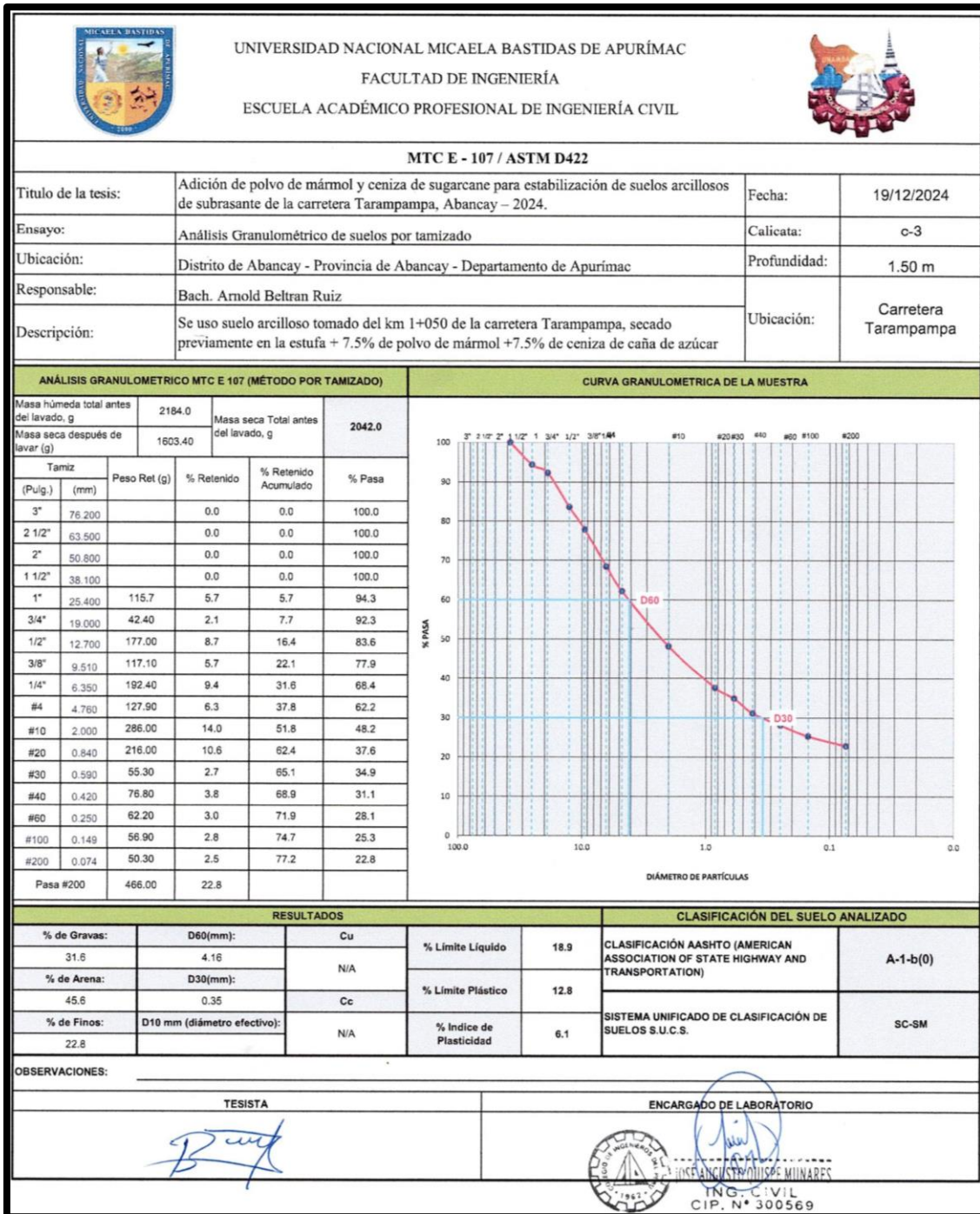
TESISTA	ENCARGADO DE LABORATORIO
	
	 INGENIERO CIVIL CIP. N° 300569

**NOTA**

La figura ilustra la metodología para determinar los límites de Atterberg del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 18.

**Figura 33 — LL, LP e IP del SN, C-3+ 7.5% de PM + 7.5% de ceniza de sugarcane.**





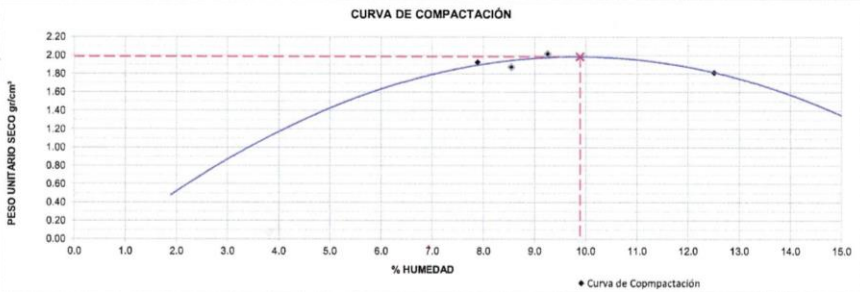

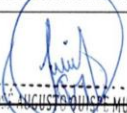
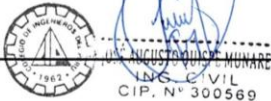


**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el análisis granulométrico y la clasificación de suelos natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 19 y tabla 20.

**Figura 34 — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.**



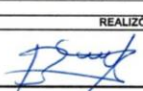



		UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL											
MTC E - 115 / ASTM D-1557													
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.			Fecha:	19/12/2024								
Ensayo:	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado			Calicata:	C-3								
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac			Profundidad:	1.50 m								
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz			Ubicación	Carretera Tarampampa								
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa + 7.5% de polvo de mármol +7.5% de ceniza de caña de azúcar												
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:									
PRUEBA	Und	1	2	3	4								
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	gr	6000	6000	6000	6000								
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	56	56	56	56								
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1								
VOLUMEN MOLDE	cm <sup>3</sup>	2127	2127	2127	2127								
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	10260	10250	10610	10340								
MASA DEL MOLDE	gr	5920	5920	5920	5920								
MASA MUESTRA HUMEDA	gr	4340	4330	4690	4420								
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN													
NUMERO DE RECIPIENTE	No	R-7	R-1	R-8	A-A								
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	385.60	415.00	462.20	224.30								
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	gr	351.40	388.70	429.50	210.50								
MASA DEL MOLDE	gr	78.00	80.70	76.10	35.49								
MASA DEL AGUA	gr	34.20	26.30	32.70	13.80								
MASA DE LA MUESTRA SECA	gr	273.40	308.00	353.40	175.01								
% de HUMEDAD	%	12.5	8.5	9.3	7.9								
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES													
DENSIDAD HÚMEDA	gr/cm <sup>3</sup>	2.04	2.04	2.20	2.08								
DENSIDAD SECA	gr/cm <sup>3</sup>	1.81	1.88	2.02	1.93								
PESO UNITARIO SECO	kN/m <sup>3</sup>	17.78	18.39	19.79	18.89								
	lbf/ft <sup>3</sup>	113.22	117.09	125.99	120.25								
CURVA DE COMPACTACIÓN				PESO UNITARIO SECO MÁXIMO									
				<table border="1"> <tr> <td>19.90</td> <td>kN/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>2.029</td> <td>gr/cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">HUMEDAD ÓPTIMA (%)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">9.9</td> </tr> </table>		19.90	kN/m <sup>3</sup>	2.029	gr/cm <sup>3</sup>	HUMEDAD ÓPTIMA (%)		9.9	
19.90	kN/m <sup>3</sup>												
2.029	gr/cm <sup>3</sup>												
HUMEDAD ÓPTIMA (%)													
9.9													
OBSERVACIONES:													
TESISTA			ENCARGADO DE LABORATORIO										
													
													

NOTA

La figura ilustra la metodología para el ensayo Proctor modificado del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 21.

