



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

---

## “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL”

---

**Presentado por:**

Bach. Christian Alexander Delgado Rivera

Bach. Victor Daniel Mormontoy Peñalba

**Para Optar el Título Profesional de  
Ingeniero Civil**

**Asesor:**

Mg. Ing. Eigner Román Villegas

**CUSCO – PERÚ**

**2021**



## DEDICATORIA

Con cariño a mis padres Walter Delgado Quiñones y Margot Eliana Rivera Flores, por orientarme durante toda mi vida, por la paciencia, comprensión y amor que me brindan día a día.

Por la calidad de seres humanos que ellos son y el gran ejemplo que representan en mi vida.

A mis abuelas Agustina Quiñones y Juana Flores Loayza que son el incentivo que tengo en todo momento. A mis familiares que siempre están preocupándose por mí, que me ayudaron de distintas formas y, por último, pero no menos importante a todas mis amistades que me brindaron su cariño, apoyo y consejos en toda esta etapa. A todos ellos muchas gracias.

**Christian Alexander Delgado Rivera**

Con mucho cariño a mis padres Edilberto Mormontoy Torres y Juana Peñalba Sumire, a quienes les debo una gratitud eterna por darme la oportunidad de convertirme en profesional y haberme acompañado en todo momento de mi vida, siendo ellos el principal cimiento de todos mis méritos conseguidos. A mi sobrina Carmen Antonella, a quien amo infinitamente, y es una fuente de inspiración constante en mi vida. A Edyeni y Gian Carlo, quienes fueron mis segundos padres, y me brindaron su apoyo y confianza.

Agradezco infinitamente a Dios, que me llenó de bendiciones y puso a las personas correctas en mi vida.

**Victor Daniel Mormontoy Peñalba**



## AGRADECIMIENTOS

A Dios, que hizo posible el culminar nuestros estudios de forma satisfactoria, guiándonos por el camino correcto.

A nuestros padres, por su amor infinito y el apoyo incondicional que nos brindan.

A la Universidad Andina del Cusco, y especialmente a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, que fue nuestra casa de estudios a lo largo de nuestra vida universitaria, que recordamos con mucho cariño como la fuente de nuestro conocimiento profesional.

A nuestro asesor Mg. Roman Villegas, Eigner, por el conocimiento que brindó en la realización de la investigación y que fue indispensable para culminarla satisfactoriamente.

Al Ing. Deza Cavero, Julio Benjamin, que fue un apoyo constante y fundamental a lo largo de la presente investigación.

A nuestros familiares y amigos, quienes estuvieron en nuestro paso por la vida universitaria.

Christian - Daniel



## RESUMEN

El principal propósito de la presente investigación es demostrar que se pueden mejorar las propiedades físico - mecánicas de un suelo arcilloso con características muy bajas, siendo la muestra tomada del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, y convertirlo en un suelo apto a nivel de subrasante mediante una estabilización con cal, como agente estabilizador principal, y Ceniza de Mazorca de Maíz, como agente estabilizador secundario, los cuales fueron añadidos en distintos porcentajes cumpliendo los parámetros exigidos en las normas peruanas. Se verificó la mejora de propiedades mediante ensayos de laboratorio, tales como: ensayos de límites de consistencia, relación humedad – densidad (Proctor modificado) y capacidad de soporte CBR, los cuales fueron hechos bajo la tutela y parámetros del Manual de Ensayos de Materiales (2016).

Por otro lado, en la presente investigación, se pudo comprobar que las cenizas volantes, es un aditivo estabilizador que complementa de manera significativa a la cal en la estabilización de suelos arcillosos, y dar especial énfasis en que se pudo obtener estas cenizas volantes a partir de una materia prima que abunda en nuestra región, como es la ceniza de mazorca de maíz.

La investigación tiene un enfoque cuantitativo dado que, pudimos demostrar la hipótesis propuesta experimentalmente mediante cuantificadores de las variables, teniendo como premisa una cuantificación del suelo en estado natural.

La investigación propone un análisis de las propiedades físico – mecánicas del suelo en estado natural, suelo natural + 5% de Cal, suelo natural + 5% de Cal + 1% de CMM, suelo natural + 5% de Cal + 2% de CMM, y suelo natural + 5% de Cal + 3% de CMM, que contó con un total de 72 ensayos de laboratorio y con los cuales se pudo determinar una mejora progresiva en las propiedades físico – mecánicas a medida que se aumentó ceniza de mazorca de maíz, teniendo como mejor resultado el suelo natural + 5% de Cal + 3% de CMM, donde se aprecia el valor más alto de densidad seca máxima ( $1.725 \text{ gr/cm}^3$ ) y la capacidad de soporte CBR con un valor de 12.84%, que triplicó su valor respecto al CBR del suelo natural, haciendo que este sea recategorizado como una subrasante buena ( $S_3$ ) según el Manual de Carreteras (2013). Un agente de estas mejoras, es la composición química de la ceniza de mazorca de maíz, que tiene gran porcentaje de sílice (41.40%), magnesio (29.30%), calcio (10.20%) y otros, que favorecen a la estabilización del suelo.

Palabras Claves: propiedades físico-mecánicas, sub - rasante, ceniza de mazorca de maíz, cal, cenizas volantes, CBR, densidad seca máxima, suelos arcillosos.



## ABSTRACT

The main purpose of this investigation is to demonstrate that the properties physical and mechanical of clay soils with lower characteristics can improve, be the sample taken from Km 04+500 at Via Expresa of Cusco, turn into an adequate soil for the subgrade trough stabilization with lime as and principal agent and corn cob ash as a secondary stabilizer agent, adding both of them in different amounts according to the parameters of the Peruvian technical regulations. It was verified the improvement of the properties using laboratory tests as consistency limits, humidity- density ratio, CBR under the guidelines of the “Manual de Ensayo de Materiales (2016)”

This thesis proved that the corn cob ashes is an important stabilizer additive that complements significantly the lime in the stabilization process of clay soils, and no less emphasizes the fact that ashes can be found in huge amounts in our region from the cornfields as a prime recourse.

The main focus of the investigation is quantitative given that it demonstrates the proposal hypothesis experimentally through the quantification of variables, having as a baseline the quantification of the natural soil status.

The investigation proposes an analysis of the physical and mechanical properties of the natural soil, natural soil+ 5% of lime, natural soil + 5% lime + 1% ash, natural soil + 5% lime +2% ash, and natural Soil + 5% lime + 3% ash. In total were 72 lab tests that establish the progressive improvement of the physical and mechanical properties of the soil applying the ashes, having the best results with the natural soil + 5% lime + 3 % ash, with the highest maximum dry density value of 1.725 gr/cm<sup>3</sup> and the CBR of 12.84% that increases three times the value from the CBR of natural soil, categorizing the subgrade as good (S3) according to “Manual de Carreteras (2013).

The agent of this improvement is the chemical composition of the corn cob ash having silica (41.40%), magnesium(29.30%), calcium (10.20%), and others that support the stabilization of the soil

Key words: Physical and mechanical properties, Subgrade, Corn cob ash, Lime, CBR, Maximum dry density, clay soils



## INTRODUCCIÓN

La geología en el Perú es muy cambiante, puesto que existe una gran variedad de tipos de suelos, pero para la construcción de obras civiles es poco recomendable el uso de espacios con depósitos arcillosos, por lo que generalmente se tiende a estabilizar ese tipo de suelos o en el peor de los casos estos son sustituidos dependiendo de muchos factores ya sean físicos, meteorológicos y/o económicos.

Por lo que nuestro tema “Estabilización de suelos arcillosos con adición de ceniza de mazorca de maíz y cal” busca tener un aditivo que sea de fácil acceso y sea rentable a la vez en nuestro país, ya que normalmente se usa como aditivo la Cal para este tipo de estabilizaciones; la mazorca de maíz en su mayoría tiene un uso como combustible alternativo en las zonas donde se siembra y cosecha el maíz, por tanto, se podría dar un uso adicional a los restos de dicho combustible.

Para esta investigación se usó la ceniza de mazorca de maíz a ciertas condiciones que se especifican más adelante, puesto que si estas cambiaban en algún sentido en resultado del análisis químico - mineralógico hubiera sido otro al que se detalla en los anexos; cabe resaltar que para fines de sustitución del suelo natural con cal y ceniza de mazorca de maíz se tuvo como límite los parámetros que nos indican el manual de ensayos de materiales del MTC como si solo se tratase de Cal en general, ya que el otro aditivo que usamos no se encuentra reglamentado hasta ahora, puesto que es un aditivo que nosotros recién estamos analizando.

Este trabajo de investigación tiene el siguiente orden:

Capítulo I: Tiene como título principal el planteamiento del problema donde se ahonda la identificación del problema, justificación e importancia, limitaciones, objetivos generales y específicos de la investigación.

Capítulo II: Este capítulo se detalla los antecedentes a nivel nacional como internacional, conceptos básicos tales como suelos, estabilizaciones, pavimentos, Cal, mazorca de maíz, entre otros; todo esto con el fin de tener mayor conocimiento y así entender mejor el tema de la investigación.

Capítulo III: Tiene como fin detallar aspectos como el enfoque, nivel o alcance, método, población, muestra, instrumentos de la investigación; así también como la forma como se recolectó, procesamiento y presentación de los datos y/o ensayos.

Capítulo IV: En este capítulo podemos observar los resultados que se obtuvieron a base de los datos procesados estadísticamente y haciendo uso de diferentes tablas de los datos procesados



en el anterior capítulo.

Capítulo V: Por último, se hizo un contraste de los resultados obtenidos en el capítulo IV, de manera individual dando a conocer las conclusiones que pudimos observar en el transcurso de la investigación.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I</b> .....	25
<b>1. Planteamiento del Problema</b> .....	25
1.1. Identificación del Problema.....	25
1.1.1. Descripción del Problema .....	25
1.1.2. Formulación Interrogativa del Problema.....	27
1.1.2.1. <b>Formulación Interrogativa del Problema General</b> .....	27
1.1.3. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos .....	27
1.1.3.1. <b>Formulación Interrogativa del Problema Específico N°01</b> .....	27
1.1.3.2. <b>Formulación Interrogativa del Problema Específico N°02</b> .....	27
1.1.3.3. <b>Formulación Interrogativa del Problema Específico N°03</b> .....	27
1.1.3.4. <b>Formulación Interrogativa del Problema Específico N°04</b> .....	27
1.1.3.5. <b>Formulación Interrogativa del Problema Específico N°05</b> .....	27
1.2. Justificación e Importancia de la Investigación.....	27
1.2.1. Justificación Técnica .....	27
1.2.2. Justificación Social.....	28
1.2.3. Justificación por Vialidad.....	28
1.2.4. Justificación por Relevancia.....	29
1.3. Limitaciones de la Investigación .....	29
1.3.1. Limitaciones Geográficas.....	29
1.3.2. Limitaciones de Información .....	30
1.3.3. Limitaciones de Diseño .....	30
1.4. Objetivo de la Investigación .....	31
1.4.1. Objetivo General .....	31
1.4.2. Objetivos Específicos.....	31
<b>CAPÍTULO II</b> .....	32
<b>2. Marco Teórico</b> .....	32





2.1.	Antecedentes de la tesis o Investigación Actual.....	32
2.1.1.	Antecedentes a nivel nacional.....	32
2.1.2.	Antecedentes a nivel internacional.....	34
2.2.	Aspectos teóricos pertinentes.....	36
2.2.1.	Estabilización de suelos.....	36
2.2.1.1.	<b>Definición</b> .....	36
2.2.1.2.	<b>Tipos</b> .....	37
2.2.1.2.1.	Estabilización mecánica.....	37
2.2.1.2.2.	Estabilización por combinación de suelos.....	37
2.2.1.2.3.	Estabilización granulométrica.....	38
2.2.1.2.4.	Estabilización con cal.....	38
2.2.1.2.5.	Estabilización con cemento.....	39
2.2.2.	Suelos.....	39
2.2.2.1.	<b>Definición</b> .....	39
2.2.2.2.	<b>Origen de los suelos</b> .....	39
2.2.2.3.	<b>Tipos de suelos</b> .....	40
2.2.3.	Suelos arcillosos.....	41
2.2.3.1.	<b>Definición</b> .....	41
2.2.4.	Arcilla.....	41
2.2.4.1.	<b>Definición</b> .....	41
2.2.4.2.	<b>Tipos</b> .....	42
2.2.4.3.	<b>Absorción de arcillas fisicoquímicamente</b> .....	44
2.2.5.	Pavimentos.....	44
2.2.5.1.	<b>Definición</b> .....	44
2.2.6.	Cenizas Volantes.....	46
2.2.7.	Mazorca.....	47
2.2.7.1.	<b>Definición</b> .....	47



2.2.7.2.	<b>Producción</b> .....	48
2.2.8.	Ceniza de mazorca de maíz (CMM) .....	48
2.2.8.1.	<b>Características</b> .....	48
2.2.8.2.	<b>Obtención</b> .....	49
2.2.9.	Cal .....	51
2.2.9.1.	<b>Cal viva</b> .....	51
2.2.9.2.	<b>Cal hidratada</b> .....	51
2.2.10.	Ensayos fundamentales .....	51
2.2.10.1.	<b>Determinación del porcentaje de cal en base al pH</b> .....	51
2.2.10.2.	<b>Determinación de la granulometría del suelo (granulometría por tamizado y granulometría por hidrómetro)</b> .....	52
2.2.10.3.	<b>Determinación del contenido de humedad de un Suelo</b> .....	55
2.2.10.4.	<b>Límites de Consistencia</b> .....	55
2.2.10.5.	<b>Clasificación de suelos</b> .....	58
2.2.10.6.	<b>Compactación de suelos – Prueba Proctor Modificada</b> .....	62
2.2.10.7.	<b>California Bearing Ratio (CBR)</b> .....	64
2.3.	Hipótesis .....	65
2.3.1.	Hipótesis General .....	65
2.3.2.	Sub-Hipótesis .....	65
2.4.	Definición de Variables .....	66
2.4.1.	Variables Independientes .....	66
2.4.2.	Variables Dependientes .....	66
2.4.3.	Cuadro de Operacionalización de Variables .....	67
<b>3.</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>68</b>
3.1.	Metodología de la Investigación .....	68
3.1.1.	Enfoque de la Investigación .....	68
3.1.2.	Nivel o Alcance de la Investigación .....	69



3.1.3.	Método de la Investigación .....	70
3.2.	Diseño de la Investigación.....	70
3.2.1.	Diseño Metodológico .....	71
3.2.2.	Diseño de Ingeniería.....	72
3.3.	Población y Muestra .....	73
3.3.1.	Población.....	73
3.3.1.1.	<b>Descripción de la Población</b> .....	73
3.3.1.2.	<b>Cuantificación de la Población</b> .....	73
3.3.2.	Muestra.....	73
3.3.2.1.	<b>Descripción de la Muestra</b> .....	73
3.3.2.2.	<b>Cuantificación de la Muestra</b> .....	73
3.3.2.3.	<b>Método de Muestreo</b> .....	73
3.3.2.4.	<b>Criterios de Evaluación de la Muestra</b> .....	73
3.3.3.	Criterios de Inclusión .....	74
3.4.	Instrumentos .....	74
3.4.1.	Instrumentos Metodológicos o Instrumentos de Recolección de Datos. ....	75
3.4.1.1.	Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19) .	75
3.4.1.2.	Determinación del Contenido de Humedad Natural.....	76
3.4.1.3.	Análisis Granulométrico por Tamizado.....	77
3.4.1.4.	Análisis granulométrico por hidrómetro. ....	78
3.4.1.5.	Determinación del Límite Líquido.....	79
3.4.1.6.	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad .....	80
3.4.1.7.	Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado)	81
3.4.1.8.	Determinación de Capacidad de Soporte CBR.....	82
3.4.2.	Instrumentos de Ingeniería .....	84
3.4.2.1.	Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19) .	84



3.4.2.2.	Determinación del Contenido de Humedad Natural.....	84
3.4.2.3.	Análisis Granulométrico por Tamizado.....	84
3.4.2.4.	Análisis granulométrico por Tamizado.....	85
3.4.2.5.	Determinación del Límite Líquido.....	85
3.4.2.6.	Determinación del Limite Plástico e Índice de Plasticidad .....	85
3.4.2.7.	Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado) 85	
3.4.2.8.	Determinación de Capacidad de Soporte CBR.....	86
3.5.	Procedimiento de Recolección de Datos .....	86
3.5.1.	Muestreo de Suelos .....	86
3.5.2.	Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19).....	94
3.5.3.	Determinación del Contenido de Humedad Natural .....	98
3.5.4.	Análisis granulométrico por tamizado y granulometría por hidrómetro.....	100
3.5.5.	Determinación del Limite Líquido.....	107
3.5.6.	Determinación del Limite Plástico e Índice de Plasticidad.....	115
3.5.7.	Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado) ..	123
3.5.8.	Determinación de Capacidad de Soporte CBR .....	134
3.6.	Procedimiento de Análisis de Datos.....	152
3.6.1.	Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19).....	152
3.6.2.	Determinación del Contenido de Humedad Natural .....	153
3.6.3.	Análisis Granulométrico por Tamizado y análisis Granulométrico por Hidrómetro. ....	155
3.6.4.	Determinación del Límite Líquido.....	162
3.6.5.	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad.....	169
3.6.6.	Clasificación de suelos .....	177
3.6.7.	Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado) ..	183
3.6.8.	Determinación de Capacidad de Soporte CBR .....	195



<b>CAPITULO IV</b> .....	215
<b>4. Resultados</b> .....	215
4.1. Resultado de los ensayos. ....	215
4.1.1. Ensayo de Contenido de Humedad .....	215
4.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado y mediante Hidrómetro.....	215
4.1.3. Determinación del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP), e Índice de Plasticidad (IP) .....	218
4.1.3.1. Límite Líquido .....	218
4.1.3.2. Límite Plástico .....	219
4.1.3.3. Índice de Plasticidad .....	220
4.1.4. Clasificación de Suelos .....	221
4.1.5. Compactación de Suelos en Laboratorio (Proctor Modificado).....	221
4.1.6. Ensayo de CBR en Laboratorio.....	223
<b>CAPITULO V</b> .....	226
<b>5. Discusión</b> .....	226
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	243
ANEXO 01: ANALISIS DE ELEMENTOS MINERALES .....	245
ANEXO 02: Certificado de Elaboración de los Ensayos y Calibración de los Equipos. ...	246
ANEXO 03: Croquis de la ubicación de las calicatas. ....	247
ANEXO 04: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	248
ANEXO 05: PANEL FOTOGRÁFICO .....	250



## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Mapa Geológico del cuadrángulo Cusco 28s IV .....	26
Figura 2. Deterioro de la Vía Expresa del Cusco.....	26
Figura 3. Vía Expresa de Cusco km 04+500.....	30
Figura 4. Estructura laminar Sílica.....	43
Figura 5. Estructura laminar alumínica .....	43
Figura 6. Estructura de un Pavimento Flexible .....	45
Figura 7. Estructura de un Pavimento Rígido .....	46
Figura 8. Partes de una planta de maíz.....	47
Figura 9. Secado de maíz. ....	48
Figura 10. Residuos de Mazorca de Maíz antes de la combustión. ....	49
Figura 11. Proceso de Combustión de la Ceniza de Mazorca de Maíz.....	50
Figura 12. Resultado de Ceniza de Mazorca de Maíz.....	50
Figura 13. Denominación de partículas según el tamaño.....	54
Figura 14. Representación gráfica de un suelo bien gradado.....	54
Figura 15. Representación gráfica de un suelo mal gradado.....	54
Figura 16. Límites de Atterberg .....	55
Figura 17. Ensayo para determinar el Límite líquido.....	56
Figura 18. Ensayo de Límite Plástico.....	57
Figura 19. Carta de Plasticidad .....	58
Figura 20. Carta de Plasticidad de Atterberg .....	61
Figura 21. Detalle de clasificación en la zona de LL <30 y el IP <10.....	61
Figura 22. Gráfica del contenido de humedad óptimo.....	64
Figura 23. Fases del Proceso Cuantitativo .....	68
Figura 24. Procedimiento Hipotético – Deductivo.....	70
Figura 25. Flujograma de la Investigación.....	72
Figura 26. Delimitación de la Vía Expresa Cusco. ....	88