**Figura 35 —Proctor modificado de SN, C-3 + 7.5% PM + 7.5% ceniza de sugarcane.**



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC		FACULTAD DE INGENIERÍA		ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL										
<b>MTC E - 132 / ASTM D-1883</b>														
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.			Fecha:	19/12/2024									
Ensayo:	Metodod de ensayo de CBR (Relacion de Soporte de California)			Calicata:	C-3									
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac			Profundidad:	1.50 m									
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz			Ubicación:	Carretera Tarampampa									
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa + 7.5% de polvo de mármol +7.5% de ceniza de caña de azúcar													
<b>COMPACTACIÓN</b>														
Molde N°	7		8		9									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11790.00	11920.00	11580.00	11620.00	11360.00	11430.00								
Peso de molde (g)	7300.00	7300.00	7370.00	7370.00	7330.00	7330.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4490.00	4620.00	4210.00	4250.00	4030.00	4100.00								
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	2.110	2.17	1.978	2.00	1.894	1.93								
Tara (N°)	R-1	R-4	C-2	C-3	R-3	C-1								
Peso suelo húmedo + tara (g)	219.5	394.9	252.60	388.8	253.00	355.6								
Peso suelo seco + tara (g)	203.9	352.1	234.30	343.6	234.30	304.7								
Peso tara (g)	36.48	36.02	38.13	34.5	35.55	36.48								
Peso de agua (g)	15.60	42.8	18.30	45.2	18.70	50.9								
Peso de suelo seco (g)	167.42	316.08	196.17	309.1	198.75	268.22								
Contenido de humedad (%)	9.32	13.54	9.33	14.62	9.41	18.98								
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.93	1.91	1.81	1.74	1.73	1.62								
<b>EXPANSIÓN</b>														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN				
				mm	%		mm	%		mm	%			
23/11/24	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
24/11/24	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
25/11/24	15:30	48.00	4	0.040	0.0	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1			
26/11/24	15:30	72.00	10	0.100	0.1	12	0.120	0.1	14	0.140	0.1			
27/11/24	15:30	96.00	14	0.140	0.1	16	0.160	0.1	18	0.180	0.2			
<b>PENETRACIÓN</b>														
PENETRACIÓN	CARGA ESTAND.	MOLDE N°	7			8			9					
			lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)			
0.000	0.000		2	0.7	0.7	2	0.7	0.7	2	0.7	0.7			
0.835	0.025		186	62.0	62.0	92	30.7	30.7	42	14.0	14.0			
1.270	0.050		630	210.0	210.0	310	103.3	103.3	140	46.7	46.7			
1.905	0.075		1306	435.3	435.3	640	213.3	213.3	288	96.0	96.0			
2.540	0.100	70.455	1948	649.3	649.3	64.9	956	318.7	318.7	31.9	430	143.3	143.3	14.3
3.175	0.125		2384	794.7	794.7		1170	390.0	390.0		526	175.3	175.3	
3.810	0.150		2698	899.3	899.3		1324	441.3	441.3		594	198.0	198.0	
4.445	0.175		2920	973.3	973.3		1432	477.3	477.3		644	214.7	214.7	
5.080	0.200	105.680	3404	1134.7	1134.7	75.6	1540	513.3	513.3	34.2	686	228.7	228.7	15.2
7.620	0.300		3628	1209.3	1209.3		1778	592.7	592.7		800	266.7	266.7	
10.160	0.400		4170	1390.0	1390.0		2044	681.3	681.3		918	306.0	306.0	
12.700	0.500		4700	1566.7	1566.7		2304	768.0	768.0		1034	344.7	344.7	
OBSERVACIONES:														
REALIZÓ						APROBO								
														
														

**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el ensayo de CBR del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 22.

**Figura 36 — CBR de suelo natural, C-3 + 7.5% de PM + 7.5% ceniza de sugarcane.**



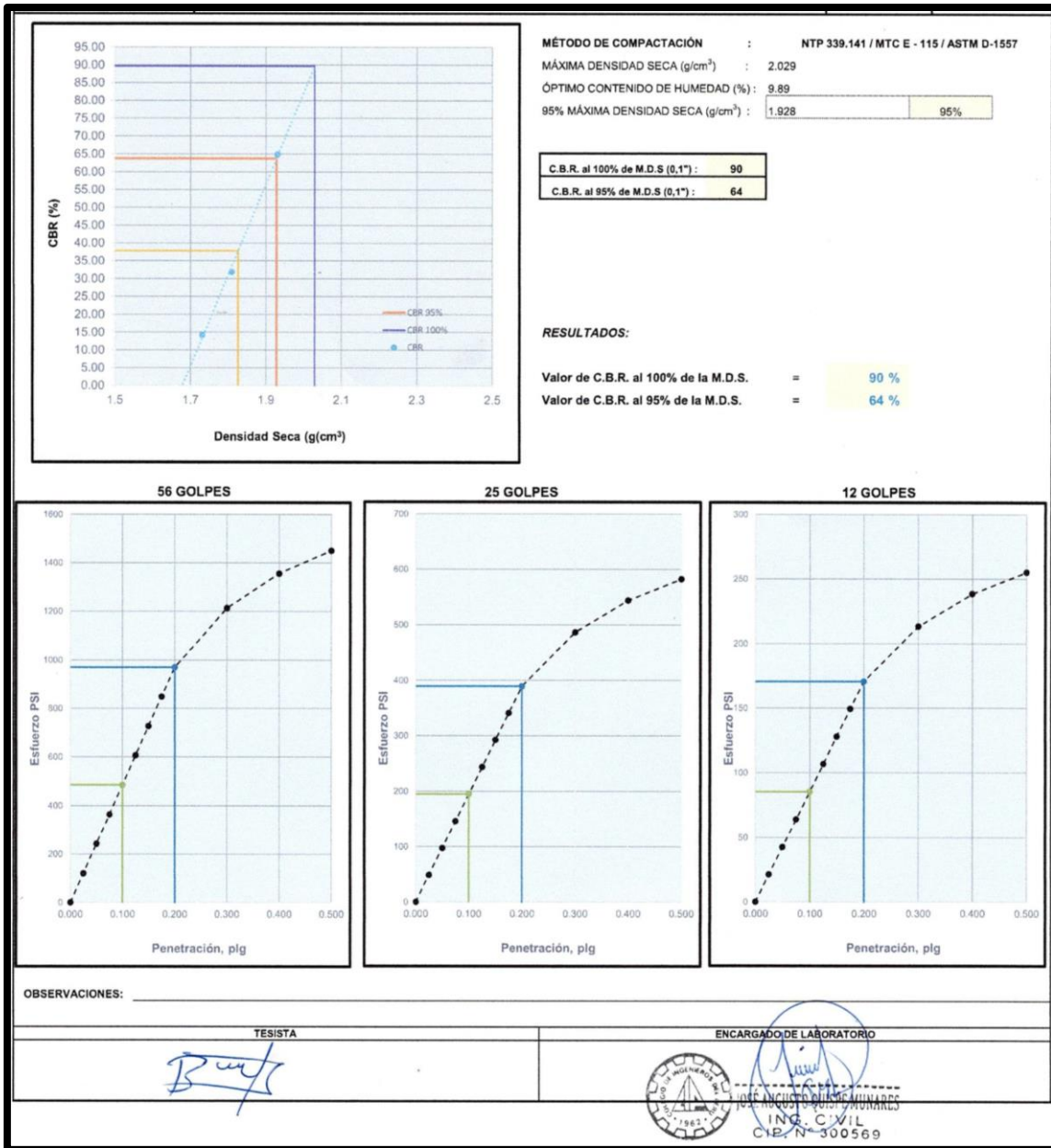
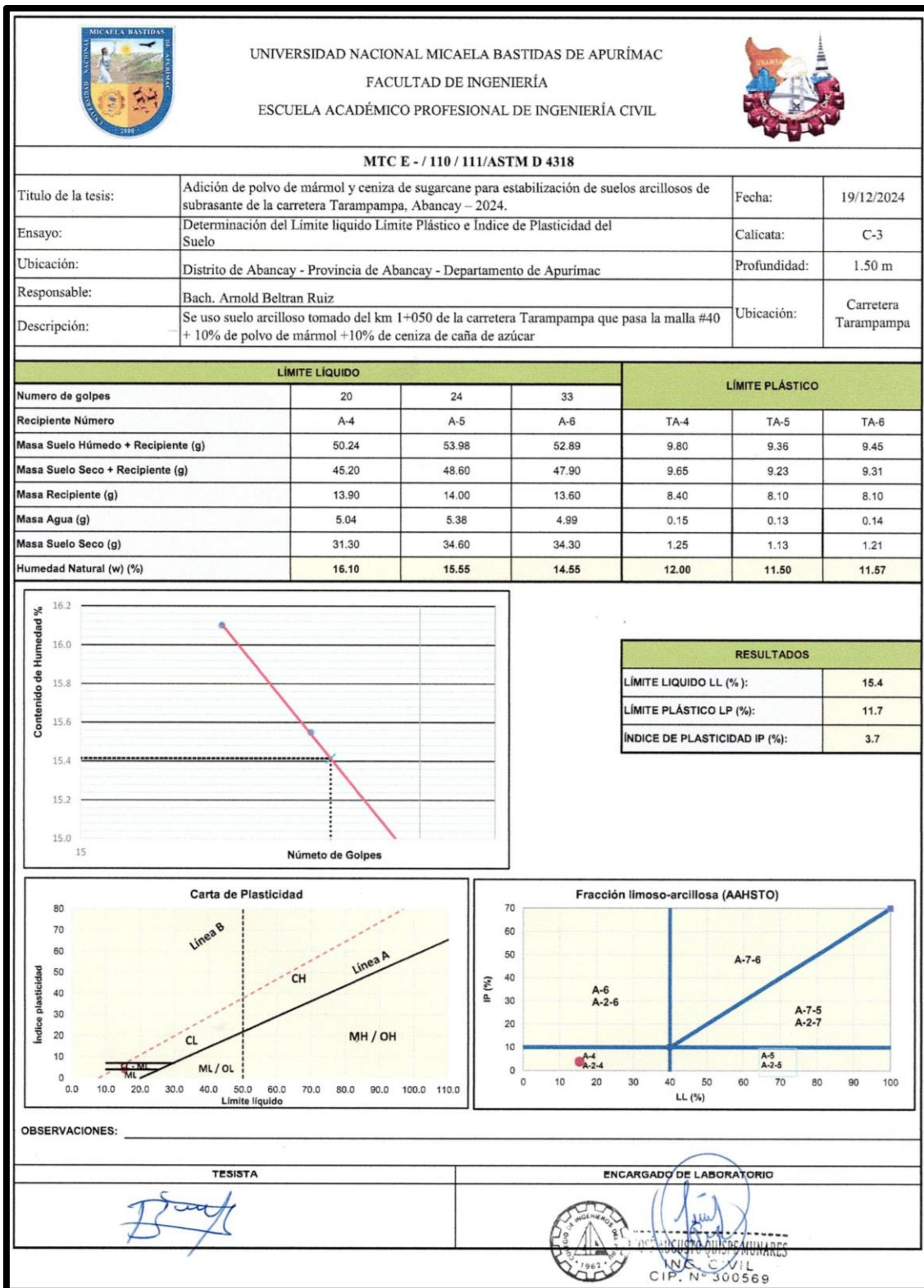


Figura 37 — Esfuerzo vs penetración CBR: C-3 + 7.5% PM + 7.5% ceniza sugarcane.



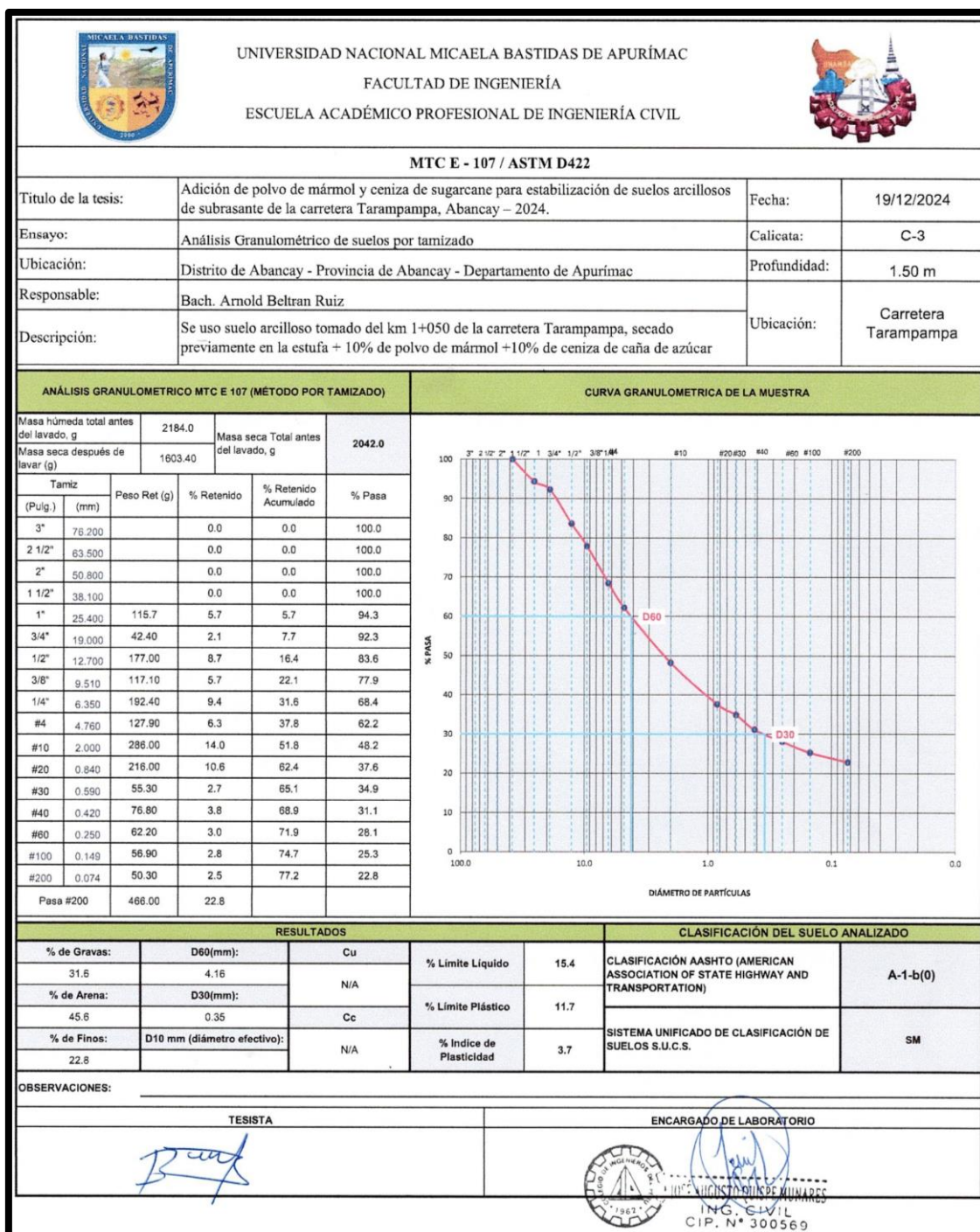


**NOTA**

La figura ilustra la metodología para determinar los límites de Atterberg del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 18.

**Figura 38** — LL, LP e IP del SN C-3+ 10% de PM + 10% de ceniza de *sugarcane*.





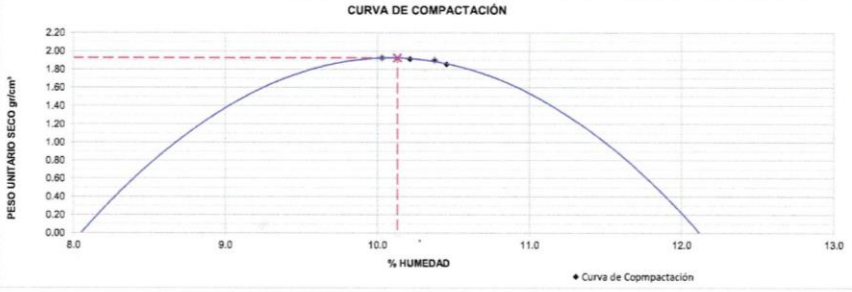




**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el análisis granulométrico y la clasificación de suelos natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 19 y tabla 20.