Figura 27. Excavación de Calicata 1 (C-1). .....	88
Figura 28. Excavación de Calicata 2 (C-2). .....	89
Figura 29. Calicata 2 (C-2).....	89
Figura 30. Excavación de Calicata 3 (C-3). .....	90
Figura 31. Profundidad de la calicata 3 (C-3). .....	90
Figura 32. Estratigrafía de la Calicata 3 (C-3). .....	91
Figura 33. Perfil en planta de la Vía Expresa.....	91
Figura 34. Estratigrafía (C-1) .....	92
Figura 35. Estratigrafía (C-2) .....	92
Figura 36. Estratigrafía (C-3).....	93
Figura 37. Ficha técnica de Cal Hidráulica. ....	93
Figura 38. Incineración de la ceniza de mazorca de maíz.....	94
Figura 39. Preparación y pesado de muestras de suelo tamizado y cal en las taras. ....	96
Figura 40. Equipos para ensayo de Determinación del porcentaje de Cal mediante pH .....	96
Figura 41. Resultados de las mediciones de pH.....	97
Figura 42. Cuarteo de suelos para la homogenización de muestras.....	99
Figura 43. Ensayo de determinación del contenido de humedad natural.....	99
Figura 44. Lavado de material en la malla #200 .....	102
Figura 45. Preparación de tamices para el ensayo granulométrico. ....	103
Figura 46. Gradación de partículas del análisis granulométrico por tamizado .....	103
Figura 47. Preparación de la muestra seca para ensayo del hidrómetro. ....	104
Figura 48. Instrumentos usados en el ensayo de hidrómetro. ....	104
Figura 49. Preparación de la solución para el ensayo del hidrómetro.....	105
Figura 50. Realización del ensayo del hidrómetro. ....	105
Figura 51. Realización del ensayo de límite líquido .....	109
Figura 52. Ensayo de límite líquido, muestras pesadas y equipos. ....	109
Figura 53. Realización del ensayo de límite plástico. ....	116



Figura 54. Muestras y equipos del ensayo de límite plástico.....	116
Figura 55. Muestras resultado de los ensayos de límites de consistencia. ....	117
Figura 56. Muestra de suelo seca y aditivos estabilizadores para ensayo de Proctor Modificado. 125	
Figura 57. Mezclado de muestras y aditivos estabilizadores para ensayo de Proctor Modificado. 126	
Figura 58. Separación en 5 capas para Proctor Modificado del Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	126
Figura 59. Compactación de Suelo usando pisón del Suelo Natural + 5% CAL + 1% de CMM para Proctor Modificado. ....	127
Figura 60. Extracción de muestras representativas para la determinación del contenido de humedad en el ensayo de Proctor Modificado.....	127
Figura 61. Pesado de muestras de Proctor Modificado compactadas + Molde.....	128
Figura 62. Preparación de la muestra de CBR para suelo natural + 5% de CAL +1% de CMM + 13.95 de agua.....	136
Figura 63. Compactación se suelos para ensayo de CBR con suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM + 15.10% de agua.....	137
Figura 64. Muestras de CBR compactadas y listas para inmersión (con pesas) .....	137
Figura 65. Enrasado de muestras de CBR en ensayo de suelo natural.....	138
Figura 66. Inmersión en agua de muestras de CBR en el ensayo de suelo natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	138
Figura 67. Toma de datos con el trípode y dial, en el ensayo de CBR para la verificación del hinchamiento. ....	139
Figura 68. Ensayo de penetración en equipo de CBR de suelo natural + 5% de CAL. ....	139
Figura 69. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural.....	140
Figura 70. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL. 140	
Figura 71. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	141





Figura 72. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	141
Figura 73. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	142
Figura 74. Muestra de CBR después del ensayo de penetración, para determinar el Contenido de humedad final. ....	142
Figura 75. Gráfico del Porcentaje Óptimo de cal para el Suelo Arcilloso .....	153
Figura 76. Gráfico de los porcentajes de Contenido de Humedad Natural del Suelo.....	155
Figura 77. Gráfico de la Curva Granulométrica.....	158
Figura 78. Gráfico de Porcentajes de Grava, Arena y Finos del ensayo de Granulometría..	159
Figura 79. Curva granulométrica de material fino. ....	161
Figura 80. Porcentajes de limo y arcilla en el ensayo. ....	162
Figura 81. Gráfica de Resultados del Ensayo de Límites Líquidos. ....	169
Figura 82. Gráfico de Resultados de Ensayo de Límites Plásticos. ....	176
Figura 83. Gráfico de resultados de Índices Plásticos.....	176
Figura 84. Clasificación de suelos Método AASHTO (A-1, A-2, A-3).....	178
Figura 85. Clasificación de suelos Método AASHTO (A-4, A-5, A-6 y A-7) .....	178
Figura 86. Clasificación de suelos por el Método S.U.C.S.....	180
Figura 87. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural.....	186
Figura 88. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL. 188	
Figura 89. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	190
Figura 90. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	192
Figura 91. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	194
Figura 92. Gráfico de Densidad Seca Máxima de los ensayos de Proctor Modificado. ....	195



Figura 93. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural.....	200
Figura 94. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural.....	200
Figura 95. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL. 203	203
Figura 96. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL. ...	203
Figura 97. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.....	206
Figura 98. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.....	206
Figura 99. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.....	209
Figura 100. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.....	209
Figura 101. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.....	212
Figura 102. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.....	212
Figura 103. Contenido de Humedad Promedio del Suelo.....	215
Figura 104. Composición Granulométrica del suelo.....	216
Figura 105. Curva Granulométrica del Suelo.....	216
Figura 106. Resultados del ensayo de granulometría por hidrómetro.....	217
Figura 107. Curva granulométrica de granulometría por hidrómetro.....	218
Figura 108. Resultados del ensayo de Límite Líquido.....	218
Figura 109. Resultados de los ensayos de límite Plástico.....	219
Figura 110. Resultados de Índices de Plasticidad.....	220
Figura 111. Densidades Secas Máximas del ensayo de Proctor Modificado.....	221
Figura 112. Contenidos de humedad Óptimos del ensayo de Proctor Modificado.....	222
Figura 113. Diagrama de porcentajes de CBR al 100%.....	223



Figura 114. Porcentajes de expansión en CBR a los 4 días. ....	224
Figura 115. Ensayo de composición química de la CMM de Pillpinto.....	228



## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Composición Mineralógica de la CMM.....	49
Tabla 2. Abertura de tamices tamaños. ....	53
Tabla 3. Clasificación de suelos según AASHTO .....	60
Tabla 4. Prefijos y sufijos de SUCS.....	60
Tabla 5. Nombres típicos de los materiales SUCS.....	62
Tabla 6. Clasificación de suelos según el índice de plasticidad.....	62
Tabla 7. Métodos de ensayo de Proctor. ....	63
Tabla 8. Categorías de Subrasante: .....	65
Tabla 9. Cantidad de Ensayos realizados para la investigación.....	74
Tabla 10. Ficha de toma de datos de Determinación del Contenido de Cal mediante en pH en la estabilización de un suelo .....	75
Tabla 11. Ficha de toma de datos para Determinación del Contenido de Humedad .....	76
Tabla 12. Ficha de toma de datos de Análisis Granulométrico por Tamizado .....	77
Tabla 13. Ficha de toma de datos para granulometría por hidrómetro. ....	78
Tabla 14. Ficha de toma de datos para la Determinación del Límite Líquido .....	79
Tabla 15. Ficha de toma de datos para la Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad.....	80
Tabla 16. Ficha de toma de datos para elaboración de Proctor Modificado .....	81
Tabla 17. Ficha de toma de datos de Determinación de capacidad de soporte de CBR .....	82
Tabla 18. Ficha de toma de datos – Ensayo de Expansión con muestras de CBR.....	83
Tabla 19. Ficha de toma de datos – Ensayo de carga/penetración con muestras de CBR. ....	83
Tabla 20. Toma de datos - Determinación del porcentaje de cal mediante pH.....	98
Tabla 21. Toma de datos de Determinación del Contenido de Humedad.....	100
Tabla 22. Toma de datos – Análisis granulométrico por tamizado.....	106
Tabla 23. Toma de Datos -Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. ....	107
Tabla 24. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural. ....	110



Tabla 25. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL.....	111
Tabla 26. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.	112
Tabla 27. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.	113
Tabla 28. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.	114
Tabla 29. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural.	118
Tabla 30. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural + 5% de CAL.....	119
Tabla 31. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural +5% de CAL + 1% de CMM.....	120
Tabla 32. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural +5% de CAL + 2% de CMM.....	121
Tabla 33. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural +5% de CAL + 3% de CMM.....	122
Tabla 34. Métodos de Proctor Modificado según el tamizado.....	123
Tabla 35. Pesos de los porcentajes de Cal y Ceniza de Mazorca de Maíz para el ensayo de Proctor	124
Tabla 36. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural .....	129
Tabla 37. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL.	130
Tabla 38. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	131
Tabla 39. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	132
Tabla 40. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	133
Tabla 41. Porcentajes en peso de CAL y CMM para los ensayos de CBR.....	135



Tabla 42. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural.....	143
Tabla 43. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL. ....	145
Tabla 44. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. 147	
Tabla 45. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. 149	
Tabla 46. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. 151	
Tabla 47. Procesamiento de Datos – Determinación del porcentaje de cal mediante pH.....	153
Tabla 48. Procesamiento de Datos – Ensayo de Contenido de Humedad Natural.....	154
Tabla 49. Procesamiento de Datos – Análisis Granulométrico por Tamizado. ....	157
Tabla 50. Procesamiento de datos del análisis granulométrico por hidrómetro.....	161
Tabla 51. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural. ....	164
Tabla 52. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL. 165	
Tabla 53. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	166
Tabla 54. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	167
Tabla 55. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	168
Tabla 56. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural. ....	171
Tabla 57. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL. 172	
Tabla 58. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	173
Tabla 59. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	174
Tabla 60. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL	



+ 3% de CMM.....	175
Tabla 61. Toma de datos necesarios para la Clasificación por el Método AASHTO.....	177
Tabla 62. Toma de datos necesarios para la Clasificación por el Método AASHTO para las distintas combinaciones de cal y ceniza de mazorca de maíz (CMM).....	177
Tabla 63. Datos para clasificación de suelos para suelo natural.....	179
Tabla 64. Datos para clasificación de suelos para las diferentes combinaciones de cal y ceniza de mazorca de maíz (CMM).....	179
Tabla 65. Clasificación de suelos por el método AASHTO – procesamiento de datos.....	181
Tabla 66. Clasificación de suelos por el método SUCS – procesamiento de datos.....	182
Tabla 67. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural. ....	185
Tabla 68. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL.....	187
Tabla 69. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.....	189
Tabla 70. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.....	191
Tabla 71. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.....	193
Tabla 72. Características de muestra patrón para los ensayos de CBR en laboratorio.....	196
Tabla 73. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural.....	198
Tabla 74. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural.....	199
Tabla 75. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural.....	199
Tabla 76. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural + 5% de CAL.....	201
Tabla 77. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL.....	202
Tabla 78. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL.....	202
Tabla 79. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada	



en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.....	204
Tabla 80. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	205
Tabla 81. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM. ....	205
Tabla 82. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.....	206
Tabla 83. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	207
Tabla 84. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM. ....	208
Tabla 85. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.....	209
Tabla 86. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	210
Tabla 87. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM. ....	211
Tabla 88. Categorías de Subrasante según el MTC. ....	213
Tabla 89. Resumen de resultados de Ensayo de CBR y Expansión.....	213
Tabla 90. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico, e Índice de Plasticidad.....	220
Tabla 91. Resumen de la clasificación del suelo según metodologías AASHTO y SUCS....	221
Tabla 92. Resumen de los resultados de los ensayos Proctor Modificado.....	222
Tabla 93. Resumen de ensayo de CBR. ....	224
Tabla 94. Resumen de resultados de la investigación.....	235





## CAPÍTULO I

### 1. Planteamiento del Problema

#### 1.1. Identificación del Problema

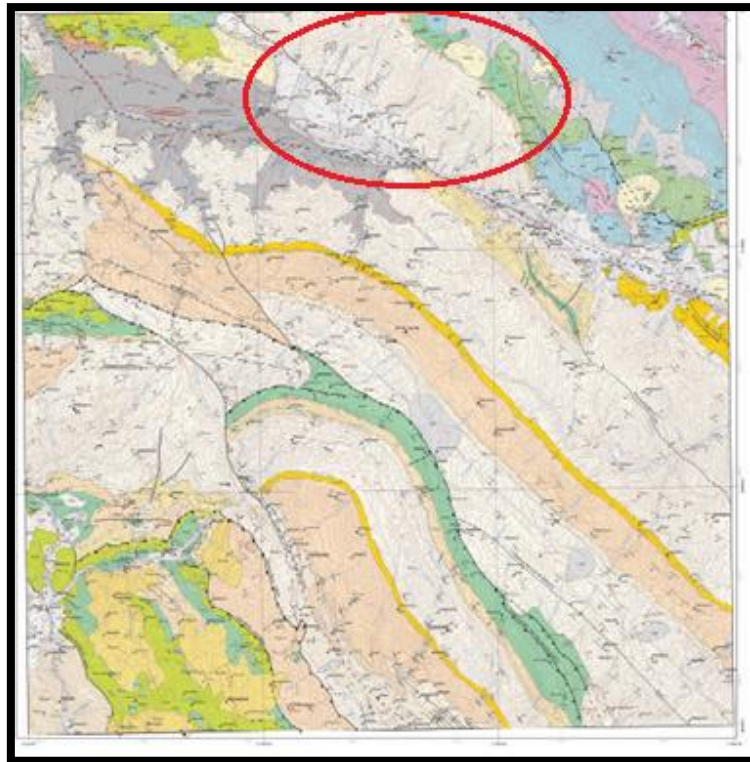
##### 1.1.1. Descripción del Problema

Los suelos arcillosos poseen una capacidad baja o muy baja de drenaje de agua, la cual se traduce en una expansión del suelo natural, incrementando su volumen, y/o convirtiéndolo en un suelo casi en su totalidad impermeable (dependiendo del tipo de arcilla predominante en el suelo), en ambos casos resulta perjudicial para cualquier tipo de infraestructura vial, ya que su presencia afectará notablemente las consideraciones básicas para los diseños del paquete estructural de la vía, especialmente de la subrasante, ya que, también poseen una capacidad portante muy baja. Dado que los suelos arcillosos tienen un comportamiento desfavorable en presencia del agua, para infraestructuras viales, es necesario estabilizarlos, o en un caso más extremo, usar material de préstamo; para cualquier solución que se le dé a un suelo arcilloso, representará un incremento considerable del presupuesto.

Por otro lado, de acuerdo al mapa geológico del cuadrángulo 28s sector IV (Figura 1), se puede observar que los suelos arcillosos conforman una parte considerable del total de la superficie del suelo en Cusco, por lo que se considera imperativo en esta investigación tener una alternativa de estabilización, por lo que proponemos usar una categoría de cenizas volantes, como son las cenizas de mazorca de maíz (CMM), usándolo como agente estabilizador secundario a una estabilización de suelos arcillosos con cal (ya que esta no siempre satisficará las características de una subrasante deseada). Como material de ensayo de los suelos arcillosos tomaremos muestras del km 04+500 de la Vía Expresa en Cusco, ya que, en base a un muestreo de suelos preliminar de dicha vía se pudo determinar la gran cantidad de arcilla que posee tanto la vía como las zonas aledañas, por ende también se pudo observar que en dicho sector se presenta el mayor deterioro de la vía, así mismo se evidencia claramente los problemas mencionados al principio, expansibilidad e impermeabilidad (Figura 2), en el suelo natural de dicha vía de manera muy notable.

Por dichos motivos en la presente investigación evaluaremos el comportamiento físico – mecánico de los suelos arcillosos tomados del km 04+500 de la Vía Expresa del Cusco, buscando mejorar sus características agregando cal y ceniza de mazorca de maíz (ceniza volante) en distintos porcentajes como agentes estabilizadores a nivel de subrasante, respecto al suelo natural y a una estabilización únicamente con cal.

**Figura 1. Mapa Geológico del cuadrángulo Cusco 28s IV**



Nota. Según la información de los estudios señalados en el estudio de geología de la Región de Cusco, los suelos arcillosos de diferentes tipos abarcan gran cantidad del territorio. Tomada de *Geología del Cuadrángulo Cusco 28-s* [Imagen], INGEMMET, 2011.

**Figura 2. Deterioro de la Vía Expresa del Cusco.**



Nota. La imagen fue tomada de la Vía Expresa de Cusco en el estado que se encontraba en época de precipitaciones. Adaptación *Propia* [Imagen], 2020.



## **1.1.2. Formulación Interrogativa del Problema**

### **1.1.2.1. Formulación Interrogativa del Problema General**

¿En qué medida influye la adición de cal y ceniza de mazorca de maíz, en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco?

## **1.1.3. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos**

### **1.1.3.1. Formulación Interrogativa del Problema Específico N°01**

¿Cuál es el porcentaje óptimo de cal mediante el pH, para estabilizar el suelo arcilloso obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco?

### **1.1.3.2. Formulación Interrogativa del Problema Específico N°02**

¿Cómo varía la densidad máxima y la humedad óptima de suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?

### **1.1.3.3. Formulación Interrogativa del Problema Específico N°03**

¿Cuál es el porcentaje de CBR máximo que puede llegar el suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?

### **1.1.3.4. Formulación Interrogativa del Problema Específico N°04**

¿Cuáles serán los límites de consistencia del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?

### **1.1.3.5. Formulación Interrogativa del Problema Específico N°05**

¿Cuál será el porcentaje de hinchamiento del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?

## **1.2. Justificación e Importancia de la Investigación**

### **1.2.1. Justificación Técnica**

La presente investigación pertenece a la rama de Ingeniería Geotécnica e Ingeniería de Transportes, tomando como principal guía el Reglamento Nacional de Edificaciones “CE.020 Estabilización de suelos y taludes”, que nos da un parámetro específico para estabilizar suelos arcillosos con cal, que dependerá del pH que posea el tipo de arcilla y cal a investigar, el cual se determinará con la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla, dando como resultado el porcentaje de cal que se usará para la investigación, el cual estará dentro del rango de 2% a 8%,



como lo indica la normativa.

Así mismo, en base al análisis químico de la ceniza de la mazorca de maíz, se pudo afirmar que los minerales más representativos de la muestra, Sílice, Magnesio, Aluminio y Calcio, son componentes que resultan favorables en la estabilización de suelos arcillosos ya que tienen una composición mineralógica similar a la cal hidratada que se usará en la investigación. El calcio bajo circunstancias favorables (% de cal óptimo) hará que las partículas del suelo arcilloso absorban y liberen iones, por lo que sustituirá a los iones de calcio ya presentes hasta tener un intercambio catiónico en equilibrio. La sílice y el aluminio tienen una reacción puzolánica, la cual complementa la estabilización del suelo y mejora las propiedades mecánicas. Por otro lado “el magnesio puede reducir el hinchamiento natural de los suelos, y dado que tiene iones positivos al igual que el calcio, colabora en el intercambio catiónico junto a la reacción puzolánica”. (Seco, Miqueleiz, Marcelino, & Garcia, 2017)

Conociendo estas características se espera tener una estabilización que mejore de manera representativa las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso y cumpla con los requerimientos del MTC Manual de Carreteras, Suelos Geología y Pavimentos 2013.