**Figura 39 — Análisis granulométrico de suelos por tamizado de suelo natural, C-3.**




 UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
<b>MTC E - 115 / ASTM D-1557</b>			
Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa +10% de polvo de mármol +10% de ceniza de caña de azúcar		
<b>COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS</b>		<b>MÉTODO DE ENSAYO:</b>	
PRUEBA	Und	1	2
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	gr	6000	6000
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	56	56
NUMERO DE MOLDE	No	1	1
VOLUMEN MOLDE	cm <sup>3</sup>	2127	2127
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	10280	10430
MASA DEL MOLDE	gr	5920	5920
MASA MUESTRA HUMEDA	gr	4360	4510
<b>HUMEDAD DE COMPACTACIÓN</b>		<b>MÉTODO DE ENSAYO:</b>	
NUMERO DE RECIPIENTE	No	R-7	R-8
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	gr	300.30	433.80
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	gr	282.60	401.50
MASA DEL MOLDE	gr	113.30	79.40
MASA DEL AGUA	gr	17.70	32.30
MASA DE LA MUESTRA SECA	gr	169.30	322.10
% de HUMEDAD	%	10.5	10.4
<b>DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES</b>			
DENSIDAD HÚMEDA	gr/cm <sup>3</sup>	2.05	2.12
DENSIDAD SECA	gr/cm <sup>3</sup>	1.86	1.93
PESO UNITARIO SECO	kN/m <sup>2</sup>	18.20	18.90
	lbf/ft <sup>2</sup>	115.85	120.31
<b>CURVA DE COMPACTACIÓN</b>		<b>PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</b>	
		19.30 kN/m <sup>2</sup>	
		1.968 gr/cm <sup>3</sup>	
OBSERVACIONES:  		<b>HUMEDAD ÓPTIMA (%)</b>	
		10.1	
TESISTA		ENCARGADO DE LABORATORIO	
		 JOSE AUGUSTO HUIPUMINARES ING. CIVIL CIP. N° 300569	

**NOTA**


La figura ilustra la metodología para el ensayo Proctor modificado del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de todas las calicatas se encuentra en la tabla 21.

**Figura 40** —Proctor modificado de SN, C-3 + 10% de PM + 10% de ceniza de sugarcane.





UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**MTC E - 132 / ASTM D-1883**

Título de la tesis:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024.	Fecha:	19/12/2024
Ensayo:	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)	Calicata:	C-3
Ubicación:	Distrito de Abancay - Provincia de Abancay - Departamento de Apurímac	Profundidad:	1.50 m.
Responsable:	Bach. Arnold Beltran Ruiz	Ubicación:	Carretera Tarampampa
Descripción:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 1+050 de la carretera Tarampampa, secado previamente en la estufa + 10% de polvo de mármol +10% de ceniza de caña de azúcar		

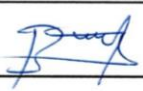
COMPACTACIÓN						
Molde N°	10		11		12	
Capas N°	5		5		5	
Gólpes por Capa N°	56		25		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11990.00	11930.00	11460.00	11710.00	11390.00	11750.00
Peso de molde (g)	7300.00	7300.00	7370.00	7370.00	7330.00	7330.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4390.00	4630.00	4090.00	4340.00	4060.00	4420.00
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00
Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	2.063	2.18	1.922	2.04	1.908	2.08
Tara (N°)	R-1	R-4	R-2	C-3	R-3	C-1
Peso suelo húmedo + tara (g)	210.8	289.9	258.90	278.8	263.10	299.38
Peso suelo seco + tara (g)	195.1	255.31	239.00	243.6	242.60	255.81
Peso tara (g)	36.49	36.02	38.13	34.5	35.55	36.48
Peso de agua (g)	15.70	34.59	19.90	35.2	20.50	43.57
Peso de suelo seco (g)	158.61	219.29	200.87	209.1	207.05	219.33
Contenido de humedad (%)	9.90	15.77	9.91	16.83	9.90	19.87
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.88	1.88	1.75	1.75	1.74	1.73

EXPANSIÓN											
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN	
				mm	%		mm	%		mm	%
18/11/24	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0
19/11/24	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0
20/11/24	15:30	48.00	6	0.060	0.1	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1
21/11/24	15:30	72.00	10	0.100	0.1	10	0.100	0.1	12	0.120	0.1
22/11/24	15:30	96.00	12	0.120	0.1	14	0.140	0.1	16	0.160	0.1


PENETRACIÓN																	
PENETRACIÓN	CARGA ESTAND.	MOLDE N°	10				11				12						
			lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido			
0.000	0.000		2	0.7	0.7					2	0.7	0.7					
0.635	0.025		154	51.3	51.3					24	8.0	8.0					
1.270	0.050		518	172.7	172.7					76	25.3	25.3					
1.905	0.075		1072	357.3	357.3					158	52.7	52.7					
2.540	0.100	70.455	1598	532.7	532.7	53.3	624	208.0	208.0	20.8	234	78.0	78.0	7.8			
3.175	0.125		1956	652.0	652.0						288	96.0	96.0				
3.810	0.150		2214	738.0	738.0						324	108.0	108.0				
4.445	0.175		2396	798.7	798.7						352	117.3	117.3				
5.080	0.200	105.680	2750	916.7	916.7	61.1	998	332.7	332.7	22.2	388	129.3	129.3	8.6			
7.620	0.300		2976	992.0	992.0						436	145.3	145.3				
10.160	0.400		3420	1140.0	1140.0						502	167.3	167.3				
12.700	0.500		3854	1284.7	1284.7						564	188.0	188.0				

Observaciones:

TESISTA



ENCARGADO DE LABORATORIO



**NOTA**

La figura ilustra la metodología para el ensayo de CBR del suelo natural más adición en la calicata C-3. El resumen de resultados de CBR se encuentra en la tabla 22.

**Figura 41 — Ensayo de CBR de SN, C-3 +10% de PM +10% de ceniza de sugarcane.**



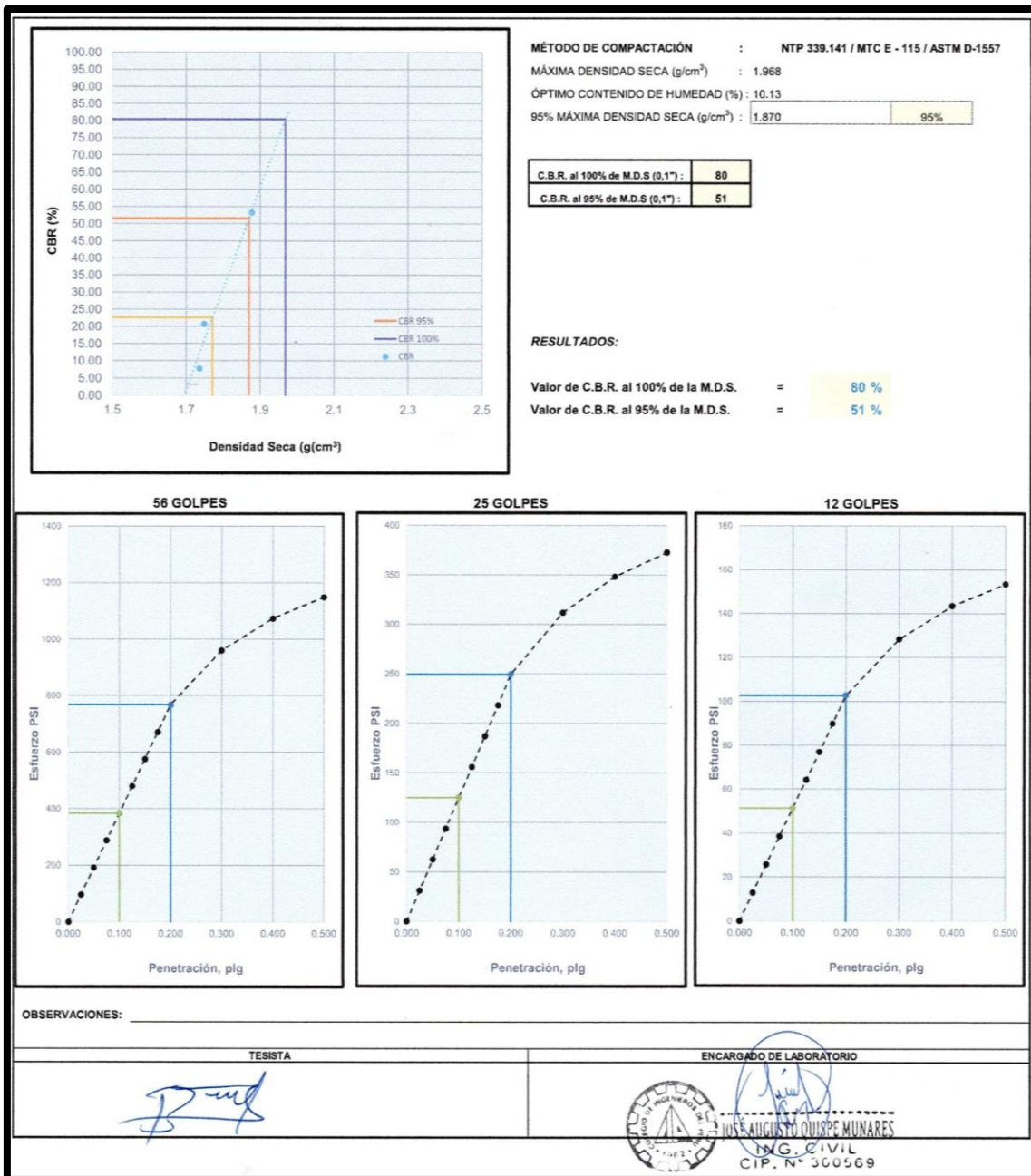


Figura 42 — E vs P, CBR, del SN, C- 3 + 10% de PM + 10% de ceniza de *sugarcane*.



## Anexo D

## (Certificado de validación de los instrumentos)

Tabla 27 — Resumen de valoración de instrumentos.

Baremación de datos obtenidos					
Criterios	Validación 01	Validación 02	Validación 03	Validación 04	Validación 05
Redacción	4	4	4	5	5
Claridad	5	4	5	5	4
Presentación	5	4	4	4	5
Validez técnica	4	4	4	4	4
Suficiencia	5	5	5	5	4
Pertinencia	5	4	4	5	5
Precisión	5	4	4	4	4
Organización	5	4	5	4	4
Coherencia	5	5	4	4	4
Metodología	5	5	4	5	5
Factibilidad	5	4	4	5	4
Reproducibilidad	4	4	5	4	4
Coeficiente de confiabilidad Alfa de Cronbach					
Validez nula	Validez muy baja	Validez baja	Validez aceptable	Validez buena	Validez muy buena
0.00 - 0.49	0.50 - 0.59	0.60 - 0.69	0.70 - 0.79	0.80 - 0.89	0.90 - 1.00

## NOTA

**Resultado Alcanzado:** El análisis de confiabilidad mediante el coeficiente Alfa de Cronbach arrojó un valor de 0.886, lo cual representa un nivel de validez buena. En consecuencia, el instrumento de investigación queda validado para su aplicación.

b). Valoración del experto 01

**FORMATO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1. Investigador:	Bach. Arnold Beltran Ruiz
1.2. Título de investigación:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.
1.3. Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
1.4. Experto:	<u>Erick Alarcón Camacho</u>
1.5. Grado académico:	<u>Doctor en Gestión Pública y Gobernabilidad</u>
1.6. Institución laboral:	<u>Universidad Tecnológica de los Andes</u>
1.7. Nombre del instrumento:	Contenido de humedad del suelo natural
	Determinación del Límite líquido (LL) y Límite plástico (LP)
	Análisis granulométrico por tamizado
	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado
	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**  
 Instrucciones: Marque con una X la valoración que considere pertinente para cada criterio según la siguiente escala:  
 1. Deficiente: Menos del 30% cumple con el criterio  
 2. Regular: Entre 30% y 70% cumple con el criterio  
 3. Bueno: Más del 70% cumple con el criterio  
 4. Muy Bueno: Más del 85% cumple con el criterio  
 5. Excelente: Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

ASPECTOS DE VALIDACIÓN INSTRUMENTAL			D	R	B	MB	E
COMPONENTE	INDICADORES	VALORACIÓN	1	2	3	4	5
FORMA	1. Redacción	El instrumento está redactado con lenguaje técnico apropiado para ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.				X	
	2. Claridad	Las instrucciones y parámetros a evaluar se expresan sin ambigüedades.					X
	3. Presentación	La estructura del formato facilita el registro ordenado de datos.					X
CONTENIDO	4. Validez técnica	Los parámetros evaluados son los adecuados según normas ASTM/AASHITO.				X	
	5. Suficiencia	Incluye todos los ensayos necesarios para caracterizar suelos.					X
	6. Pertinencia	Los parámetros medidos son relevantes para los objetivos de la investigación.					X
ESTRUCTURA	7. Precisión	Permite registrar con exactitud las variaciones en propiedades físico-mecánicas.					X
	8. Organización	Los ítems siguen una secuencia lógica según procedimientos estandarizados.					X
	9. Coherencia	Existe relación entre variables, dimensiones e indicadores.					X
APLICABILIDAD	10. Metodología	El diseño del instrumento responde adecuadamente al propósito investigativo.					X
	11. Factibilidad	El instrumento puede implementarse con equipamiento estándar de laboratorio de suelos.					X
	12. Reproducibilidad	Diferentes evaluadores pueden obtener resultados consistentes.					X
<b>CONTEO TOTAL</b>			A	B	C	D	E
						12	45

Coefficiente de validez  $\frac{A + B + C + D + E}{60} = 0.95$

Calificación Global Validez muy buena

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

El instrumento puede ser aplicado tal como está elaborado

El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

**V. Observaciones y/o sugerencias:**

Abancay, 03 de ENEYO del 2025.


Firma y Sello del experto  
  
 Erick Alarcón Camacho  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP: 84530

Figura 43 — Valoración del experto N° 01.



c). Valoración del experto 02

**FORMATO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1. Investigador:	Bach. Arnold Beltran Ruiz
1.2. Título de investigación:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.
1.3. Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
1.4. Experto:	Jinmer Bravo Apaza
1.5. Grado académico:	Magister
1.6. Institución laboral:	Universidad Nacional Micaela Bastidas De Apurímac
1.7. Nombre del instrumento:	Contenido de humedad del suelo natura
	Determinación del Límite líquido (LL) y Límite plástico(LP)
	Análisis granulométrico por tamizado ..... 5
	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado.....
	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de Californi.....

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**  
**Instrucciones:** Marque con una X la valoración que considere pertinente para cada criterio según la siguiente escala:  
**1. Deficiente:** Menos del 30% cumple con el criterio      **2. Regular:** Entre 30% y 70% cumple con el criterio  
**3. Bueno:** Más del 70% cumple con el criterio              **4. Muy Bueno:** Más del 85% cumple con el criterio  
**5. Excelente:** Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

ASPECTOS DE VALIDACIÓN INSTRUMENTAL			D	R	B	MB	E
COMPONENTE	INDICADORES	VALORACIÓN	1	2	3	4	5
FORMA	1. Redacción	El instrumento está redactado con lenguaje técnico apropiado para ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.				X	
	2. Claridad	Las instrucciones y parámetros a evaluar se expresan sin ambigüedades.				X	
	3. Presentación	La estructura del formato facilita el registro ordenado de datos.				X	
CONTENIDO	4. Validez técnica	Los parámetros evaluados son los adecuados según normas ASTM/AASHTO.				X	
	5. Suficiencia	Incluye todos los ensayos necesarios para caracterizar suelos.					X
	6. Pertinencia	Los parámetros medidos son relevantes para los objetivos de la investigación.				X	
ESTRUCTURA	7. Precisión	Permite registrar con exactitud las variaciones en propiedades físico-mecánicas.				X	
	8. Organización	Los ítems siguen una secuencia lógica según procedimientos estandarizados.				X	
	9. Coherencia	Existe relación entre variables, dimensiones e indicadores.					X
APLICABILIDAD	10. Metodología	El diseño del instrumento responde adecuadamente al propósito investigativo.					X
	11. Factibilidad	El instrumento puede implementarse con equipamiento estándar de laboratorio de suelos.				X	
	12. Reproducibilidad	Diferentes evaluadores pueden obtener resultados consistentes.				X	
<b>CONTEO TOTAL</b>						36	15

Coeficiente de validez:  $\frac{A + B + C + D + E}{60} = 0.85$

Calificación Global: Validez buena

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

El instrumento puede ser aplicado tal como está elaborado

El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

**V. Observaciones y/o sugerencias:**

Abancay, 05 de Enero del 2025.