### **1.2.2. Justificación Social**

Como fin principal, en una obra civil, se tiene la satisfacción de los usuarios, al darles mayor confort y mejorar la calidad de vida, por lo que es importante conocer las necesidades y las expectativas que tiene la población de cualquier obra civil y en especial dar un mayor énfasis a las obras viales, las cuales tienen un mayor ámbito de influencia por lo que se quiere tener una propuesta de solución en la estabilización del suelo arcilloso, que garantice los parámetros mínimos que exige el MTC, teniendo en mente futura rehabilitación o reconstrucción de la Vía Expresa Cusco, ya que actualmente dicha vía está en desuso y eso se ve reflejado en una saturación vehicular en vías aledañas especialmente en la Av. La Cultura, afectado sus niveles de servicio, por lo que consideramos importante la recuperación de la Vía Expresa.

También se busca beneficiar a profesionales, que tendrán información de las propiedades físico-mecánicas del suelo natural alrededor de la Vía Expresa.

### **1.2.3. Justificación por Vialidad**

En esta investigación se propone el uso de materiales y herramientas de fácil acceso, por un lado, la cal hidratada a usar es un material que se puede conseguir en distintos centros de venta de materiales de construcción a bajo costo. La mazorca de maíz es un fruto abundante en la región del Cusco, y especialmente el marlo del maíz que suele ser desechada por los agricultores



o usada como material de combustible para la quema en fogones en las comunidades, para la presente investigación se recolectó el marlo del maíz del distrito de Pillpinto, provincia de Paruro.

De las herramientas, para la realización de los ensayos se contará con el laboratorio de Mecánica de Suelos particular “GeoSoil”, además de las normativas, guías de observación y personal calificado, por lo que la investigación es viable.

#### **1.2.4. Justificación por Relevancia**

Desde 1953 se propagó una tendencia en Estados Unidos por un “nuevo” material de construcción que puede ayudar considerablemente en la mejora de las propiedades de otros materiales de construcción al usarlo como aditivo, este material se llama “Cenizas Volantes (Fly Ash)” las cuales están siendo usadas hasta la actualidad especialmente para el mejoramiento de los suelos limosos y arcillosos, en la presente investigación determinaremos las propiedades de una categoría de estas cenizas volantes, al quemar y convertir en ceniza los marlos y restos del maíz para usarlo como aditivo secundario en la estabilización de suelos arcillosos de Cusco y así llevar la investigación a un plano local.

Es importante seguir investigando nuevos materiales de construcción y definir sus propiedades, especialmente los materiales que podemos encontrar con facilidad en nuestra región, las cuales pueden ser muy beneficiosas en la construcción si se les da un adecuado tratamiento, así mismo lo que buscamos al usar un material que se usa como combustible en las comunidades, como lo es la coronta de maíz, es reducir el impacto ambiental que estos tienen, al poder hacer una quema controlada y adecuada que no genera humo.

Por otro lado, consideramos que esta investigación puede servir como un precedente en una futura rehabilitación de la Vía Expresa del cusco ya que evaluaremos el suelo tomado específicamente de dicha vía, buscando definir las características más resaltantes para una habilitación vial a nivel de subrasante y entender mejor las propiedades mecánicas de dicho suelo.

### **1.3. Limitaciones de la Investigación**

#### **1.3.1. Limitaciones Geográficas**

A nivel geográfico la presente investigación, toma lugar y se limita en la Vía Expresa de Cusco.

- Departamento: Cusco
- Provincia: Cusco



- Distrito: San Sebastián
- Referencia: Vía Expresa
- Longitud: 6.7 km.
- Detalles de Vía: 04 vías de 02 carriles cada una

**Figura 3. Vía Expresa de Cusco km 04+500.**



Nota. Imagen satelital referencial de la zona de estudio de la presente investigación. Tomada de *Google Earth* [Imagen], GOOGLE, 2021.

### **1.3.2. Limitaciones de Información**

Para la presente investigación el material de muestra se limita al suelo natural obtenido de la Vía Expresa del Cusco tomado del km 04+500, teniendo como guía de información las siguientes normativas:

- Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotécnica y Pavimentos (2013).
- Reglamento Nacional de Edificaciones “CE.020 Estabilización de suelos y taludes”
- Manual de Ensayos de Laboratorio (2016).

Se usará como aditivo principal la Cal Hidratada, la dosificación se basa en la norma de ASTM-D6276 – 19 “Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH para le estabilización de suelos arcillosos - limosos”

Como aditivo secundario se usará la Ceniza de Mazorca de Maíz (CMM), con dosificaciones complementarias al aditivo principal, la cual no excederá del 8% en total.

### **1.3.3. Limitaciones de Diseño**

- El aditivo principal que se usará será la Cal Hidratada con 40% de  $\text{Ca(OH)}_2$  y 35%  $\text{SiO}_2$ .
- El aditivo secundario que se usará es la Ceniza de Mazorca de maíz 41.4% de  $\text{SiO}_2$ ,



29.3% de MgO y 10.2% de CaO.

- La presente investigación se limita a la adición de Cal y Ceniza de mazorca de Maíz en porcentajes de 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2% y 5% - 3% respectivamente.
- Para la investigación los resultados se limitarán por los siguientes ensayos: Determinación del Porcentaje de Cal usando pH, Límite Líquido, Límite Plástico, Proctor Modificado y CBR del material extraído de la Vía Expresa de Cusco km 04+500, usado a nivel de subrasante.

#### **1.4. Objetivo de la Investigación**

##### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar en qué medida influye la adición de cal y ceniza de mazorca de maíz, en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

1. Determinar un porcentaje óptimo de cal basados en el pH de la arcilla para estabilizar el suelo arcilloso obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco
2. Determinar la variación de la densidad máxima seca y la humedad óptima de suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes, 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante.
3. Cuál es el porcentaje de CBR máximo que puede llegar el suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante.
4. Determinar los límites de consistencia del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante.
5. Determinar el porcentaje de hinchamiento del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante.



## CAPÍTULO II

### 2. Marco Teórico

#### 2.1. Antecedentes de la tesis o Investigación Actual

##### 2.1.1. Antecedentes a nivel nacional

**Autor:** Diego Armando Argandoña Puma y Julio Palomino Blanco

**Título:** “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SUELO OBTENIDO DE LA APV. KARI GRANDE VÍA RUMI WASI – SAN SEBASTIÁN UTILIZADO A NIVEL DE SUBRASANTE EN LA REGIÓN CUSCO, ESTABILIZADO CON CENIZA DE CASCARA DE ARROZ Y CAL EN PORCENTAJES 7%-5%, 12%-5% Y 15%-5%; RESPECTIVAMENTE”

**Institución:** Universidad Andina del Cusco

**Año:** 2019.

##### **Resumen:**

El objetivo principal de esta investigación es el de proporcionar mejoras en las propiedades físico mecánicas de las muestras obtenidas a nivel de sub rasante, para esto se utilizó como agente estabilizador ceniza de cascara de arroz y cal en distintos porcentajes cumpliendo con las normas que regulan el uso de material para sub rasantes; para lo cual se hicieron ensayos en laboratorio tales como : límites de Atterberg, Proctor modificado y relación de soporte de California (CBR), respetando lo establecido en el Manual de Ensayo de Materiales (2016).

Para dicha investigación se usó muestras extraídas de la APV Kari Grande – Vía Rumi Wasi – Distrito de San Sebastián – Provincia del Cusco. La combinación de suelo con ceniza de cáscara de arroz (CCA) y CAL fueron los siguientes: 7% de CCA + 5% de CAL, 12% de CCA + 5% de CAL y 15% de CCA + 5% de CAL; respecto al agua de mezcla.

Dentro de los resultados obtenidos se notó mejoras en el CBR, 4.45% hasta 28.09% respecto al suelo natural y esto se debe al alto contenido de sílice de la ceniza de cáscara de arroz.

##### **Conclusiones**

1. Al realizar una comparación de CBR, DSM (Máxima Densidad Seca) y CHO (Contenido de Humedad Optima); se notó que al añadir el 12% de CCA + 5% de CAL con relación de agua de mezcla el CBR incrementa en de 6 veces su valor respecto al suelo natural.
2. El suelo con mezcla de 15% de CCA + 5% de CAL muestra un descenso en su límite plástico respecto al suelo natural en un 3.47%.
3. Las diferentes mezclas de suelo y ceniza de cascara de arroz + 5% de CAL presentan





disminución de valores de la densidad máxima; obteniendo una diferencia de valores de 0.20 gr/cm<sup>3</sup> con el suelo con 15% de CCA + 5% de CAL respecto al suelo natural.

4. Al mezclar el suelo con ceniza de cascara de arroz pasa de ser un suelo pobre a un suelo muy bueno para el uso en subrasantes, según el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.

**Autor:** Héctor Alonzo Ipince Cuevas

**Título:** “MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE AGREGANDO CENIZA DE TUSA DE MAÍZ EN LA CALLE 12 DEL DISTRITO DE VÍCTOR LARCO HERRERA, TRUJILLO 2019”

**Institución:** Universidad Cesar Vallejo

**Año:** 2019.

**Resumen:**

Por la pandemia que estamos pasando se realizaron dos tesis con materiales parecidos para su uso como aditivos, usándose finalmente la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA); el fin de la investigación fue probar que este material como agente estabilizador influye en la subrasante de un suelo arcilloso limoso, para lo cual se tomó una serie de combinaciones de mezclas de diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar con relación al peso de la muestra.

La dosis del 15% del aditivo dio resultados favorables al resultado de la tesis en los siguientes ensayos: granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, expansión y CBR.

**Conclusiones:**

1. La clasificación de suelo arcilloso limoso (CL a ML) se vio favorecida al ser mezclada con ceniza de bagazo de caña de azúcar para el uso de subrasante.
2. El suelo añadido con ceniza de bagazo de caña de azúcar al 15% de peso mejora la densidad máxima seca, obteniendo un valor de 2.088 gr/cm<sup>3</sup>
3. La mezcla de suelo con 15% de ceniza de bagazo de caña de azúcar presenta un valor en el CBR de 22.40%, esto se traduce en un resultado muy favorable respecto al suelo natural.

**Autor:** Andrea Tatiana Terrones Cruz

**Título:** “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS ADICIONADO CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE EN EL SECTOR BARRAZA, TRUJILLO-2018”

**Institución:** Universidad Privada del Norte



**Año:** 2018.

**Resumen:**

La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) puede ser un agente estabilizador en proyectos viales, y este a su vez podrá tener menor impacto ambiental. Para este trabajo de investigación se utilizó un suelo arcilloso limoso que se pudo extraer de la vía de acceso al sector Barraza, y se trabajó con tres porcentajes ceniza de bagazo de caña de azúcar (5%. 10% y 15% con respecto al suelo seco). Para lo cual se elaboraron ensayos de granulometría, también se obtuvo el porcentaje de humedad óptimo, la máxima densidad seca, la resistencia a la compresión simple y el porcentaje de CBR, tanto para el suelo natural como para el suelo adicionado con los diferentes porcentajes de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Los resultados obtenidos muestran que es factible usar la ceniza de bagazo de caña de azúcar como agente estabilizador de suelos arcillosos lo cual se reflejaría en beneficios para las empresas dedicadas a proyectos viales, ya que el material de la zona son restos de otras industrias, y este se podría obtener a menor costo comparado con otros aditivos.

**Conclusiones:**

1. El suelo natural se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL) y limo de baja plasticidad (ML).
2. La muestra añadida con 5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar con respecto al peso seco presenta una mejora en la resistencia a compresión, que varía entre 33.62 kPa y 33.84 kPa, y con el 10% de ceniza de bagazo de caña de azúcar con respecto al peso seco presenta una mejora en la resistencia a compresión, que varía entre 77.91 kPa y 80.11 kPa.
3. El CBR del suelo natural paso de tener un valor de 1.823% (subrasante muy mala), a obtener un CBR de 22.267% (Subrasante muy buena).

**2.1.2. Antecedentes a nivel internacional**

**Autor:** Pía Andrea Clavería Vásquez y Daniel Fernando Triana Mendoza.

**Título:** “CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LOS SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO ESTABILIZADO CON CENIZA DE ARROZ Y BAGAZO DE CAÑA COMO MATERIAL PARA SUBRASANTE.”

**Institución:** UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA

**Año:** 2018

**Resumen:**

Debido a la presencia de los nevados y volcanes en la zona del Ruiz, Santa Isabel, Tolima, Quindío y Los Cisnes el tipo de origen geológico del suelo se categoriza como volcánico, los



cuales en su estado natural o estabilizados con materiales granulares para serán utilizados como subrasante para una futura construcción de pavimento, luego este suelo servirá de soporte del tránsito vehicular en una vía pavimentada.

En esta tesis se planea dar un tipo de estabilización a dé través de ceniza de biomasa, para ser más específicos ceniza de cascarilla de arroz y el bagazo de caña; se pretende evaluar su comportamiento geotectónico, relacionado con las propiedades físicas, mecánicas, porcentaje de humedad, índices de plasticidad, resistencia, trabajabilidad entre otras.

Por ende, la presente investigación tiene como fin principal evaluar el efecto que provocara la ceniza de la biomasa en las propiedades de suelo de origen volcánico y evaluar el comportamiento y cumplimiento de las especificaciones técnicas vigente de este país (INVIAS).

**Conclusiones:**

1. El suelo natural es capaz de variar fácilmente, ya que su índice de plasticidad está íntimamente ligado con la variación de humedad, es de decir el suelo natural posee cierto contenido de humedad, al contrario, cuando se tiene una masa constante por cualquier tipo de secado sus características plásticas son pocamente notorias.
2. Se pudo notar que la compactación con el agente estabilizador propuesto genera mejores características mecánicas frente al suelo natural obtenido.
3. De los datos recolectados mediante los diferentes ensayos del suelo adicionado con diferentes porcentajes de ceniza de biomasa, se llegó a la conclusión que al 10% de adicción de ceniza de cáscara de arroz proporciona mayor aporte a las propiedades del suelo.

**Autor:** Angie Alexandra Cortes Roa y Leidi Paola Rincón Hernández.

**Título:** “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA Y CBR DE UN AFIRMADO ESTABILADO CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR Y CAL.”

**Institución:** UNIVERSIDAD DE LA SALLE

**Año:** 2020

**Resumen:**

Se escogió como agente estabilizador la ceniza de bagazo de caña de azúcar ya que no se le realiza algún tipo de control y este se vierte de forma imprudente al medio ambiente, siendo un problema que genera un impacto ambiental. Por ende, dicha tesis de investigación buscó analizar la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) añadido con cal, en las



propiedades mecánicas del suelo natural extraído. El suelo se definió según AASHTO como un A-2-6.

Se realizó una serie de ensayos en laboratorio, cogiendo las mezclas de un 6%, 9% y 12% de CBCA junto con 2%, 5% y 8% de cal, esto proporcionó un total de 9 muestras a ensayar.

El suelo natural fue obtenido de la cantera de la región de Tobia, Cundinamarca, Colombia y los ensayos realizados fueron: granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, equivalente de arena, contenido de materia orgánica mediante ensayo de pérdida por ignición, peso unitario, contenido de humedad, resistencia a la compresión encofinada, CBR y por último estabilización mediante determinación del pH del suelo (Método de Eades & Grim)

Mediante los ensayos mencionados anteriormente se pretende obtener una combinación óptima de suelo adicionado con CBCA y CAL.

### **Conclusiones:**

1. El suelo natural corresponde a una grava y arena (A-2-6), por otro lado, es una arena con gravas y pocos finos (Clasificación mediante SUCS), y los valores obtenidos mediante la curva granulometría respecto al coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura son de 281.87 y 1.31 respectivamente.
2. Al aumentar el porcentaje del contenido de CBCA se notó una mejora en el ensayo CBR, y el mejor resultado se obtuvo al añadir el suelo con 12% de ceniza de bagazo de caña de azúcar ya que el valor inicial (sin ceniza) fue de 23% y llegó a aumentar hasta un 65%. Y con la adición de cal al 5% con 12% de CBCA este valor se incrementó hasta llegar a 87%.
3. Por otro lado la expansión del suelo natural fue de 6.4%, y comparando con la adición de 12% de CBCA con un contenido de 5% de Cal el porcentaje del suelo llegó a un valor de 1.6%.

## **2.2. Aspectos teóricos pertinentes**

### **2.2.1. Estabilización de suelos**

#### **2.2.1.1. Definición**

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones CE.020 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y TALUDES la estabilización es el “Proceso físico o químico, mediante el cual se mejora las condiciones mecánicas de un suelo.” (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2012, pág. 2)

La estabilización del suelo se define como la mejora de las propiedades físicas de un suelo mediante procesos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Dichas estabilizaciones generalmente se llevan a cabo en los suelos de subrasante inadecuados



o pobres, en este caso se les llama estabilización del suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando estabiliza una subbase granular o una base granulada para obtener una mejor calidad de material se llama subbase o base granular tratada (con cemento o cal o con asfalto, etc.). (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013)

En sentido general, estabilizar un suelo significa mejorar sus propiedades (tales como resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, densidad, etc.) por medio de cualquier sistema, que generalmente consiste en uno de los siguientes:

- a) Mezclas de agregados (estabilización mecánica)
- b) Mezclas de aditivos (cemento, cal viva o apagada, cloruro de calcio o sodio, cenizas del alto horno, anilina furfural, acrilato de calcio, lignino de cromo, etc.).
- c) Compactación apropiada (la cual se puede emplear sola o en combinación obligada con cualquiera de los otros procedimientos mencionados anteriormente)

(Montejo, Montejo, & Montejo, Estabilización de Suelos, 2018)

#### 2.2.1.2. Tipos

##### 2.2.1.2.1. Estabilización mecánica

El propósito de una estabilización mecánica es mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, pero sin tener que causar algún tipo de modificación en la estructura y composición química del suelo natural, para lo cual normalmente se hace uso rodillos compactadores.

Como bien se sabe que el suelo natural contiene en su interior agua y aire, entonces la estabilización mecánica reduce los espacios vacíos del suelo.

Otro ejemplo claro de estabilización mecánica viene a ser la vibro-flotación; normalmente se aplican a suelos granulares, el proceso de este método es el siguiente: se introduce un vibrador de gran tamaño y a su vez este introduce agua al mismo tiempo, es decir lo que se busca es generar los fenómenos de licuefacción, pero a pequeña escala y así los suelos granulares tengan menor contenido de aire.

##### 2.2.1.2.2. Estabilización por combinación de suelos

Según el Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos este tipo de estabilización es “la combinación o mezcla de los materiales del suelo existente con materiales de préstamo”. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, pág. 113)

En caso de que el material combinado no cumpla con las condiciones necesarias para su uso, se tendrá que excavar hasta el punto de reemplazar este tipo de suelo con un material de préstamo, en ambos casos el suelo a usar deberá pasar por un proceso de escarificación,



conformación y compactación en una profundidad de 15 cm cumpliendo con las exigencias del proyecto.

#### 2.2.1.2.3. Estabilización granulométrica

Según el MTC (Manual de diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito) (2008) La estabilización granulométrica se define como la mezcla de dos o más suelos para conformar un material que tenga condiciones admisibles para que pueda ser utilizado como subrasante o como afirmado. Por lo que se recomienda el uso de materiales de la zona con el fin de no producir mayor costo en traslado de material.

En la mayoría de los casos uno de los suelos a utilizar es natural y el otro material es el que mejorara las propiedades que carece el primero. Por ejemplo, se puede agregar a un suelo granular con pocos finos, otro con mayor cantidad de grano fino y cierta plasticidad, con el fin de tener un suelo combinado que tenga mayor cohesión y en conjunto se tenga la granulometría adecuada para su uso en campo (pág. 157,158).