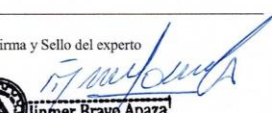

Firma y Sello del experto  
  


Figura 44 — Valoración del experto N° 02.

d). Valoración del experto 03

**FORMATO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1. Investigador:	Bach. Arnold Beltran Ruiz
1.2. Título de investigación:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.
1.3. Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
1.4. Experto:	Americo Huachaca Barazorda
1.5. Grado académico:	Mtro. en Ing. Civil con mención en dirección de Empresas de la Construcción
1.6. Institución laboral:	Municipalidad distrital de Huanipaca
1.7. Nombre del instrumento:	Contenido de humedad del suelo natura. ....
	Determinación del Límite líquido (LL) y Límite plástico (LP).....
	Análisis granulométrico por tamizado .....
	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado .....
	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California).....

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**  
**Instrucciones:** Marque con una X la valoración que considere pertinente para cada criterio según la siguiente escala:  
**1. Deficiente:** Menos del 30% cumple con el criterio      **2. Regular:** Entre 30% y 70% cumple con el criterio  
**3. Bueno:** Más del 70% cumple con el criterio      **4. Muy Bueno:** Más del 85% cumple con el criterio  
**5. Excelente:** Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

ASPECTOS DE VALIDACIÓN INSTRUMENTAL			D	R	B	MB	E
COMPONENTE	INDICADORES	VALORACIÓN	1	2	3	4	5
FORMA	1. Redacción	El instrumento está redactado con lenguaje técnico apropiado para ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.				X	
	2. Claridad	Las instrucciones y parámetros a evaluar se expresan sin ambigüedades.					X
	3. Presentación	La estructura del formato facilita el registro ordenado de datos.				X	
CONTENIDO	4. Validez técnica	Los parámetros evaluados son los adecuados según normas ASTM/AASHTO.				X	
	5. Suficiencia	Incluye todos los ensayos necesarios para caracterizar suelos.					X
	6. Pertinencia	Los parámetros medidos son relevantes para los objetivos de la investigación.				X	
ESTRUCTURA	7. Precisión	Permite registrar con exactitud las variaciones en propiedades físico-mecánicas.				X	
	8. Organización	Los ítems siguen una secuencia lógica según procedimientos estandarizados.					X
	9. Coherencia	Existe relación entre variables, dimensiones e indicadores.				X	
APLICABILIDAD	10. Metodología	El diseño del instrumento responde adecuadamente al propósito investigativo.				X	
	11. Factibilidad	El instrumento puede implementarse con equipamiento estándar de laboratorio de suelos.				X	
	12. Reproducibilidad	Diferentes evaluadores pueden obtener resultados consistentes.					X
<b>CONTEO TOTAL</b>			A	B	C	D	E
						32	20

Coefficiente de validez  $\frac{A+B+C+D+E}{60} = 0.87$

Calificación Global Validez Buena

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

El instrumento puede ser aplicado tal como está elaborado

El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

**V. Observaciones y/o sugerencias:**

Abancay, 04 de Enero del 2025.

Firma y Sello del experto

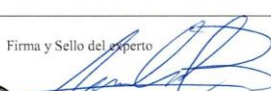

  


Figura 45 — Valoración del experto N° 03.

e). Valoración del experto 04

**FORMATO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1. Investigador:	Bach. Arnold Beltran Ruiz
1.2. Título de investigación:	Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay – 2024.
1.3. Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
1.4. Experto:	YHON FUENTES HUAMAN
1.5. Grado académico:	GERENCIA EN TECNOLOGIAS DE INFORMACION Y COMUNICACION
1.6. Institución laboral:	UNAMBA
1.7. Nombre del instrumento:	Contenido de humedad del suelo natural
	Determinación del Límite líquido (LL) y Límite plástico(LP)
	Análisis granulométrico por tamizado
	Ensayo modificado de compactación de Suelos usando Proctor Modificado
	Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**  
 Instrucciones: Marque con una X la valoración que considere pertinente para cada criterio según la siguiente escala:  
 1. Deficiente: Menos del 30% cumple con el criterio  
 2. Regular: Entre 30% y 70% cumple con el criterio  
 3. Bueno: Más del 70% cumple con el criterio  
 4. Muy Bueno: Más del 85% cumple con el criterio  
 5. Excelente: Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

ASPECTOS DE VALIDACIÓN INSTRUMENTAL			D	R	B	MB	E
COMPONENTE	INDICADORES	VALORACIÓN	1	2	3	4	5
FORMA	1. Redacción	El instrumento está redactado con lenguaje técnico apropiado para ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.					X
	2. Claridad	Las instrucciones y parámetros a evaluar se expresan sin ambigüedades.					X
	3. Presentación	La estructura del formato facilita el registro ordenado de datos.				X	
CONTENIDO	4. Validez técnica	Los parámetros evaluados son los adecuados según normas ASTM/AASHTO.				X	
	5. Suficiencia	Incluye todos los ensayos necesarios para caracterizar suelos.					X
	6. Pertinencia	Los parámetros medidos son relevantes para los objetivos de la investigación.					X
ESTRUCTURA	7. Precisión	Permite registrar con exactitud las variaciones en propiedades físico-mecánicas.				X	
	8. Organización	Los ítems siguen una secuencia lógica según procedimientos estandarizados.				X	
	9. Coherencia	Existe relación entre variables, dimensiones e indicadores.				X	
APLICABILIDAD	10. Metodología	El diseño del instrumento responde adecuadamente al propósito investigativo.					X
	11. Factibilidad	El instrumento puede implementarse con equipamiento estándar de laboratorio de suelos.					X
	12. Reproducibilidad	Diferentes evaluadores pueden obtener resultados consistentes.				X	
<b>CONTEO TOTAL</b>			A	B	C	D	E
						24	30

Coefficiente de validez  $\frac{A+B+C+D+E}{60} = 0.90$

Calificación Global Validez muy buena

Intervalos	Resultados
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 0.89	Validez buena
0.90 - 1.00	Validez muy buena

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

El instrumento puede ser aplicado tal como está elaborado

El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

**V. Observaciones y/o sugerencias:**

Abancay, 03 de Enero del 2025.

Firma y Sello del experto


  
 Mtro. Yhon Fuentes Huamán  
 CIP. 157661  
 DOCENTE

Figura 46 — Valoración del experto N° 04.





## ANEXO E.

### (Declaración jurada de originalidad y no plagio)


<b>DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD Y DE NO PLAGIO</b>	
<b>Tesista:</b>	
Yo, Bach. Arnold Beltrán Ruiz, identificado con DNI 75573996, egresado de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Civil - UNAMBA, autor de la tesis titulada: <b>"Adición de polvo de mármol y ceniza de <i>sugarcane</i> para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarapampa, Abancay - 2024"</b> .	
<b>DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:</b>	
El tema y contenido de tesis es original, siendo resultado de mi esfuerzo y trabajo personal, no ha sido copiado, no se han utilizado ideas, formulaciones, citas integradas al texto que no hayan sido sacadas de otras tesis, obras, artículos, memorias, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma exacta y clara su origen, fuente o autor, tanto en el cuerpo o texto, figuras, tablas u otro contenido protegido por derechos de autor o que no hayan sido debidamente citadas.	
En ese sentido, soy consciente de que la falta de respeto a los derechos de autor y plagiar son acciones que serán castigados mediante sanciones universitarias y/o legales.	
Me afirmo y me ratifico en lo expresado, en señal de lo cual firmo el presente documento en la ciudad de Abancay, a los 12 días del mes de 01 del 2025.	
	
<b>Tesista: Bach. Arnold Beltrán Ruiz</b> <b>DNI: 75573996</b>	

Figura 48 — Declaración jurada de originalidad y no plagio.

Anexo F.  
(Panel fotográfico)



Figura 49 — Recolección de muestras de suelo en campo.



Figura 50 — Ensayo de contenido de humedad del suelo natural.



Figura 51 — Ensayo del análisis granulométrico del suelo natural.



Figura 52 — Ensayo de los límites de Atterberg del suelo natural y con adiciones.




Figura 53 — Ensayo Proctor modificado del suelo natural y adiciones.



Figura 54 — Prueba de penetración, suelo con polvo de mármol y CBCA.


## Anexo G.

### (Autorización de consentimiento para realizar la investigación)



## MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE ABANCAY

"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA  
INDEPENDENCIA Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS  
DE JUNÍN Y AYACUCHO"



MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE  
ABANCAY

### CARTA N° 37-A-2024-AQA/MPA

A: SR. Bach. Arnold Beltran Ruiz

DE: ING. ANTONIO QUISPE ALZAMORA  
INSPECTOR DE DESARROLLO URBANO

ASUNTO: AUTORIZACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DE TESIS TITULADO  
"ADICIÓN DE POLVO DE MÁRMOL Y CENIZA DE SUGARCANE PARA  
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DE SUBRASANTE DE LA  
CARRETERA TARAMPAMPA, ABANCAY - 2024".

FECHA: Abancay; 24 de octubre del 2024

---


Por medio de la presente yo, ING. ANTONIO QUISPE ALZAMORA, en mi calidad de **inspector de desarrollo urbano de la Municipalidad Provincial de Abancay**, autorizo y proporciono la información necesaria al bachiller Arnold Beltrán Ruiz para la realización de su tesis titulada "**Adición de polvo de mármol y ceniza de sugarcane para estabilización de suelos arcillosos de subrasante de la carretera Tarampampa, Abancay - 2024**".

El estudiante está autorizado a llevar a cabo las actividades necesarias para la recopilación de información, observación de campo y cualquier información adicional que requiera, siempre en coordinación con la municipalidad y respetando el proceso administrativo correspondiente.


- Se solicita al estudiante que coordine previamente cualquier acceso a la carretera Tarampampa.
- Quedamos a disposición para cualquier consulta adicional que pueda surgir.

Sin otro particular, hago propicia la oportunidad para hacer llegar a usted mi saludo cordial.

**Atentamente**



Ing. Antonio Quispe Alzamora  
INSPECTOR DE DESARROLLO URBANO



Jr. Lima N° 206 - Abancay - Apurímac    www.muniabancay.gob.pe  
Central Telefónica: 083 - 321195    Email: alcaldia@muniabancay.gob.pe

Figura 55 — Autorización para ejecución de tesis.

## Anexo H.

### (Certificado de calibración de los equipos de laboratorio)

**LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR S.A.S.**  
 Carrera 104 B No. 18 - 26 Bogotá D.C. - Colombia  
 (+57 60 1) 745 4555 · Cel: 316 538 5810 - 317 423 3640  
 www.pinzuar.com.co




LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ISO/IEC 17025:2017  
 ILAC-068

**Certificado de Calibración - Laboratorio de Fuerza**  
*Calibration Certificate - Laboratory of Force*

**F-28988-002 R0**

Page / Pág. 1 de 5

---

<b>Equipo</b> <small>Instrument</small>	MÁQUINA DE ENSAYOS A COMPRESIÓN UNIAXIAL	<p>Los resultados emitidos en este Certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo corresponden al ítem que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.</p> <p>Este Certificado de Calibración documenta y asegura la trazabilidad de los resultados a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).</p> <p>El usuario es responsable de la Calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.</p> <p><i>The results issued in this Certificate relates to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates on page number one. The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.</i></p> <p><i>This Calibration Certificate documents and ensures the traceability of the reported results to national and international standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).</i></p> <p><i>The user is responsible for Calibration the measuring instruments at appropriate time intervals.</i></p>
<b>Fabricante</b> <small>Manufacturer</small>	PINZUAR	
<b>Modelo</b> <small>Model</small>	PS91/S0S0302	
<b>Número de Serie</b> <small>Serial Number</small>	123	
<b>Identificación Interna</b> <small>Internal Identification</small>	No presenta	
<b>Capacidad Máxima</b> <small>Maximum Capacity</small>	50 kN	
<b>Solicitante</b> <small>Customer</small>	LUNIX INGENIEROS S.R.L.	
<b>Dirección</b> <small>Address</small>	AV. ANTONIO SALAS BERTY NRO. 107 URB. CONDEBAMBA	
<b>Ciudad</b> <small>City</small>	APURIMAC - ABANCAY - ABANCAY	
<b>Fecha de Calibración</b> <small>Date of calibration</small>	2023 - 05 - 09	
<b>Fecha de Emisión</b> <small>Date of issue</small>	2023 - 05 - 16	
<b>Número de páginas del certificado, incluyendo anexos</b> <small>Number of pages of the certificate and documents attached</small>		05

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología Pinzuar no se puede reproducir el Certificado, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que las partes del Certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

*Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since it provides the security that the parts of the Certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.*

---

**Firmas que Autorizan el Certificado**  
Signatures Authorizing the Certificate



**Ing. Sergio Iyan Martinez**  
Director Laboratorio de Metrología



**Tecg. Jaiver López Poveda**  
Metrología Laboratorio de Metrología



---

**ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO**  
 Fuerza | Longitud | Masa | Par Torsional | Presión | Temperatura

Figura 56 — Certificado de calibración



**LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR S.A.S.**  
 Carrera 104 B No. 18 - 26 Bogotá D.C. - Colombia  
 (+57 60 1) 745 4555 · Cel: 316 538 5810 - 317 423 3640  
 www.pinzuar.com.co

LABORATORIO DE METROLOGÍA ISO/IEC 17025:2017  
11-LAC-034

**F-28988-002 R0**  
Pág. 2 de 8

---

**DATOS TÉCNICOS**

---

**Máquina de Ensayo Bajo Calibración**

<b>Clase</b>	1,0
<b>Dirección de Carga</b>	Compresión
<b>Tipo de Indicación</b>	Digital
<b>División de Escala</b>	0,1 kN
<b>Resolución</b>	0,1 kN
<b>Intervalo de Medición Calibrado</b>	Del 20 % al 100 % de la carga máxima.
<b>Límite Inferior de la Escala</b>	20 kN

---

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN**

---

La calibración se efectuó siguiendo los lineamientos establecidos en el documento de referencia ISO 7500-1:2018 Metallic materials - Calibration and verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Calibration and verification of the force-measuring system, en donde se especifica un intervalo de temperatura comprendido entre 10°C a 35°C, con una variación máxima de 2°C durante cada serie de medición. Se utilizó el método de comparación directa aplicando Fuerza Indicada Constante.

Se realizó una inspección general de la máquina y se determina que: Se puede continuar la calibración como se recibe el equipo

**Tabla 1.**  
Indicaciones como se entrega la máquina

Indicación del IBC		Indicaciones Registradas del Equipo Patrón para Cada Serie					Promedio S <sub>1, 2 y 3</sub> kN
		S <sub>1</sub> Ascendente kN	S <sub>2</sub> Ascendente kN	S <sub>2</sub> ' No Aplica ---	S <sub>3</sub> Ascendente kN	S <sub>4</sub> No Aplica ---	
20	10,0	9,997 2	9,990 2	---	9,991 2	---	9,992 9
30	15,0	14,998	14,991	---	14,995	---	14,994
40	20,0	19,993	19,992	---	19,990	---	19,992
50	25,0	24,992	24,987	---	24,988	---	24,989
60	30,0	29,978	29,988	---	29,980	---	29,982
70	35,0	34,963	34,978	---	34,968	---	34,970
80	40,0	39,957	39,960	---	39,950	---	39,955
90	45,0	45,018	44,990	---	44,970	---	44,993
100	50,0	49,925	49,930	---	49,945	---	49,933

LM-PC-05-F-01 R12.8

**ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO**  
 Fuerza | Longitud | Masa | Par Torsional | Presión | Temperatura

Figura 57 — Certificado de calibración

**LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR S.A.S.**

Carrera 104 B No. 18 - 26 Bogotá D.C. - Colombia  
 (+57 60 1) 745 4555 · Cel: 316 538 5810 - 317 423 3640  
 www.pinzuar.com.co



**F-28988-002 R0**

Pág. 3 de 5

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Continuación...**

**Tabla 2.**

Error realtivo de cero,  $f_0$ , calculado para cada serie de medición a partir de su cero residual

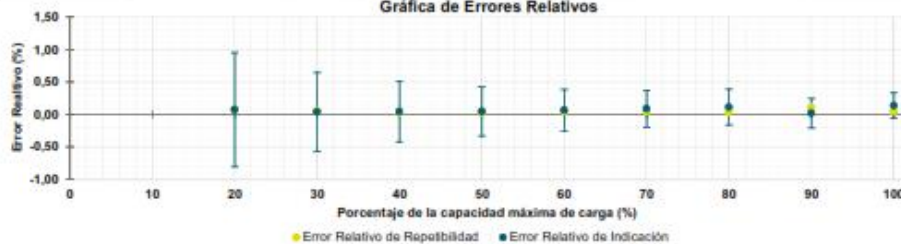
$f_{0,S1}$ %	$f_{0,S2}$ %	$f_{0,S2'}$ %	$f_{0,S3}$ %	$f_{0,S4}$ %
0,200	0,200	---	0,200	---

**Tabla 3.**

Resultados de la Calibración de la máquina de ensayo.