#### 2.2.1.2.4. Estabilización con cal

Según el MTC (Manual de diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito) (2008) al combinar un suelo con cal, se produce una rápida reacción denominada intercambio catiónico, y a su vez se produce un intercambio iónico, para que luego se dé una reacción lenta de tipo puzolánico, que dan paso a la formación de nuevos productos químicos. La sílice y alúmina que existen en el suelo se mezclan con cal junto al agua para que se originen silicatos insolubles (pág. 158).

El Reglamento Nacional de Edificaciones (2012), recomienda el porcentaje a sustituir por peso seco del suelo ser de 2% al 8% según el tipo de arcilla, y se seguirán los siguientes pasos en laboratorio:

- Estimar el porcentaje de cal en función del pH.
- Elaborar especímenes para el ensayo de compresión no confinada a la humedad óptima y máxima densidad seca,
- Determinar el Incremento de la resistencia del suelo estabilizado con cal.
- Si el incremento de resistencia, con el porcentaje de cal elegido, es mayor a 3,5 kg/cm<sup>2</sup>.
- Determinar la variación en la resistencia para especímenes elaborados con + 2% de cal.
- Determinar el contenido de cal para el cual la resistencia no aumenta en forma importante.
- Elaborar una gráfica de resistencia y % de cal. (pág. 9)



#### 2.2.1.2.5. Estabilización con cemento

De acuerdo con el MTC “Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos” (2013) material que se obtiene por la combinación de cemento, agua y suelo; que luego se compacta y tiene los curados necesarios se convertirá en una mezcla endurecida, con más resistencia comparada con el suelo natural. Si comparamos el concreto con este suelo estabilizado, se puede notar que los granos no están envueltos en pasta de cemento más al contrario están puntualmente unidos entre sí.

Por eso es por lo que la mezcla de suelo cemento tiene menor resistencia y un módulo de elasticidad más bajo que el concreto. (pág. 118)

### 2.2.2. Suelos

#### 2.2.2.1. Definición

La definición de suelo varía mucho dependiendo del autor, del tipo de investigación e incluso el fin para el que se quiera conocer su definición, sin embargo, para efectos de la presente investigación nos centraremos en los conceptos de la rama mecánica de suelos, que hacen referencia al uso del suelo para obras civiles.

Crespo (2004) señala que “Suelo es una delgada capa de material producto de la desintegración y/o cambios físicos y/o químicos de las rocas sobre la corteza terrestre, y de igual forma el suelo también lo conforman los residuos de las actividades biológicas que se mantienen en la corteza terrestre” (p. 18).

El suelo es un cuerpo natural homogéneo. En Ingeniería Civil son sedimentos no consolidados de partículas sólidas que se originan cuando las rocas sufren alteraciones y/o cuando, por efecto de la intemperie (agua, hielo, viento, etc.), el suelo es transportado, con la gravedad como fuerza direccional selectiva, en algunos casos puede tener materia orgánica. (Duque-Escobar & Escobar, 2002).

En resumen, podemos asumir, para fines de la presente investigación que la palabra suelo, será todo material terroso que se encuentre en la corteza superficial terrestre.

#### 2.2.2.2. Origen de los suelos

De acuerdo con la conformación de los suelos podemos dividirlo en dos grupos:

- Suelos Residuales: Estos suelos se forman por la desintegración a causa del intemperismo de las rocas, producto de fuerzas químicas, físicas y biológicas, siendo estos suelos son los más antiguos de todos. Son firmes y estables en su gran mayoría, sin embargo, en algunos casos pueden presentar una alta comprensibilidad lo que



dificulta su uso para obras civiles especialmente para las cimentaciones.

- Suelos Transportados: El origen de estos suelos es orgánico, resultante de la descomposición de las rocas con materia orgánica vegetal, estos son llevados o transportados por causas eólicas o fluviales a un lugar diferente de su origen. A diferencia de los suelos residuales, este suelo es blando y suelto, lo que representa dificultades técnicas para obras civiles.

(Pérez Alamá, 2006, pág. 11)

### 2.2.2.3. Tipos de suelos

#### 2.2.2.3.1. Suelos Inorgánicos

Son suelos que fueron formados por la meteorización de las rocas, y su composición es principalmente de granos minerales, estos pueden formarse por procesos químicos y físicos, a continuación, se describen los nombres más usados por los ingenieros civiles:

- Gravas: Las gravas son depósitos de fragmentos de rocas, y dado que su origen es por el acarreo del agua, se suelen encontrar depósitos de gravas en los lechos de los ríos, normalmente al encontrar grava, estas vienen con una proporción de canto rodado, arenas, limos y arcillas. (Crespo, 2004, págs. 21,22)

Según el MTC “Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos” (2013) “El tamaño de partículas de la grava está comprendido entre 75 mm – 4.75 mm”. (pág. 33)

- Arenas: La arena se forma por la denudación de las rocas o por su trituración artificial, convirtiéndose en granos finos. El origen de la arena es igual al de las gravas, por ende, suelen encontrarse en los mismos depósitos (lechos de ríos, mares, lagunas, etc.). No son plásticas y se comprimen instantáneamente al aplicarles cargas. (Crespo, 2004, pág. 22)

Según el MTC “Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos” (2013), “El tamaño de partículas de las arenas se divide de la siguiente forma: Arena Gruesa entre 4.75 mm – 2.00 mm, Arena Media entre 2.00 mm – 0.425 mm, y Arena Fina entre 0.425 mm – 0.075 mm”. (pág. 33)

- Limos: Estos se caracterizan por ser granos finos con baja o nula plasticidad, pueden ser limos orgánicos y limos inorgánicos, dependiendo de esta clasificación su grado de plasticidad. Al estar saturados no se recomiendan para soportar cargas, tienen una baja permeabilidad y alta comprensibilidad, por ende, son considerados suelos pobres para cimentar. (Crespo, 2004, pág. 22)





Según el MTC “Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos” (2013), “El tamaño de partículas de limo está comprendido entre 0.075 mm – 0.005 mm”. (pág. 33)

- Arcillas: Químicamente es un silicato de aluminio hidratado que en algunas ocasiones contiene silicatos de hierro o magnesio también hidratados. Las arcillas tienen la propiedad de volverse muy plásticas en contacto con el agua y a su vez tener una baja permeabilidad. (Crespo, 2004, pág. 22)

Según el MTC “Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos” (2013), “El tamaño de las partículas de arcillas son menores a 0.005 mm”. (pág. 33)

#### 2.2.2.3.2. Suelos Orgánicos

Generalmente estos suelos se forman in situ, la cantidad de materia orgánica que posean dependerá directamente de la cantidad de materia inorgánica del mineral que lo formó, uno de estos suelos es:

- Turba: es un suelo orgánico que contiene en su mayoría, tejido vegetal que varía en etapas de descomposición, su color es generalmente marrón y negro. Se le considera un pésimo suelo para obras civiles.

### 2.2.3. Suelos arcillosos

#### 2.2.3.1. Definición

Un suelo arcilloso se puede definir como, un suelo que contiene en su mayoría arcilla (partículas menores a 0.005mm), generalmente al encontrar suelos arcillosos estos vienen con una variedad granulométrica que incluye limo y arena e incluso hasta piedras y grava, dependiendo de la formación del suelo natural. Una característica de los suelos arcillosos es que tienen una permeabilidad muy baja al tener partículas tan pequeñas y una composición mineralógica predispuesta a retener el agua.

#### 2.2.4. Arcilla

##### 2.2.4.1. Definición

“La palabra arcilla tiene su origen en el idioma griego: “argilos” que significa blanco, la cual dio origen a la palabra en latín “argilla”, que finalmente al traducirla al idioma español se denominó arcilla.” (Besoain, 1985, pág. 8)

Existen muchos conceptos que engloban la definición de arcilla, estos variarán dependiendo el ámbito y fin para el que se requiera conocer su significado, sin embargo, para fines de la presente investigación definiremos la “arcilla” como:



Suelos conformados principalmente por silicatos de aluminio hidratados, sin embargo, estos suelos también pueden presentar silicatos de magnesio, hierro y otros metales (siempre hidratados). En la mayoría de los casos los minerales mencionados presentarán una estructura cristalina, donde los átomos forman láminas, las cuales se pueden dividir, de acuerdo a su estructura laminar, en dos tipos: la sílica y la alumínica. (Juárez & Rico, 2005, pág. 37)

Por otro lado, para poder definir las arcillas desde el punto de vista de su origen y conformación de suelo natural podemos decir:

Las arcillas al igual que los limos tienen su origen parcialmente orgánico, la conformación de este tipo de suelos (arcillas) se da al descomponerse químicamente los constituyentes de las rocas generando partículas microscópicas, estos suelos son plásticos si su contenido de humedad está dentro de ciertos límites, o son duros si se encuentra en estado seco. (Graux, 1975, págs. 14,15)

#### 2.2.4.2. Tipos

Se pueden dividir en tres grupos al clasificarlos por su estructura reticular:

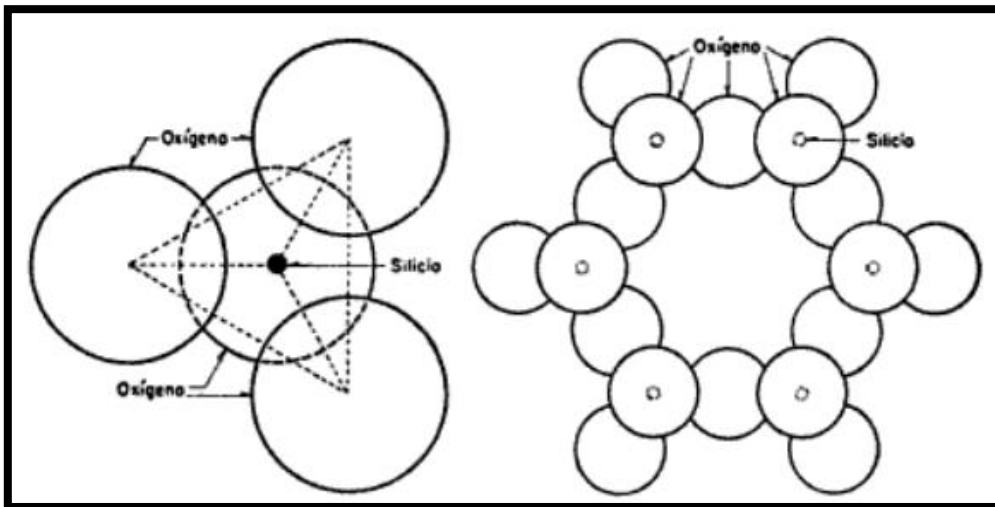
- a) **Caolinitas:** Este tipo de arcillas son relativamente estables en presencia de agua ya que las arcillas caolinitas presentan una estructura laminar que está integrada por una lámina silícica y una lámina alumínica, las cuales están superpuestas entre sí indefinidamente, esto genera un muy fuerte enlace entre las retículas, que, a nivel microscópico, impide a las moléculas de agua penetrar entre las retículas, lo que es conocido como absorción.
- b) **Montmorillonitas:** las arcillas montmorillonitas a diferencia de las caolinitas presenta una estructura laminar conformada por: una lámina alumínica entre dos laminas silícicas superpuestas entre sí indefinidamente, sin embargo, la unión que tienen sus retículas son débiles, por ende las moléculas de agua pueden ingresar con mayor facilidad, esto sumado a su naturaleza dipolar (que generan fuerzas eléctricas), dan como resultado una expansión del suelo debido al aumento de volumen de los cristales, convirtiéndolo en suelos inestables en presencia de agua.

Una variante de las montmorillonitas es las “Bentonitas”, las cuales se forman por la descomposición química de las cenizas de los volcanes, no obstante, a diferencia de las montmorillonitas, presentarán un mayor grado de expansibilidad.

(Juárez & Rico, 2005, págs. 38,39)



Figura 4. Estructura laminar Sílica

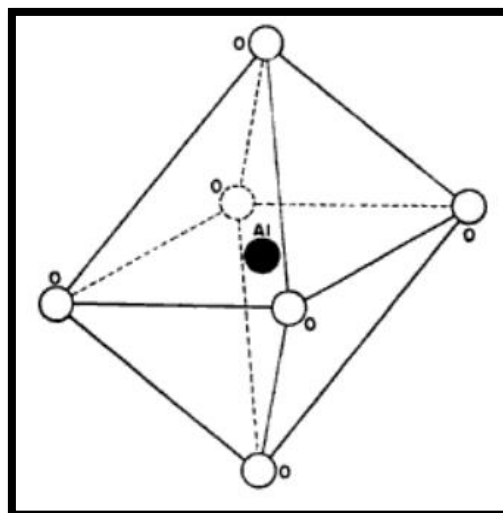


Nota. Composición y formación química de las estructuras laminares, caolinitas y montmorillonitas respectivamente. Tomada de *Estructura laminar del Sílice* [Imagen], JUÁREZ & RICO, 2005.

- c) **Ilitas:** las arcillas Ilitas tienen una estructuración igual a las montmorillonitas, una lámina alumínica entre dos laminas silícicas, sin embargo, la unión de retículas que esta presenta, tiende a formar grumos de materia, por lo que las moléculas de agua tienen una menor área expuesta para penetrar, esto se resume en un menor grado de expansibilidad, relativamente más favorable para obras civiles.

(Juárez & Rico, 2005, págs. 38,39)

Figura 5. Estructura laminar alumínica



Nota. Composición y formación química de las estructuras laminares de las Ilitas, con conjunto con el aluminio. Tomada de *Estructura laminar Alumínica*. [Imagen], JUÁREZ & RICO, 2005.



### 2.2.4.3. Absorción de arcillas fisicoquímicamente

Muchos autores y artículos científicos tratan de explicar esta propiedad que tienen los suelos arcillosos de absorción, no obstante, es mejor verla desde el punto de vista fisicoquímico, y entender que es lo que pasa a nivel molecular.

Toda partícula de suelo tiene una carga eléctrica negativa, en las arcillas la intensidad de estas cargas depende de dos factores importantes, que son: la estructuración y la composición de la arcilla. En presencia de agua estas partículas tendrán la capacidad de atraer a los iones positivos del agua ( $H^+$ ), que a su vez podrán atraer cationes de los elementos químicos que se encuentren presentes en el suelo, los cuales pueden ser:  $Na^+$  (Sodio),  $K^+$  (Potasio),  $Ca^{++}$  (Calcio),  $Mg^{+++}$  (Magnesio),  $Al^{+++}$  (Aluminio),  $Fe^{+++}$  (Hierro), etc., al atraer los iones de  $H^+$ , generará una lámina de agua en cada partícula individual de la arcilla, que estarán unidas a su estructura, esto se conoce como agua absorbida. Las partículas de agua polarizadas funcionarán como dipolos, es decir la carga positiva (+) se une a las cargas negativas del suelo, quedando su carga negativa (-) libre, esta atrae a cationes positivos que se encuentren en el suelo, como los elementos químicos mencionados anteriormente, estos cationes podrán atraer a su vez moléculas de agua debido a su naturaleza polarizada. Las cargas eléctricas se verán incrementadas con cada molécula de agua absorbida por el catión, por otro lado, el tamaño de la película de agua que rodea las partículas de arcilla dependerá en gran medida del tipo de los cationes atraídos.

(Juárez & Rico, 2005, págs. 41,42)

## 2.2.5. Pavimentos

### 2.2.5.1. Definición

Según el MEF “Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras” define pavimentos como: una estructura que está construida encima de la subrasante de la vía, esta misma tendrá la tarea de resistir y repartir los esfuerzos que producen los vehículos y así mejorar las condiciones de seguridad y confort para el tránsito. Y está conformada por una capa de rodadura, base y subbase.

- **Capa de rodadura:** Tiene la función principal de sostener directamente el tránsito puesto que está ubicada en la parte superior del pavimento. Puede ser flexible (es decir de un material bituminoso), rígido (de concreto) o de adoquines.

- **Base:** Es la capa que viene debajo de la capa de rodadura, es decir esta la sostiene, distribuye y trasmite las cargas que se producen por el tránsito. En esta capa se utiliza material granular drenante que posea un porcentaje de CBR menor al 80%, caso contrario, deberá ser estabilizado con asfalto, cal o cemento.
- **Sub – base:** Esta capa tendrá características específicas respecto al material y espesor, que tendrá la función de soportar la base y la carpeta asfáltica.  
Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta podrá ser omitida; se recomienda usar material granular con un porcentaje de CBR menor al 40% o en defecto usar estabilizantes con en el caso de la Base.

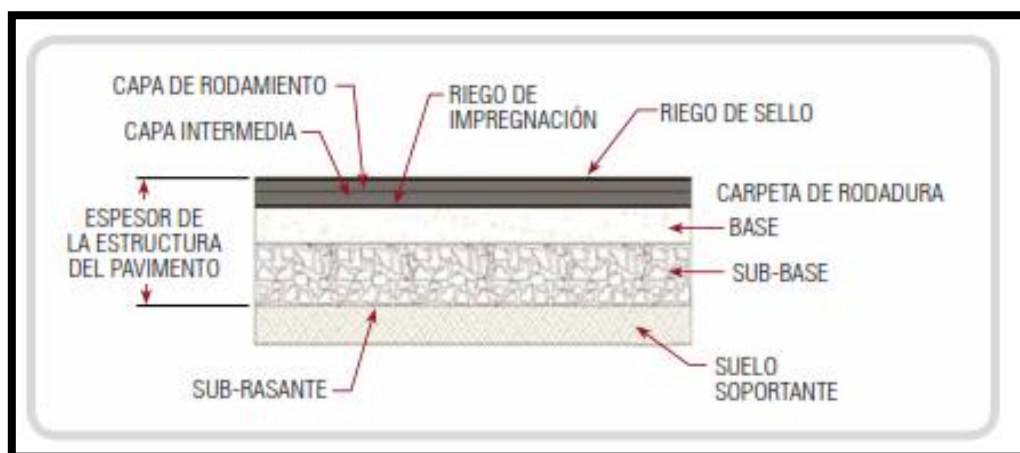
(Ministerio de Economía y Finanzas, 2015, págs. 13,14)

### 2.2.5.2. Tipos

La clasificación de los pavimentos según la revisión de distintos autores, estos son los mismos, por ende, se utilizó como guía lo que indica el MEF:

- **Pavimento flexible:** Este tiene la característica primordial que la carpeta de rodadura está conformada por materiales bituminosos como aglomerantes, agregados, y en algunos casos aditivos. Primordialmente es considerada como capa de rodadura asfáltica sobre capas granulares: mezclas asfálticas en frío, mezclas asfálticas en caliente, mortero asfáltico, micro pavimentos, entre otros.

**Figura 6. Estructura de un Pavimento Flexible**



Nota. Capas estructurales que componen un pavimento flexible, se puede observar que la Subrasante está en contacto directo con el suelo. Tomada de *Estructura de un pavimento flexible* [Imagen], MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS, 2015.

- **Pavimento semirrígido:** Este tipo de pavimento tiene como material predominante



capas asfálticas con un espesor bituminoso (carpeta asfáltica en caliente sobre base tratada con asfalto); también puede ser un pavimento semirrígido a una carpeta asfáltica sobre base tratada con cal o tratada con cemento; últimamente se considera como pavimento semirrígido a los pavimentos adoquinados.

- **Pavimento rígido:** Este tipo de pavimento está compuesta necesariamente por una subbase con material granular, pero la base de esta puede ser de mismo tipo de material estabilizada con asfalto, cal o cemento; y por una capa de rodadura de concreto a base de cemento hidráulico como material aglutinante, agregado y puede como no tener aditivos. Este tipo de pavimento tiene la siguiente distribución (Ministerio de Economía y Finanzas, 2015, págs. 14,15):

**Figura 7. Estructura de un Pavimento Rígido**



Nota. Capas estructurales que componen un pavimento rígido, se puede observar que la Subrasante está en contacto directo con el suelo. Tomada de *Estructura de un pavimento rígido* [Imagen], MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS, 2015

### 2.2.6. Cenizas Volantes

Para definir el concepto de Cenizas Volantes aplicado a la presente investigación podemos afirmar que: “es todo aquel residuo final que resulta de la combustión de cualquier residuo cálcico molido o en polvo que finalmente es transportado de la caldera (o hornos), por los gases generados por la combustión” (Faber & Capp, 1967, pág. 16).

Sin embargo, según Faber & Capp (1967): se puede tener derivados de Cenizas Volantes, las cuales son categorizadas por su composición química, que puedan satisfacer ciertas necesidades, a partir de otras materias primas que al ser generados por la combustión generen partículas de sílice, magnesio, aluminio y calcio en ciertos porcentajes como: dióxido de sílice



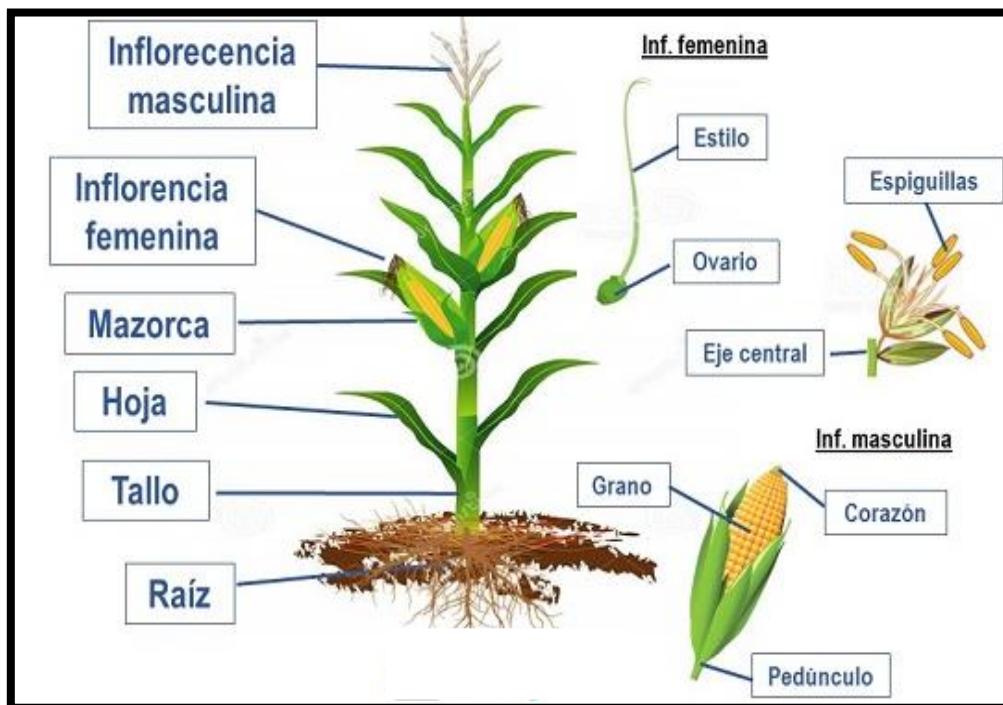
(SiO<sub>2</sub>) entre 40-50%, óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) entre 1.2-2% y óxido de magnesio 20-30%.  
(Pág. 206)

## 2.2.7. Mazorca

### 2.2.7.1. Definición

Las condiciones climatológicas y ecológicas del Perú hacen que se tenga una gran variedad de maíz; esto se puede evidenciar en los diversos tamaños y colores del marlo y granos del maíz. Se define como mazorca de maíz al conjunto de marlo o corazón, granos de maíz y hojas con las que son recubiertas.

**Figura 8. Partes de una planta de maíz.**



Nota. Se debe entender las partes que conforman una planta de maíz, ya que nos servirá para poder identificar y conocer las que se están usando para la realización de CMM. Tomada de *Partes de una planta de maíz* [Imagen], ARABLOG, 2019, <https://www.arablog.co/wp-content/uploads/2019/09/partes-de-la-planta-de-maiz.jpg>.

El maíz que se utilizó para la investigación son del tipo Maíz Blanco Gigante y el Cusco Cristalino Amarillo, estos tipos de maíz se caracterizan por crecer en la zona del Cusco a alturas aproximadas a 3000 m.s.n.m. y 3500 m.s.n.m.

La mazorca de maíz de estos dos tipos es de forma cónica y tienen una longitud que varían entre 10 cm y 18 cm; el diámetro varía entre 4cm y 8cm; y por último se caracterizan por presentar



en promedio 8 hileras de granos de maíz.

#### 2.2.7.2. Producción

Los meses del cultivo de maíz en la zona de Pillpinto se da en los meses de octubre y noviembre; para luego ser cosechado en el mes de mayo, cabe resaltar que en esta zona se da una producción de una vez al año. Normalmente una vez que se recoge el maíz se extiende en lugares donde tengan bastante entrada de luz (Figura 6) y así este pueda secar con mayor rapidez; este periodo de secado varía mucho ya que dependerá de la cantidad de maíz a secar; según la persona que nos proporcionó el material este proceso demora un mes aproximadamente.

**Figura 9. Secado de maíz.**



Nota. El maíz, después de ser cultivado, pasa por un proceso de secado por aproximadamente por un mes. Adaptación *Propia* [Imagen], 2019.

#### 2.2.8. Ceniza de mazorca de maíz (CMM)

##### 2.2.8.1. Características

La Ceniza de Mazorca de Maíz (CMM), es un producto que se obtiene por la combustión de los residuos de las Mazorcas de Maíz obtenidas de Pillpinto, estos residuos son principalmente marlo y en una cantidad mínima restos de granos y hojas (residuos que quedan al momento de desgranar). Al convertirse en cenizas, por su composición mineralógica son categorizados como cenizas volantes para fines de construcción, ya que cumple con los parámetros que nos establece Faber & Capp (1967): dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) entre 40-50%, óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre



1.2-2% y óxido de magnesio entre 20-30%. (Pág. 206).

Se hizo un análisis químico para poder determinar la composición mineralógica (Anexo 01) de la CMM de maíz de Pillpinto, siendo los resultados como sigue (véase Tabla 1):

Tabla 1. Composición Mineralógica de la CMM

Componente	%
Sílice	41.4
Calcio	10.2
Magnesio	29.3
Aluminio	1.17
Hierro	4.6
Otros	13.33

Fuente: *Elaboración Propia.*

#### 2.2.8.2. Obtención

Para la obtención de la Ceniza de Mazorca de Maíz, se realizó un proceso de combustión de los residuos de Mazorca de Maíz (Figura 9), en un cilindro metálico (batea), la combustión se realizó a una temperatura de 400°C – 500°C, por un tiempo de aproximado de 4 horas y 30 minutos, para una mejor combustión más rápida, se optó por partir a la mitad los marlos.

Es importante aclarar que durante el proceso de combustión, no se usó ningún tipo de combustible para estimular la calcinación; así mismo, al tener un proceso de combustión netamente de mazorca de maíz no se generó humo durante el proceso de obtención de CMM.

Se obtuvo 10.52kg de Ceniza de Mazorca de Maíz de 104.5kg de residuos de Mazorca de Maíz.

**Figura 10. Residuos de Mazorca de Maíz antes de la combustión.**





Nota. Imagen de los restos del maíz antes de ser calcinadas, en su mayor parte está conformado por el marlo. Adaptación *Propia* [Imagen], 2021.

**Figura 11. Proceso de Combustión de la Ceniza de Mazorca de Maíz.**



Nota. Imagen de la CMM antes de ser pulverizada y convertida en polvo, el marlo es ceniza, pero mantiene su forma original. Adaptación *Propia* [Imagen], 2021.

**Figura 12. Resultado de Ceniza de Mazorca de Maíz**



Nota. Resultados de la calcinación de los marlos de maíz y convertido a CMM, listo para la adición a las muestras de tierra como material estabilizante. Adaptación *Propia* [Imagen], 2021.



## 2.2.9. Cal

### 2.2.9.1. Cal viva

Se conoce como cal viva al desprendimiento de anhídrido carbónico, cuando se calcina la piedra caliza, quedando óxido de calcio. Este óxido de calcio debe ser “apagado” al mezclarse con agua, es decir se convertirá en hidróxido, el cual es un material muy usado en obras de construcción, llamado cal hidratada.

### 2.2.9.2. Cal hidratada

En términos químicos la cal hidratada es un compuesto llamado hidróxido de calcio, que es la unión de metal de calcio con dos grupos de hidróxido.

Cuando los suelos son mezclados con cal hidratada tienden a mejorar su plasticidad, los suelos con una plasticidad  $IP < 15$  aumentan su límite líquido y también su límite plástico, teniendo como resultado un pequeño aumento del Índice de Plasticidad; y a los suelos que tengan plasticidad  $IP > 15$  le disminuye el Índice de Plasticidad. Los suelos que tendrán una mejor disposición a reaccionar favorablemente con la cal, son los suelos que tengan una granulometría fina y cierto grado de plasticidad, alguna de las propiedades que se ven mejoradas con la cal son:

- d) Reduce la plasticidad de los suelos
- e) Reduce el hinchamiento de los suelos
- f) Reduce la propiedad ligante de los suelos naturales
- g) Aumente la resistencia a la compresión
- h) Incremente la capacidad portante del suelo
- i) Reduce la contracción de los suelos
- j) Incremente la resistencia a la tracción

(Instituto de la Construcción y Gerencia, 2013, pág. 62)

## 2.2.10. Ensayos fundamentales

### 2.2.10.1. Determinación del porcentaje de cal en base al pH

Existen diferentes métodos para determinar la proporción adecuada de cal respecto al peso de suelo a estabilizar, y se conoce que el porcentaje de peso a añadir varía entre 2% y 8% de cal; para determinar un porcentaje óptimo de cal se podría realizar una serie de ensayos con diferentes porcentajes tales como Ensayo Proctor, Proctor Modificado, CBR, Límites de Atterberg, entre otros.

Sin embargo, la Norma ASTM- D6276 – 19 nos facilita el proceso de determinación de



porcentaje óptimo de cal en suelos arcillosos y limosos, que en resumen este indica que se debe tomar un valor de pH referencial que se obtiene al mezclar 100ml. de agua con 2gr. de Cal, al obtener este valor se comparara con las mezclas de suelo y Cal en distintos porcentajes, el valor de pH que resulte igual a la muestra referencial será el porcentaje óptimo de Cal a utilizar, ya que nos indicará un equilibrio catiónico.

#### 2.2.10.2. **Determinación de la granulometría del suelo (granulometría por tamizado y granulometría por hidrómetro).**

La granulometría es uno de los ensayos fundamentales para poder reconocer y clasificar a un tipo de suelo ya sea por SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) o AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). La granulometría según Reunión de Ingenieros (1975) “Es un ensayo, que permite, en función del tamaño de las partículas que posee un suelo natural, determinar la proporción de sus componentes constituyentes” (pág. 29).

Se define como granulometría, al ensayo que determina los porcentajes y proporciones participativos de los granos de un suelo, estas proporciones separadas por el tamaño se llama gradación de suelos, cabe resaltar que, la gradación por tamaños no comparte el mismo concepto que los términos geológicos: agradación (construcción) y degradación (destrucción). (Duque-Escobar & Escobar, 2002, pág. 27)

En resumen, el objetivo de la granulometría es “Determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de suelo”. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016, pág. 44)

##### a) Método del Tamizado

Para este método el suelo tendrá que prepararse previamente, calentándolo a temperaturas controladas (en horno o estufas) y pulverizándolo, a continuación, en una serie de tamices con aberturas de tamaños decrecientes (primero va el tamiz de mayor tamaño) y conocidos se hacen pasar las partículas del suelo con movimientos verticales y golpes horizontales (manuales o mecánicos) en un determinado tiempo, para finalmente pesar las partículas retenidas en los diferentes tamices usados del ensayo.

Es importante tapar el tamiz superior, para evitar pérdidas de material fino y colocar un tamiz de fondo, que almacenará el material más fino que no fue retenido en ningún tamiz. (Duque-Escobar & Escobar, 2002, pág. 27)



Tabla 2. Abertura de tamices tamaños.

TAMICES (inch)	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

*Fuente. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)*

*Adaptación. Propia*

#### b) Granulometría por medio del hidrómetro

Este ensayo consiste en determinar el porcentaje de finos que posee el suelo a evaluar, en vista que los tamices tienen una abertura mínima de 0.075 en la malla #200 (tamaño de las partículas limosas), en ese sentido, no es posible determinar la cantidad de suelo limoso y arcilloso por medio del tamizado.

El ensayo del hidrómetro está basado en la ley de Stokes, que indica: el diámetro de las partículas, la densidad, y la viscosidad del agua, determinarán la velocidad a la que se sumerge el hidrómetro, por lo tanto, será posible determinar la cantidad de material fino, según el tamaño de las partículas que posee el suelo ensayado.

#### c) Curva Granulométrica:

Es la representación gráfica de los resultados obtenidos en función de los pesos retenidos en los tamices.

Según los principales sistemas de clasificación de suelos, la denominación según el tamaño será de la siguiente forma (véase figura 13):

Figura 13. Denominación de partículas según el tamaño.

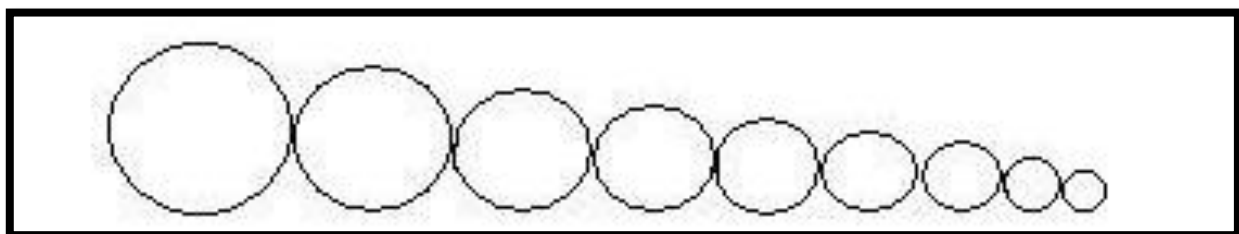
	BRITÁNICO <sub>1</sub> φ (mm)	AASHTO <sub>2</sub> φ (mm)	ASTM <sub>3</sub> φ (mm)	SUCS <sub>4</sub> φ (mm)	
Grava	60 – 2	75 – 2	> 2	75 – 4,75	4: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos 3: American Society for Testing and Materials 2: American Association of State Highway and Transportatio Official 1: B S – 5930: 1981
Arena	2 – 0,06	2 – 0,05	2 – 0,075	4,75 – 0,075	
Limo	0,06 – 0,002	0,05 – 0,002	0,075 – 0,005	< 0,075 FINOS	
Arcilla	< 0,002	< 0,002	< 0,005		

Nota. Clasificación granulométrica en base al tamaño (mm) de las partículas, en los principales sistemas de clasificación. Tomado de *Denominación de partículas según el tamaño* [Imagen], DUQUE – ESCOBAR, 2002.

#### d) Gradación

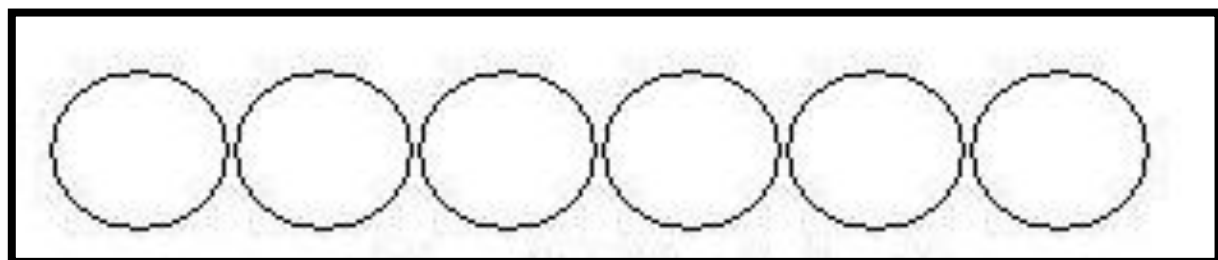
La gradación, representa la variedad de tamaños de partículas que conforman el suelo, los suelos bien gradados tendrán una variedad de tamaños en sus partículas, es decir tendrá un buen porcentaje de cada tamaño retenido en las mallas (N°4 – N° 200), por otro lado, los suelos mal gradados tienen una uniformidad en el tamaño de las partículas, lo que representa “huecos” en los porcentajes retenidos en las mallas (N°10 – N° 40)

Figura 14. Representación gráfica de un suelo bien gradado.



Nota. Un suelo bien gradado, tendrá distintos tamaños de partículas. Tomado de *Gradación de los suelos* [Imagen], WIKIPEDIA, 2009, [https:// es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_granulom%C3%A9trica](https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica).

Figura 15. Representación gráfica de un suelo mal gradado.



Nota. Un suelo mal gradado, tendrá tamaños similares en las partículas que lo conforman.



Tomado de *Gradación de los suelos* [Imagen], WIKIPEDIA, 2009, [https:// es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_granulom%C3%A9trica](https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica).

### 2.2.10.3. Determinación del contenido de humedad de un Suelo

Podremos definir según el MTC (2016) “El contenido de humedad de un suelo (o humedad) es un porcentaje, resultado de la relación del peso del agua en una porción de masa del suelo, al peso de las partículas sólidas” (pág. 49).