Indicación del IBC %	Indicación kN	Errores Relativos			Resolución Relativa a %	Incertidumbre Expandida U		$k_{p=95\%}$ -----
		Indicación q %	Repetibilidad b %	Reversibilidad v %		kN	%	
20	10,0	0,07	0,07	---	1,000	0,088	0,88	2,01
30	15,0	0,04	0,05	---	0,667	0,091	0,61	2,01
40	20,0	0,04	0,02	---	0,500	0,093	0,47	2,01
50	25,0	0,04	0,02	---	0,400	0,095	0,38	2,01
60	30,0	0,06	0,03	---	0,333	0,097	0,32	2,01
70	35,0	0,09	0,04	---	0,286	0,100	0,29	2,01
80	40,0	0,11	0,03	---	0,250	0,11	0,28	2,01
90	45,0	0,02	0,11	---	0,222	0,10	0,23	2,01
100	50,0	0,13	0,04	---	0,200	0,100	0,20	2,01

**Gráfica de Errores Relativos**



**CONDICIONES AMBIENTALES**

El lugar de la Calibración fue LABORATORIO de la empresa LINUX INGENIEROS S.R.L. ubicada en ABANCAY. Durante la Calibración se presentaron las siguientes condiciones ambientales.

Temperatura Ambiente Máxima:	19,5 °C	Temperatura Ambiente Mínima:	19,0 °C
Humedad Relativa Máxima:	63 % HR	Humedad Relativa Mínima:	60 % HR

LM-PC-05-F-01 R12.8

**ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO**  
 Fuerza | Longitud | Masa | Par Torsional | Presión | Temperatura

**Figura 58 — Certificado de calibración**



**LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR S.A.S.**

Carrera 104 B No. 18 - 26 Bogotá D.C. - Colombia  
 (+57 60 1) 745 4555 · Cel: 316 538 5810 - 317 423 3640  
 www.pinzuar.com.co



**F-28988-002 R0**

Pág. 4 de 5

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Continuación...**

**Tabla 4.**

Coefficientes para el cálculo de la fuerza en función de su deformación y su R<sup>2</sup>, el cual refleja la bondad del ajuste del modelo a la variable.

A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	---	R <sup>2</sup>
1,18730 E-02	9,97790 E-01	7,64935 E-05	-1,16498 E-06		1,0000 E00

Ecuación 1: donde F (kN) es la fuerza calculada y X (kN) es el valor de deformación evaluado

$$F = A_0 + (A_1 * X) + (A_2 * X^2) + (A_3 * X^3)$$

**Tabla 5.**

Valores calculados en función de la fuerza aplicada (kN)

Indicación kN	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
5,0	5,002 6	5,501 8	6,001 1	6,500 4	6,999 8
7,5	7,499 1	7,998 5	8,497 9	8,997 3	9,496 8
10,0	9,996 3	10,496	10,995	11,495	11,994
12,5	12,494	12,994	13,493	13,993	14,492
15,0	14,992	15,492	15,991	16,491	16,991
17,5	17,490	17,990	18,490	18,990	19,489
20,0	19,989	20,489	20,988	21,488	21,988
22,5	22,488	22,987	23,487	23,987	24,487
25,0	24,986	25,486	25,986	26,485	26,985
27,5	27,485	27,984	28,484	28,984	29,483
30,0	29,983	30,483	30,982	31,482	31,981
32,5	32,481	32,980	33,480	33,979	34,479
35,0	34,978	35,478	35,977	36,476	36,976
37,5	37,475	37,974	38,474	38,973	39,472
40,0	39,971	40,470	40,970	41,469	41,968
42,5	42,467	42,966	43,465	43,963	44,462
45,0	44,961	45,460	45,959	46,457	46,956
47,5	47,455	47,953	48,452	48,950	49,449
50,0	49,947				

**Tabla 6.**

Valores Residuales

Indicación del IBC kN	Promedio S1, 2 y 3 kN	Por Interpolación kN	Residuales kN
10,0	9,992 9	9,996 3	0,0
15,0	14,994	14,992	0,0
20,0	19,992	19,989	0,0
25,0	24,989	24,986	0,0
30,0	29,982	29,983	0,0
35,0	34,970	34,978	0,0
40,0	39,955	39,971	0,0
45,0	44,993	44,961	0,0
50,0	49,933	49,947	0,0

LM-PC-05-F-01 R12.6



**ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO**

Fuerza | Longitud | Masa | Par Torsional | Presión | Temperatura

**Figura 59 — Certificado de calibración**



**LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR S.A.S.**  
 Carrera 104 B No. 18 - 26 Bogotá D.C. - Colombia  
 (+57 60 1) 745 4555 · Cel: 316 538 5810 - 317 423 3640  
 www.pinzuar.com.co

LABORATORIO DE METROLOGÍA

**F-28988-002 RO**  
 Pág. 5 de 5

---

**INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN**

---

La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura  $k=2,011$  y la probabilidad de cobertura, la cual debe ser aproximada al 95% y no menor a este valor. La incertidumbre expandida fue estimada bajo los lineamientos del documento: JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement. First Edition. September 2008.

---


**TRAZABILIDAD**

---

Los resultados reportados en este certificado de calibración se obtuvieron utilizando patrones trazables al SI a través de institutos nacionales de metrología y/o laboratorios acreditados y son parte de un programa de aseguramiento metrológico que garantiza la exactitud e incertidumbres requeridas. El/Los certificado(s) de calibración de el/los patrón(es) usado(s) como referencia para la calibración en cuestión, que se mencionan en la página dos se pueden descargar accediendo al enlace en el código QR.

**Instrumento Patrón**

<b>Instrumento</b>	Transductor de Fuerza de 50 kN.
<b>Modelo</b>	U9B.
<b>Clase</b>	0,5.
<b>Número de Serie</b>	017423.
<b>Certificado de Calibración</b>	5186 del INM.
<b>Próxima Calibración</b>	2023-06-30.



---

**CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYO**

---

La siguiente Tabla proporciona los valores máximos permitidos, para los diferentes errores relativos del sistema de medición de fuerza y para la resolución relativa del indicador de fuerza que caracteriza una escala de la máquina de ensayo de acuerdo con la clase apropiada para sus ensayos según la sección 7 de la Norma ISO 7500-1:2018 Metallic materials - Calibration and verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Calibration and verification of the force-measuring system

Clase de la escala de la máquina	Indicación	Repetibilidad	Reversibilidad*	Cero	Resolución relativa
0,5	0,5	0,5	0,75	0,05	0,25
1	1	1	1,5	0,1	0,5
2	2	2	3	0,2	1
3	3	3	4,5	0,3	1,5

\*El error realtivo de reversibilidad se determina solamente cuando es previamente solicitado por el cliente.

---

**OBSERVACIONES**

---

1. Se emplea la coma (,) como separador decimal.
2. En cualquier caso, la máquina debe calibrarse si se realiza un cambio de ubicación que requiera desmontaje, o si se somete a ajustes o reparaciones importantes. Numeral 9. ISO 7500-1:2018
3. Con el presente Certificado de Calibración se adjunta la etiqueta de Calibración No. F-28988-002

*Fin del Certificado*

LM-PC-05-F-01 R12.8

**ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO**  
 Fuerza | Longitud | Masa | Par Torsional | Presión | Temperatura

Figura 60 — Certificado de calibración