Este es un ensayo frecuente en laboratorio de suelos, el cual nos indicará la cantidad de agua presente en un suelo, en función de su peso seco, se puede expresar de la siguiente forma:

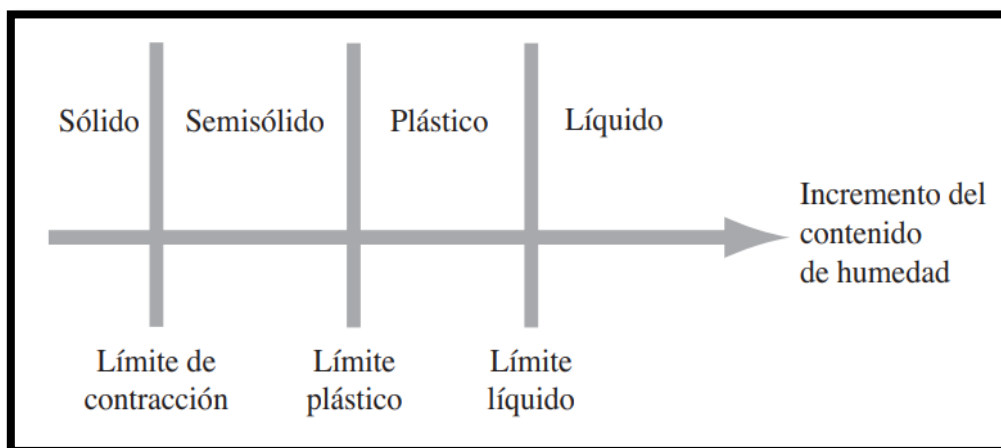
$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%)$$

Donde:  $W_w$  = Peso del agua en la muestra de suelo,  $W_s$  = Peso de sólidos en la muestra suelo, dando como resultado  $w$  = Porcentaje del Contenido de Humedad en el suelo. (Bowles, 1981, pág. 11)

### 2.2.10.4. Límites de Consistencia

Cuando un suelo tiene presencia de arcilla y un contenido de humedad favorable, el suelo puede ser removido sin derrumbarse, este fenómeno llamado consistencia del suelo trata de ser explicado por el científico Albert Mauritz Atterberg en 1900, cuando estableció un método para describir la consistencia de los suelos, mientras más contenido de humedad tenga, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido y cuando menor sea el contenido de humedad el suelo tiende a ser quebradizo. Según el contenido de humedad del suelo se puede dividir en cuatro estados: sólido, semisólido, plástico y líquido. (Das, 2015, pág. 64)

Figura 16. Límites de Atterberg



Nota. A medida que, el contenido de humedad aumenta en un suelo arcilloso, este podrá mejorar



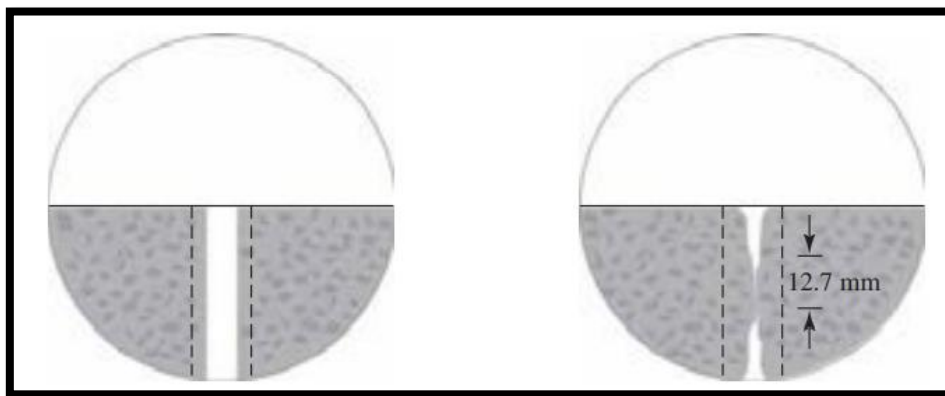
sus propiedades plásticas, se puede observar cuatro estados, de los cuales se tienen tres límites para cuantificar sus propiedades plásticas. Tomado de *Límites de Atterberg* [Imagen], DAS, 2015.

a) Límite Líquido (LL)

“Se puede definir como límite líquido al porcentaje de humedad que contiene un suelo, bajo el cual, se comportará como un material plástico, sin embargo, a este punto el suelo está al límite de actuar como un fluido viscoso”. (Bowles, 1981, pág. 16)

Desde el punto de vista práctico, Das (2015) afirma: “El límite líquido es el porcentaje de contenido de humedad, que requiere un suelo para traslapar una distancia de 12.7 mm (en el ensayo del límite líquido) bajo ranura, la después de 25 golpes a una altura de 10 mm. (Figura 17). (pág. 65)

**Figura 17. Ensayo para determinar el Límite líquido**



Nota. Representación gráfica del ensayo para la determinación del Límite Líquido, se busca, mediante los golpes de la cuchara de Casagrande juntar las dos porciones de muestra. Tomado de *Límites de Atterberg* [Imagen], DAS, 2015.

b) Límite plástico (LP)

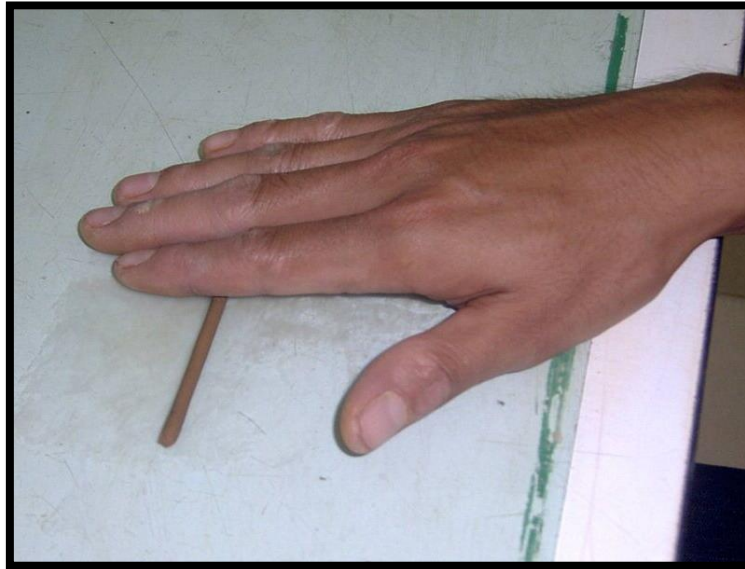
“Se define como límite plástico al porcentaje de humedad, bajo la cual un suelo no se considera plástico.” (Bowles, 1981, pág. 16)

Desde el punto de vista práctico Das (2015) afirma: “Es el porcentaje de humedad de un suelo, que, al enrollarse, haciéndolo rodar repetidas veces en una placa de vidrio esmerilado, en hilos de 3,2 mm de diámetro se desmorona”.





**Figura 18. Ensayo de Límite Plástico**



Nota. En el vidrio esmerilado, se rueda repetidas veces la muestra para el ensayo de límite plástico. Tomado de *Ensayo de Límite Líquido* [Imagen], PBS, 2020, <https://pbs.twimg.com/media/DrFwSX1WsAAMVRs.jpg>.

a) Límite de Contracción (SL)

“Es el límite de contenido de humedad, bajo el cual, el volumen del suelo constante cesará y se verá reducido”. (Bowles, 1981, pág. 16)

b) Índice de Plasticidad (IP)

El índice de plasticidad es la diferencia del Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), y su resultado expresa la cantidad de arcilla que un suelo posee, un IP alto significa que el suelo es muy arcilloso, mientras un IP bajo significará que es suelo pobremente arcilloso. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

$$IP = LL - LP$$

Donde:

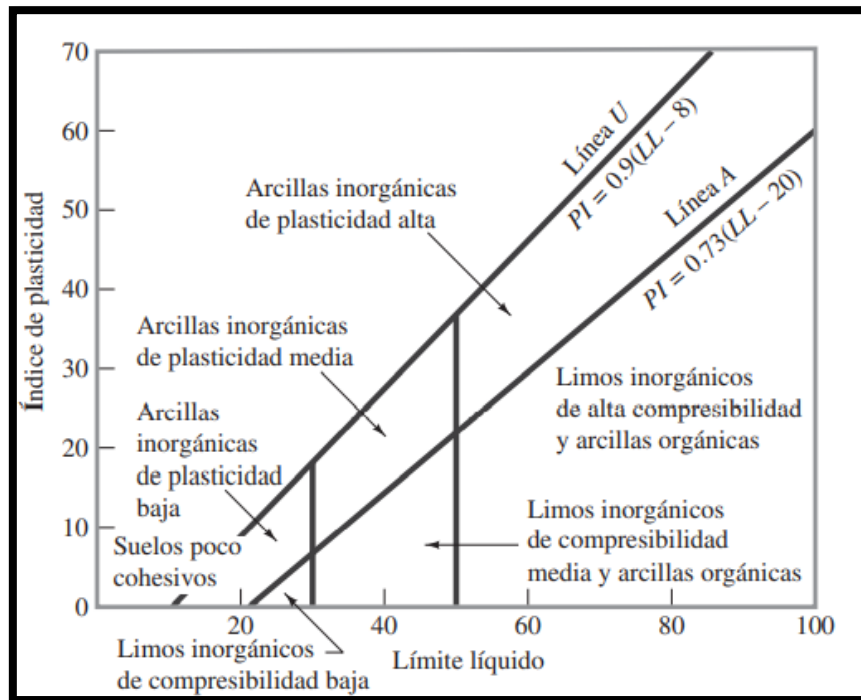
IP = Índice de Plasticidad

LL = Límite Líquido

LP = Límite Plástico

Los resultados obtenidos se pueden interpretar en la tabla realizada por Casagrande (1932) y es de suma importancia para clasificar los suelos finos.

Figura 19. Carta de Plasticidad



Nota. La carta de plasticidad permite determinar el IP (Índice Plástico) mediante los ensayos previos, que fueron cuantificados. Tomado de *Límites de Atterberg* [Imagen], DAS, 2015

#### 2.2.10.5. Clasificación de suelos

De acuerdo a las propiedades que posea un suelo, pueden ser clasificados en grupos y subgrupos, estas denominaciones que reciben no necesariamente tienen por fin tener una explicación detallada del suelo, más al contrario, buscan definir las principales características del suelo en un lenguaje común y entendible, actualmente hay dos sistemas de clasificación que son usados con frecuencia en Ingeniería Civil, uno de ellos es, American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el segundo, Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ambos clasifican según la granulometría y plasticidad del suelo. (Das, 2015, pág. 78)

#### Sistema de Clasificación AASHTO

En 1945 el Departamento de Caminos Públicos de Estados Unidos (Bureau of Public Roads) definió uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, el cual, tenía por objetivo analizar y denominar los suelos para la construcción de carreteras. Su clasificación se basa en la consistencia del suelo, es decir en el límite líquido e índice de plasticidad, y la granulometría, interpretando los resultados mediante un “índice de grupo”. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016, pág. 1159)

Los suelos se dividen en 7 grupos, y otros en subgrupos para llegar a 12.



a) Suelos granulares: 35% o menos pasa por el tamiz N°200

A-1, si menos del 20% pasa el T-200 y menos del 50% pasa el T-40, pero en el P40 el  $IP < 6\%$ .

A-2, si menos del 35% pasa el T-200, (limoso o arcilloso), y el material no cumple con A-1 ni A-3.

A-3, si menos del 10% pasa el T-200 y 51% o más pasa el T-40, pero si el P40 no es plástico.

b) Suelos fino-granulares: más del 35% pasa por el tamiz N°200

A-4 si  $IP \leq 10$  (limo) y  $LL \leq 40\%$

A-5 si  $IP \leq 10$  (limo) y  $LL \geq 41\%$

A-6 si  $IP \geq 11$  (arcilla) y  $LL \leq 40\%$

A-7 si  $IP \geq 11$  (arcilla) y  $LL \geq 41\%$

Como resultado: A-1 = cascajo y arena; A-3 = arena fina; A-2 = cascajos y arenas limosas o arcillosas; A-4 y A-5 suelos limosos, y A-6 y A-7 suelos arcillosos.

A-1 y A-3 son suelos buenos y excelentes, A-2 buenos moderados, y A-6 y A-7 son suelos moderados a pobres.

Los subgrupos se dividen así:

a) A-1-a: si  $IP$  del P40  $< 6\%$  Además el  $P200=15\%$ ,  $P40=30\%$  y  $P10=50\%$

b) A-1-b: si es del grupo A1 y no cumple con A-1-a

c) A-2-4; A-2-5; A-2-6, y A-2-7: según la fracción fina que se encuentre en las zonas 4, 5, 6 o 7 de la Carta de Plasticidad AASHTO (Figura 17)

d) A-3 no tiene subclases

(Duque-Escobar & Escobar, 2002, pág. 39)



Tabla 3. Clasificación de suelos según AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 <sup>A</sup>	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	...	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>B</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

Fuente. Google Imágenes

URL: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/RzUePi\\_NdLckQSoc\\_AOWKGnFMT-5hfG](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/RzUePi_NdLckQSoc_AOWKGnFMT-5hfG)

### Sistema de Clasificación SUCS

Es un sistema elaborado en 1948 por el Dr. Arturo Casagrande, durante la Segunda Guerra Mundial y fue revisado en 1952, este sistema clasifica al suelo de forma descriptiva, dividiéndolo en dos grupos, los que pasan por el tamiz N°200 (dependerá del porcentaje retenidos en las mallas inferiores para su clasificación) y los que son retenidos por sus granos gruesos (arena y gravas) y se divide en dos grupos de prefijos y sufijos:

Tabla 4. Prefijos y sufijos de SUCS

Prefijos		Sufijos	
G (grava)	menos del 50% pasa el tamiz N°200	W	Bien gradado
		P	Mal gradado
S (arena)	N°200	M	Limoso
		C	Arcilloso
M (limo)	más del 50% pasa el tamiz N°200	L	Baja plasticidad
C (arcilla)			H
O (orgánico)	N°200		
Pt	Turba		

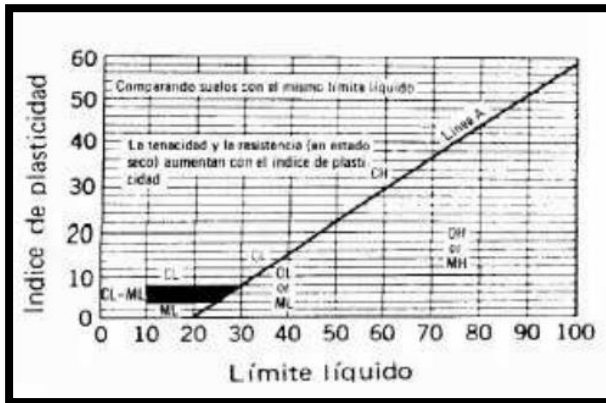
Fuente. (Duque-Escobar & Escobar, 2002)

Adaptación: Propia



La clasificación se obtiene a partir de la tabla de los límites de Atterberg, con la muestra que pasa T40:

**Figura 20. Carta de Plasticidad de Atterberg**



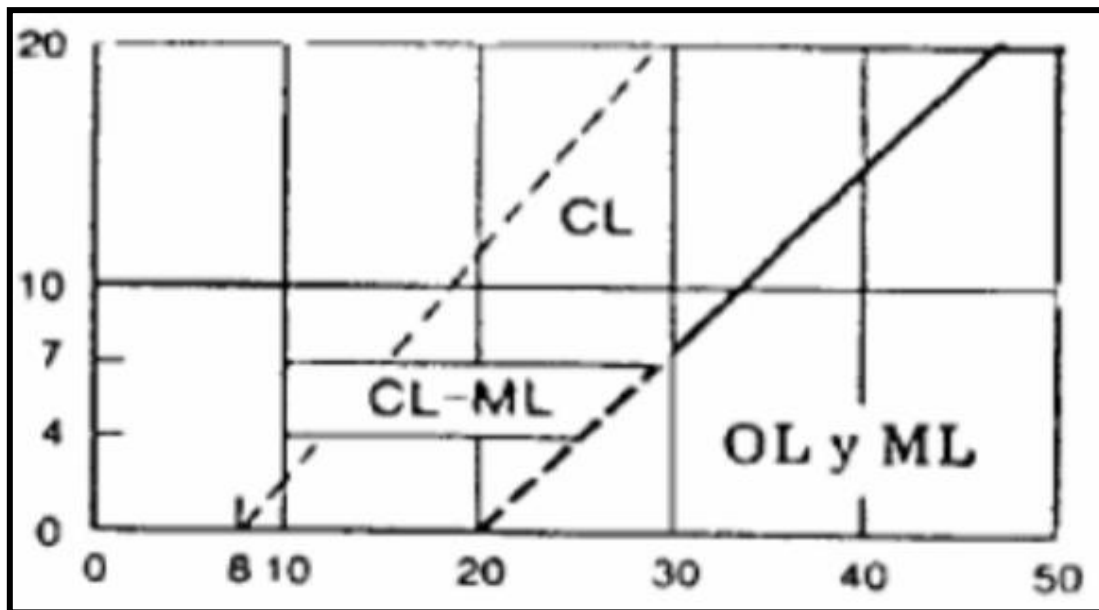
Línea A:  $IP = 0,73 (LL - 20)$   
 Línea U:  $IP = 0,9 (LL - 8)$

Sobre la línea A: Arcillas inorgánicas  
 Debajo de la línea A: Limos y Arcillas orgánicas

La línea B:  $LL = 50$ ; separa H de L

Nota. Mediante el diagrama de carta de plasticidad de Atterberg se puede determinar los Índices Plásticos, a la derecha se puede observar las líneas divisorias con sus respectivos coeficientes lineales. Tomado de *Carta de plasticidad de Atterberg* [Imagen], DUQUE & ESCOBAR, 2002.

**Figura 21. Detalle de clasificación en la zona de  $LL < 30$  y el  $IP < 10$**



Nota. Mediante el diagrama de carta de plasticidad de Atterberg se puede determinar los Índices Plásticos. Tomado de *Carta de plasticidad de Atterberg* [Imagen], DUQUE & ESCOBAR, 2002.



Tabla 5. Nombres típicos de los materiales SUCS

Grupo	Nombres típicos del Material
GW	Grava bien gradada, mezclas gravosas, poco o ningún fino
GP	Grava mal gradada, mezclas grava - arena, poco o ningún fino
GM	Grava limosa, mezclas grava, arena, limo
GC	Grava arcillosa, mezclas grava - arena arcillosas
SW	Arena bien gradada
SP	Arena mal gradada, poco o ningún fino
SM	Arenas limosas, mezclas arena - limo
SC	Arenas arcillosas, mezclas arena arcilla
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas
CL	Arcillas orgánicas de baja a media plasticidad
OL	Limos orgánicos baja plasticidad
MH	Limos inorgánicos de alta plasticidad
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad
OH	Arcillas orgánicas de alta plasticidad
Pt	Turba

Fuente. (Duque-Escobar & Escobar, 2002)

Adaptación: Propia

Tabla 6. Clasificación de suelos según el índice de plasticidad.

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

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones)

#### 2.2.10.6. Compactación de suelos – Prueba Proctor Modificada

##### a) Compactación de suelos

La compactación de suelos es un proceso para aumentar la resistencia de los suelos incrementando sus pesos unitarios, es una buena alternativa para mejorar suelos en obras de ingeniería, ya que puede eliminar gran parte de soluciones no deseadas que posea el suelo y



otorga estabilidad a los taludes.

Por lo tanto, podemos asumir que la compactación, mediante energía mecánica, elimina el aire atrapado en el suelo, y cuando se agrega agua, éstas funcionan como suavizantes del suelo.

(Das, 2015, pág. 91)

Según el MTC (2016) “se tiene 3 métodos electivos para usar la compactación, el método que se utilice debe ser especificado de acuerdo con el material ensayado” (pág. 105)

#### b) Métodos para el ensayo de Proctor

Véase tabla 7

Tabla 7. Métodos de ensayo de Proctor.

	Método A	Método B	Método C
Molde	101,6 mm (4") de diámetro	101,6 mm (4") de diámetro	152,4 mm (6 ") de diámetro
Material	Muestra que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm)	Muestra que pasa el tamiz 3/8" (9,5 mm)	Muestra que pasa el tamiz 3/4" (19 mm)
Capas	5	5	5
Golpes	25	25	25
Uso	Cuando el 20 % o menos del peso del material es retenido en el tamiz 4,75 mm (N°4)	Cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz 4,75 mm (N°4) y 20% o menos de peso del material es retenido en el tamiz 9,5 mm (3/8 pulg.).	Cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 9,5 mm (3/8 pulg.) y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz 19,0 mm (3/4 pulg.).
Otros usos	Si el método no es especificado; los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método B o C	Si el método no es especificado, y los materiales entran en los requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método C.	Este método de prueba generalmente producirá un Peso Unitario Seco Máximo bien definido para suelos que no drenan libremente.

Fuente. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Adaptación: Propia

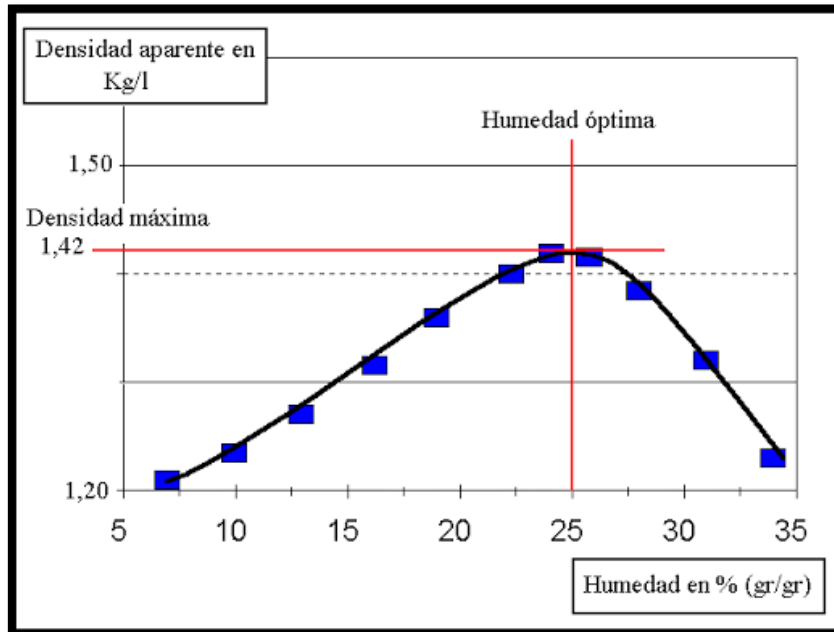
#### c) Prueba de Proctor Modificada

“Este ensayo consiste en compactar una muestra de suelo, en un molde (el tamaño varía dependiendo del método a usar), dicho molde es cilíndrico y de metal. En el caso del Proctor modificado, se compactarán 5 capas de muestra, cada una con 25 golpes y con un pistón de 10 lbs.” (Duque-Escobar & Escobar, 2002, pág. 154).

Los resultados se expresan en una gráfica de densidad/humedad, donde se busca determinar el

contenido de humedad óptimo, el cual identifica cuando la gráfica represente la mayor densidad.

Figura 22. Gráfica del contenido de humedad óptimo.



Nota. Ejemplo de gráfico para determinar el contenido de humedad óptimo. Tomado de *Humedad Óptima* [Imagen], GOOGLE CONTENT, 2021, [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/XXU5SpeAf14H6UsvkP-WHUYUDJGYZrqDsrDi55ke7255\\_x-o2Sr1XLCsAAbeh\\_C-YCbJRIN80-vBOPKNxEPRfuv3Qf0l8ZKjdUMBn11MTg](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/XXU5SpeAf14H6UsvkP-WHUYUDJGYZrqDsrDi55ke7255_x-o2Sr1XLCsAAbeh_C-YCbJRIN80-vBOPKNxEPRfuv3Qf0l8ZKjdUMBn11MTg).

#### 2.2.10.7. California Bearing Ratio (CBR)

Este ensayo realizado en laboratorio mide la resistencia al corte de un suelo, que tendrá densidad y humedad controladas, cabe mencionar que este ensayo puede realizarse también in situ. El número de CBR o CBR es un porcentaje que representa el esfuerzo requerido para penetrar con un pistón 0,1” (0.254mm) una muestra de suelo, que será relacionada con el esfuerzo para penetrar el mismo pistón 0.1” (0.254 mm) un suelo patrón. La relación es de la siguiente forma:

$$CBR = \frac{Carga\ unitaria\ del\ ensayo}{Carga\ unitaria\ patrón} \times 100$$

(Bowles, 1981, pág. 190)

Mientras el número de CBR se aproxime más a 0% se pueden calificar como “suelos pobres” (baja calidad), mientras que los números que se aproximen a 100% se pueden calificar como “buenos suelos” (alta calidad).





Según el MTC (2016) “El CBR tiene una aplicación en obras viales, ya que, determinará la resistencia potencial que tenga la subrasante, la subbase y la base. Este ensayo es fundamental como criterio para el diseño de pavimentos flexibles”. (pág. 248)

Tabla 8. Categorías de Subrasante:

Categorías de Subrasante	CBR
S <sub>0</sub> : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente. (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013)

Adaptación. Propia

## 2.3. Hipótesis

### 2.3.1. Hipótesis General

La adición de cal como agente estabilizador principal y ceniza de mazorca de maíz como agente estabilizador secundario, influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco mejorando las propiedades físico-mecánicas del suelo natural.

### 2.3.2. Sub-Hipótesis

- El porcentaje óptimo de cal estará en el rango de 2% y 8% como indica la norma CE.020 Estabilización de suelos y taludes.
- La densidad máxima del suelo arcilloso aumentará y el contenido de humedad óptimo se disminuirá respecto a una estabilización únicamente con cal.
- La estabilización con cal y ceniza de mazorca de maíz tiene un mejor porcentaje de CBR (capacidad de soporte) que una estabilización únicamente con cal.
- El índice de plasticidad del suelo adicionado con cal y ceniza de mazorca de maíz mejorará respecto a un suelo estabilizado únicamente con cal
- La adición de los distintos porcentajes de cal y ceniza de mazorca de maíz al suelo arcilloso disminuyen progresivamente el potencial de expansión respecto a una estabilización únicamente con cal.



## **2.4. Definición de Variables**

### **2.4.1. Variables Independientes**

- Tipo de Suelo
- Cal
- Ceniza de Mazorca de Maíz

### **2.4.2. Variables Dependientes**

- pH del Suelo
- Límite Líquido
- Límite Plástico
- Humedad Óptima
- CBR (California Bearing Ratio)
- Corte Directo
- Hinchamiento y absorción



### 2.4.3. Cuadro de Operacionalización de Variables

CUADRO DE OPERACIONALIZACION DE VARIABLES				
VARIABLES INDEPENDIENTES				
VARIABLE	DESCRIPCIÓN DE VARIABLE	NIVEL	INDICADORES	INSTRUMENTOS
X1=Cal	Aditivo estabilizante primario que mejora las propiedades físico-mecánicas del suelo	2% al 8%	X1= % óptimo de cal, determinado mediante el pH de mezcla suelo y Cal.	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo ASTM - D6276 – 19
X2=Ceniza de restos de mazorca de maíz	Aditivo estabilizante secundario que mejora las propiedades físico-mecánicas del suelo	1% 2% 3%	X2= % de peso de sustitución de ceniza de restos de mazorca de maíz, menor que X1 (Agentes estabilizantes no deben exceder el 8%)	RNE C.E. 020
VARIABLES DEPENDIENTES				
Y1= Limite liquido	Porcentaje de contenido de humedad del suelo secado en el horno, cuando este pasa por el ensayo Cuchara Casagrande	Máximo 25% (Fuente: EG 2013)	Contenido de Humedad (%)	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo MTC E 110 - 2016
Y2= Índice de plasticidad	Magnitud que resulta de la diferencia del contenido de humedades del Límite líquido y limite plástico. IP = LL- LP	Alta Media Baja No plástica	Contenido de Humedad (%)	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo MTC E 111 - 2016
Y3= Densidad Máxima	Estado en el que el suelo se encuentra más denso usando energía modificada.	Denso Suelto	Peso (gr)    Volumen (cm <sup>3</sup> )	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo MTC E 115 - 2016
Y4= Humedad óptima	Porcentaje de agua que permite al suelo llegar a su densidad máxima.	Húmedo Seco	Contenido de Humedad Óptima (%)	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo MTC E 115 - 2016
Y5= Capacidad de Soporte CBR	Resistencia al esfuerzo cortante del suelo, en condiciones de humedad y densidad controlados	Mínimo 40% (Fuente: EG 2013)	Valor de CBR (%)	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo MTC E 132 - 2016
Y6= Expansión de Suelo	Aumento de volumen del suelo, respecto al contacto de la muestra con agua durante un tiempo determinado.	Bajo Medio Alto Muy Alto	Expansion (%)	Ficha de recolección de datos Hojas de cálculo MTC E 132 - 2016

## Capítulo III

### 3. Metodología

#### 3.1. Metodología de la Investigación

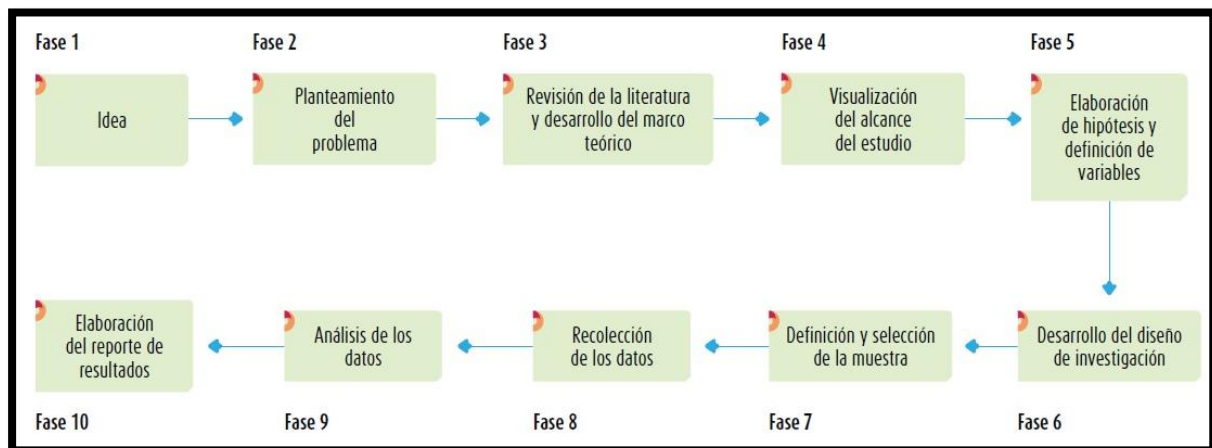
##### 3.1.1. Enfoque de la Investigación

CUANTITATIVO:

“La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que, para demostrar la hipótesis nos basaremos en la recolección de datos, dicha recolección se basa principalmente en la elaboración de análisis estadísticos y mediciones numéricas, las cuales nos permitirán probar teorías, definiendo pautas y modelos del comportamiento.” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006, pág. 05)

Para describir objetivamente los fenómenos de las mediciones, es fundamental definir índices para cuantificar las observaciones que ensayaremos en las variables, dichas variables tienen que poder ser cuantificables, dando así, una naturaleza numérica a la investigación, que en general busca entender y aclarar la hipótesis mediante pruebas. (Colomé, 2018)

**Figura 23. Fases del Proceso Cuantitativo**



Nota. Flujograma del proceso correcto para una investigación con enfoque cuantitativo, el cual describe la forma de la presente investigación. Tomado de *Fases del Proceso Cuantitativo* [Imagen], HERNÁNDEZ, FERNÁNDEZ & BAPTISTA, 2006.

La presente investigación es realizada según el enfoque cuantitativo y aplicada porque vamos a demostrar experimentalmente, que la adición de ceniza de mazorca de maíz y cal en el suelo arcilloso mejorará las propiedades físico – mecánicas de dicho suelo, y mediante cuantificadores de las variables podremos probar la hipótesis, teniendo como premisa una



cuantificación del estado de suelo natural, de la cual se partió para describir la hipótesis, siendo un suelo que no cumple con los parámetros mínimos que se exigen.

### 3.1.2. Nivel o Alcance de la Investigación

#### DESCRIPTIVA – CORRELACIONAL

##### Descriptiva

En este tipo de investigaciones se busca describir, en un determinado y homogéneo grupo, los comportamientos análogos de estos, usando métodos sistemáticos se evidenciarán tales estructuras o comportamientos, esta descripción será de carácter cualitativo y/o cuantitativo. Para las investigaciones cuantitativas principalmente se deberá determinar las características medibles (cuantitativas) de la variable de estudio y así mismo evidenciar los modos de medición. Sin embargo, no todas las investigaciones tendrán como finalidad comprobar o generar una hipótesis, ya que, en investigaciones de carácter descriptivo, correlacional o exploratorias, la respuesta al problema puede traer problemas con características análogas a la hipótesis. (Colomé, 2018, págs. 13,31)

Según Borja (2016): “Lo que busca tal investigación es describir y determinar las características y propiedades más representativas de la variable de estudio”. (Pág. 13)

##### Correlacional

Se buscará definir una correlación entre dos o mas variables, en general, primero se deberá conocer la relación entre las variables de estudio para después poder establecer criterios de indicadores y medidores, así poder convertir las observaciones en datos. También este tipo de investigación nos permite definir “hipótesis simplificativas” cuando la correlación entre variables sea mínima, es decir no afecte a las variables principales del problema. (Colomé, 2018, pág. 13)

En este tipo de investigación se tiene como propósito conocer la relación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables dentro de un universo homogéneo. En ocasiones solo se analiza la relación entre dos variables, representada de la siguiente forma:

$$X \longrightarrow Y$$

(Hernández, Fernández, & Baptista, 2006, pág. 105)

La presente investigación tendrá carácter descriptivo – correlacional, ya que, describiremos mediante métodos sistemáticos (ensayos de laboratorio) , el comportamiento de las propiedades físico – mecánicas del suelo al agregar cal y ceniza de mazorca de maíz a nivel de subrasante,

teniendo indicadores cuantitativos que permitan determinar la hipótesis, así mismo, tales indicadores estarán sujetos a una correlación de las variables (no causales) la cual se podrá determinar en el presente estudio.

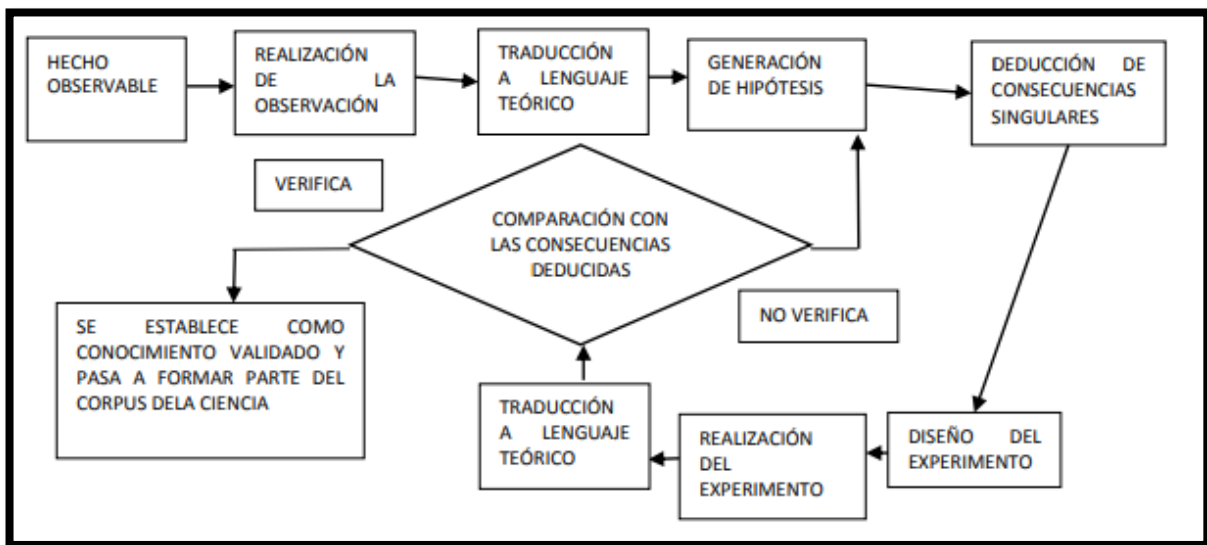
### 3.1.3. Método de la Investigación

#### HIPOTÉTICO – DEDUCTIVO

Al hacer observaciones de cierto caso (problema) se establecerá una hipótesis, con la cual se podrá definir y/o verificar tal hipótesis. Cabe resaltar que se convertirá en un conocimiento científico válido cuando se compruebe la hipótesis, en caso contrario se elabora una nueva hipótesis. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006, pág. 9)

La hipótesis será el punto de partida, que estará sujeta a una base teórica empírica, con la cual podremos, mediante las reglas de la deducción, predecir los comportamientos del objeto de estudio, posteriormente se verificará la veracidad o no de la hipótesis. (Rodríguez & Pérez, 2017, pág. 189)

**Figura 24. Procedimiento Hipotético – Deductivo**



Nota. Flujograma de una investigación hipotética – deductiva, la cual fue empleada en la presente investigación. Tomado de *Procedimiento Hipotético – deductivo* [Imagen], HERNÁNDEZ, FERNÁNDEZ & BAPTISTA, 2006.

La presente investigación será hipotética – deductiva, ya que, partiremos de una hipótesis en base a los aspectos teóricos pertinentes, la cual será formulada a partir de la deducción, que se verificará mediante un proceso de investigación.

### 3.2. Diseño de la Investigación



### 3.2.1. Diseño Metodológico

#### CUASI EXPERIMENTAL

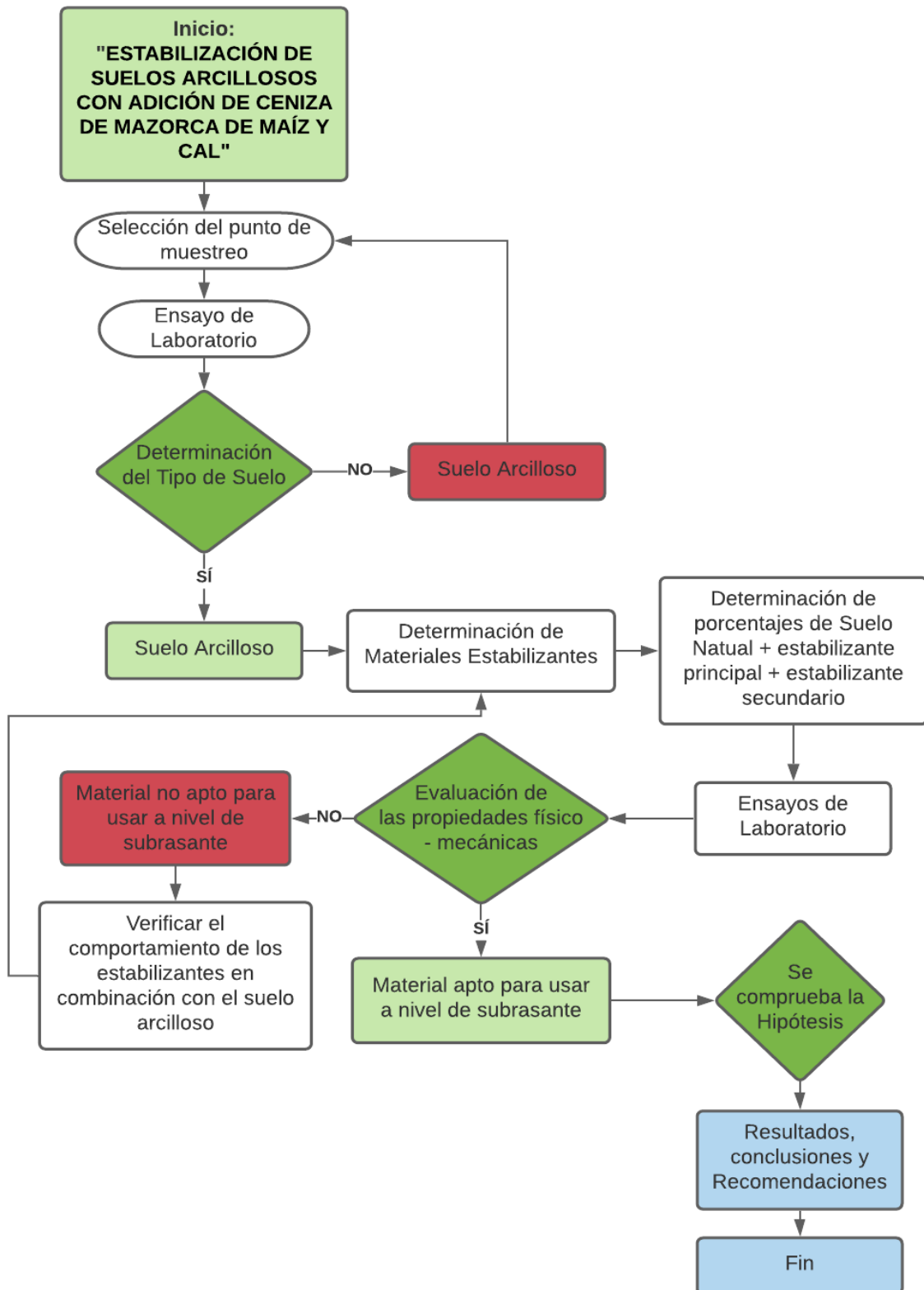
Este tipo de diseño es principalmente aplicable a los problemas de los cuales no se puede tener un control total de las situaciones, sin embargo, se procura tener el mayor control posible, aun cuando ya estén determinados los grupos. Una característica de este diseño es el incluir “grupos intactos”, es decir grupos ya constituidos. (Jiménez, 1991)

Dado que la presente investigación no es en su totalidad experimental, el diseño metodológico es cuasi experimental. Se hará una comparativa de las propiedades físico – mecánicas del suelo mediante la realización de ensayos de, capacidad de soporte, densidad máxima, límites de consistencia, hinchamiento y absorción.



### 3.2.2. Diseño de Ingeniería

Figura 25. Flujograma de la Investigación



Nota. Flujograma para la realización de la presente investigación, considerando casos favorables y desfavorables. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.





### **3.3. Población y Muestra**

#### **3.3.1. Población**

##### **3.3.1.1. Descripción de la Población**

En la presente investigación se delimita la población a los suelos arcillosos que existen en la Vía expresa del Cusco, San Sebastián, del km 03+950 hasta km 04+680, tramo que no está pavimentado y que se puede evidenciar las características del suelo.

##### **3.3.1.2. Cuantificación de la Población**

La población está conformada por los suelos arcillosos que tienen la clasificación mediante el sistema SUCS como arcillas de baja plasticidad (CL) o mediante el sistema AASHTO en los rangos A-5, A-6, A-7.

#### **3.3.2. Muestra**

##### **3.3.2.1. Descripción de la Muestra**

En la investigación usaremos el suelo que se extrajo en el km 04+500 de la Vía Expresa de San Sebastián, en tal punto, se pudo evidenciar claramente la presencia de arcillas de tonos amarillentos rojizos, las cuales tenían presencia de yeso en estado mineral en una mínima cantidad, se extrajo un aproximado de 500 kg de muestra de suelo arcilloso.

##### **3.3.2.2. Cuantificación de la Muestra**

La muestra es finita, y la cantidad total de elementos que conforman la muestra son: 72 ensayos, los cuales se realizarán en el laboratorio agregando los aditivos estabilizantes (cal y ceniza de mazorca de maíz) en distintos porcentajes. Véase tabla 9.

##### **3.3.2.3. Método de Muestreo**

###### **MUESTRAS NO PROBABILÍSTICAS**

Para intereses de la presente investigación usaremos el muestreo no probabilístico, ya que, “Las muestras no probabilísticas (también llamadas muestras dirigidas) tienen un procedimiento de recolección o selección informal, generalmente son utilizadas en investigaciones cuantitativas y cualitativas”. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2006, pág. 262)

##### **3.3.2.4. Criterios de Evaluación de la Muestra**

Para la realización y determinación de los ensayos en laboratorio de las muestras extraídas del km 04+500, se usaron los parámetros básicos que debe tener un suelo para subrasante de acuerdo al MTC “Manual de Carreteras” (2013), como sigue:



Tabla 9. Cantidad de Ensayos realizados para la investigación

Ensayos	Norma	Suelo Natural	Cal	CMM	Cal	CMM	Cal	CMM	Cal	CMM	Total
			5%	0%	5%	1%	5%	2%	5%	3%	
Muestreo del Suelo	MTC E 101	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Determinación del Porcentaje de Cal mediante el pH	ASTM- D6276 – 19	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Análisis Granulométrico por Tamizado	MTC E 107-2016	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Análisis Granulométrico por Hidrómetro	MTC E 109	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Límites de Consistencia	MTC E 110 - 2016 MTC E 111 - 2016	6	6	6	6	6	6	6	6	6	30
Proctor Modificado (Compactación de suelos)	MTC E 115- 2016	4	4	4	4	4	4	4	4	4	20
CBR- Capacidad de Soporte	MTC E 132- 2016	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15
											73

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.3. Criterios de Inclusión

#### 3.3.3.1. Criterios de Inclusión de la Muestra de Suelo

Las muestras de suelo se extrajeron del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, del estrato arcilloso de una zona aledaña a la vía principal. Con los ensayos de laboratorio se determinará el tipo de suelo, la granulometría, el contenido de humedad, los límites de consistencia, la densidad máxima, y la capacidad de soporte del suelo natural, con lo cual podremos tener un contraste para realizar la comparativa respecto al suelo estabilizado con los distintos porcentajes.

#### 3.3.3.2. Criterios de Inclusión de los Aditivos Estabilizantes

- Se usará cal hidratada (marca: Martell) como aditivo estabilizador principal. Para determinar el porcentaje óptimo de cal para el suelo arcilloso del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, se usó un medidor de pH de suelos, siendo 5% el porcentaje con el que se llega al pH de la muestra guía.
- La Ceniza de Mazorca de Maíz, será el aditivo secundario, los porcentajes que se usarán serán 0%, 1%, 2% y 3%, sin exceder el 8% al que nos limita la normativa “CE.020 Estabilización de suelos y taludes”



### 3.4. Instrumentos



### 3.4.1. Instrumentos Metodológicos o Instrumentos de Recolección de Datos.

#### 3.4.1.1. Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19)

Tabla 10. Ficha de toma de datos de Determinación del Contenido de Cal mediante en pH en la estabilización de un suelo

	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil	
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Contenido de Cal mediante en pH en la estabilización de un suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:		
Fecha de ensayo:		

Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19)



Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04	Muestra Guía
Peso de Recipiente (gr)					
Peso de Muestra Seca (gr)					
Peso de Cal (gr)					
Porcentaje de Cal (%)					
Contenido de Agua (ml)					
pH					

Fuente: Elaboración propia



3.4.1.2. Determinación del Contenido de Humedad Natural

Tabla 11. Ficha de toma de datos para Determinación del Contenido de Humedad



	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"				
Ensayo:	Determinación del Contenido de Humedad del Suelo Natural				
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500				
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba				
Descripción de Muestra:					
Fecha de ensayo:					
<u>MTC E 108, Basado en la Norma ASTM D-2216</u>					
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>	<b>Muestra 03</b>	<b>Muestra 04</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)					
<b>Contenido de Humedad</b>					
<b>Contenido de Humedad Promedio</b>					

Fuente: Elaboración Propia



3.4.1.3. Análisis Granulométrico por Tamizado

Tabla 12. Ficha de toma de datos de Análisis Granulométrico por Tamizado

	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil	
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Análisis Granulométrico del Suelo por Tamizado	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:		
Fecha de ensayo:		

MTC E 107 – ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

Peso de la Muestra Seca:		gr.
Peso de Muestra Lavada		gr.
Pérdida por Lavado:		gr.

Tamiz N°	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido	Acumulado	
				% Retenido	% Pasa
3"					
2"					
1 1/2"					
1"					
3/4"					
3/8"					
N° - 4					
N° - 10					
N° - 20					
N° - 40					
N° - 60					
N° - 140					
N° - 200					
Fondo					
Pérdida por lavado					
Parcial Fondo + Pérdida por lavado					
TOTAL					

Tamaño Máximo Absoluto:  
Tamaño Máximo Nominal:



Cu=
Cc=

Fuente: Elaboración Propia



3.4.1.4. Análisis granulométrico por hidrómetro.

Tabla 13. Ficha de toma de datos para granulometría por hidrómetro.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 									
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"								
Ensayo:	Granulometría por hidrómetro								
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500								
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba								
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Vía Expresa km 04+500								
Fecha de ensayo:	22/01/2022								
<p><u>MTC E 109 – ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO</u></p>									
Masa del suelo seco:	Corrección por agente defloculante y punto cero (g/L):								
Tipo de Hidrómetro:	Gravedad Específica:								
Tiempo (min)	Lectura del Hidrómetro	Temperatura °C	Rcp	Profundidad efectiva mm	Diámetro mm	Corrección de temperatura	R Corregida	% pasante	Constante K
1									
2									
10									
15									
30									
60									
250									
384									
470									
1326									
De la tabla:									

Fuente: Elaboración Propia



3.4.1.5. Determinación del Límite Líquido

Tabla 14. Ficha de toma de datos para la Determinación del Límite Líquido



Universidad Andina del Cusco  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba
Descripción de Muestra:	
Fecha de ensayo:	

MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS



Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente				
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)				
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)				
Peso Recipiente Metálico (gr)				
Peso Suelo Seco (gr)				
Peso Agua (gr)				
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
<b>Número de Golpes (N)</b>				
<b>Límite Líquido</b>				

Fuente: Elaboración Propia



3.4.1.6. Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad

Tabla 15. Ficha de toma de datos para la Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad

	<p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p>	
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera	
	Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:		
Fecha de ensayo:		

MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)

Descripción	Muestra 01	Muestra 02
Denominación del recipiente		
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)		
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)		
Peso Recipiente Metálico (gr)		
Peso Suelo Seco (gr)		
Peso Agua (gr)		
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		
<b>Límite Plástico</b>		

<b>Límite Líquido</b>	
<b>Límite Plástico</b>	
<b>Índice de Plasticidad</b>	



Fuente: Elaboración Propia





3.4.1.7. Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado)

Tabla 16. Ficha de toma de datos para elaboración de Proctor Modificado



	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil			
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:				
Fecha de ensayo:				
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>				
Diametro de Molde:		cm.		
Altura de Molde:		cm.		
Volumen del Molde:		cm <sup>3</sup> .		
Metodo:				
Capas:		unid.		
Golpes por capa:		unid.		
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)				
Peso del Molde (gr)				
Peso de Muestra Húmeda (gr)				
Volumen de Molde (gr)				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )				
Nro. de Recipiente				
Peso de Muestra Húmeda + Tara				
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)				
Peso del Agua (gr)				
Peso de Tara				
Peso de Muestra Seca (gr)				
Contenido de Humedad (%)				
Contenido de Humedad Promedio (%)				
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )				
Humedad Óptima (%)				
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )				

Fuente: Elaboración Propia



3.4.1.8. Determinación de Capacidad de Soporte CBR

Tabla 17. Ficha de toma de datos de Determinación de capacidad de soporte de CBR

	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"		
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado		
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500		
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba		
Descripción de Muestra:			
Fecha de ensayo:			
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>			
Datos			
Número de Golpes	12	25	56
Diametro (cm)			
Altura de Molde (cm)			
Altura de Disco Espaciador (cm)			
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>			
Peso Molde + Base (gr)			
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)			
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>			
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )			
Nombre del Recipiente			
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)			
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)			
Peso del Agua (gr)			
Peso del Recipiente (gr)			
Peso de Muestra Seca (gr)			
Contenido de Humedad Final (%)			
Contenido de Humedad Promedio Final (%)			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )			

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 18. Ficha de toma de datos – Ensayo de Expansión con muestras de CBR.

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0									
24	1									
48	2									
72	3									
<b>96</b>	<b>4</b>									

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 19. Ficha de toma de datos – Ensayo de carga/penetración con muestras de CBR.

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0.00	0.000									
0.64	0.025									
1.27	0.050									
1.91	0.075									
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>									
3.18	0.125									
3.81	0.150									
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>									
6.35	0.250									
7.62	0.300									
10.16	0.400									
12.70	0.500									

Fuente: Elaboración Propia.



### 3.4.2. Instrumentos de Ingeniería

En la presente investigación se usó instrumentos de Ingeniería de Laboratorio de Suelos, los cuales son fundamentales para poder procesar los datos de cada ensayo, tales instrumentos se detallan a continuación.

#### 3.4.2.1. Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19)

- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.1$  g.
- Taras.
- Horno de secado con capacidad de mantener una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.
- Estufa de secado.
- Malla n° 40.
- Instrumentos de manipulación, guantes, cucharas, cucharón metálico y espátula.
- Piseta de 200 ml.
- Agua destilada.
- Soluciones Buffer.
- Medidor de pH de suelos.
- Recipientes cerrados.

#### 3.4.2.2. Determinación del Contenido de Humedad Natural

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- Taras.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.
- Instrumentos de manipulación, guantes, cucharas, cucharón metálico y espátula.

#### 3.4.2.3. Análisis Granulométrico por Tamizado

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.
- Tamices: 75 mm (3”), 50.0 mm (2”), 37.5 mm (1 ½”), 25.0 mm (1”), 19.00 mm (3/4”), 9.5 mm (3/8”), 4.75 mm (N°4), 2.00 mm (N°10), 0.850mm (N°20), 0.425 mm (N°40), 0.250 mm (N°60), 0.106 mm (N°140), 0.075 (N°200).
- Tamizador vibratorio.
- Agua.
- Envases y fuentes para el material.



- Cepillo y brocha para la limpieza de los tamices.

#### 3.4.2.4. Análisis granulométrico por Tamizado

- Cilindro de vidrio, para sedimentación.
- Termómetro de inmersión, con apreciación de 0,5 °C.
- Cronómetro o reloj.
- Hidrómetro. Graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión o los gramos por litro de suspensión.
- Agente dispersante. Una solución de hexametáfosfato de sodio.
- Aparato agitador.

#### 3.4.2.5. Determinación del Límite Líquido

- Aparato “Cuchara de Casa Grande”.
- Recipientes para almacenaje.
- Ranurador o Acanalador.
- Calibrador.
- Recipientes Metálicos.
- Pipeta.
- Tamiz N°40.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Espátula de hoja flexible y mortero.
- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.

#### 3.4.2.6. Determinación del Limite Plástico e Índice de Plasticidad

- Vasija de porcelana para almacenado.
- Vidrio esmerilado.
- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- Recipientes Metálicos.
- Espátula y mortero.
- Tamiz n° 40
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.

#### 3.4.2.7. Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado)

- Molde de 6”.



- Pisón o martillo.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.
- Bandeja o recipiente metálico.
- Extractor de muestras.
- Cucharón, badilejo, espátula
- Enrasador o regla de metálica.
- Balanza con aproximación de 0.01 g.
- Tamices  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y N°4.

#### 3.4.2.8. Determinación de Capacidad de Soporte CBR

- Pisón de compactación.
- Molde de metal de 6" con collarín.
- Tamices n° 4,  $\frac{3}{4}$ " y 2".
- Balanza con aproximación de 0.01 g.
- Cucharón y enrasador.
- Disco espaciador de metal, con forma circular.
- Aparato medidor de expansión.
- Pesas cerradas para CBR de 2.71 kg.
- Placa de expansión en bronce.
- Pesas ranuradas de metal (Pesas abiertas) cada una con peso de 2.293 kg.
- Trípode de expansión para CBR y diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y divisiones lecturas en 0.025 mm (0.001").
- Aparato para aplicar la carga: Prensa hidráulica con anillo de carga.  $V = 0.05$  pulg/min.
- Pozo de agua.
- Hojas de papel filtro.

### 3.5. Procedimiento de Recolección de Datos

#### 3.5.1. Muestreo de Suelos

##### a) Instrumentos

- Equipos de protección personal.
- Barrenos Manuales.
- Pala.
- Pico.



- Barretas.
- Baldes.
- Recipiente hermético para almacenar la muestra alterada.

b) Procedimiento

- La Vía Expresa, que se encuentra ubicada en los distritos de San Sebastián y Wanchaq, provincia del Cusco, Departamento del Cusco; esta tiene una longitud aproximada de 6.9 Km dada la longitud de la vía se tomó la decisión de evaluar y determinar el tipo de suelo de 750 metros.
- El tramo que se escogió presenta un suelo arcilloso de baja plasticidad según el sistema de clasificación SUCS, mientras que se considera un suelo A-6-().
- Para determinar la zona de estudio, se hizo un reconocimiento de campo por toda la vía para poder encontrar las zonas más afectadas, el tipo de material necesario para hacer la estabilización y al mismo tiempo encontrar zonas donde sea fácil la extracción de muestras, es decir zonas donde sea posible la habilitación de calicatas.
- En este proceso se pudo observar que la zona que cumplía con los requisitos antes mencionados era el tramo 03+950 Km – 04+680 Km, ya que esta parte no estaba aún pavimentada, existía presencia de material arcilloso (reconocimiento que se hizo mediante la observación de la coloración, y comprobado mediante un ensayo preliminar) y era factible habilitar calicatas.
- Al comprobar la presencia del suelo arcilloso, determinamos extraer las muestras (según MTC E 101) de la calicata del km 04+500, que, a su vez es donde se evidencia el mayor desgaste de la pista.
- Se excavó la calicata con dimensiones de 1.20 x 0.80 metros y con una profundidad de 1.90 metros.
- Se extrajo la **muestra alternada** según la norma MTC E 101 “Deben obtenerse muestras representativas de suelo o roca, o de ambos, de cada material que sea necesario para la investigación. El tamaño y tipo de la muestra requerida, depende de los ensayos que se vayan a efectuar y del porcentaje de partículas gruesas en la muestra, y las limitaciones del equipo de ensayo a ser usado” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).
- Las muestras fueron extraídas de la calicata al recipiente hermético mediante baldes, en todo momento se tuvo cuidado de mantener el contenido de humedad natural que presentaba el suelo.

- Se extrajo un total aproximado de 500 kg para la realización de los ensayos mencionados en la Tabla 9 (73 ensayos).
- Después de realizar las tres calicatas, procedimos a realizar la esquematización de las zonas estudiadas mediante un perfil en planta para poder detallar las progresivas de las zonas de estudio.

**Figura 26. Delimitación de la Vía Expresa Cusco.**



Nota. Imagen satelital para delimitar la vía Expresa de Cusco. Tomado de *Google Earth* [Imagen], GOOGLE, 2021.

**Figura 27. Excavación de Calicata 1 (C-1).**



Nota. Excavación de la calicata 1 en la Vía Expresa de Cusco km 04 + 150. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



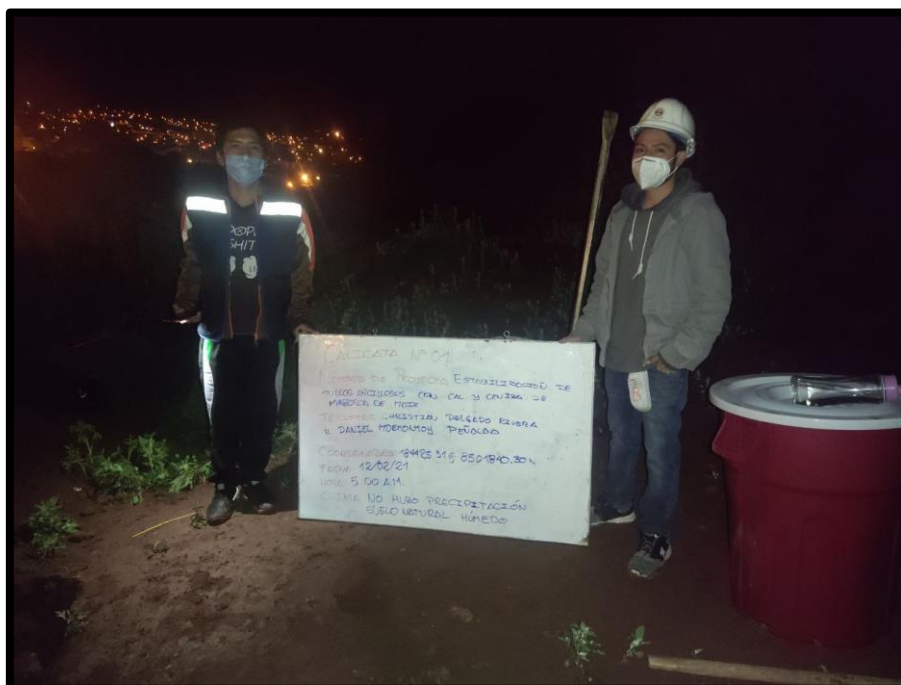


**Figura 28. Excavación de Calicata 2 (C-2).**



Nota. Excavación de la calicata 2 (C-2) en la Vía Expresa de Cusco km 04 + 350. Se comenzó con la excavación a las 4:00 am. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 29. Calicata 2 (C-2)**



Nota. Excavación de la calicata 2 finalizada y registrada en la Vía Expresa de Cusco km 04 + 350, se extrajo material para el ensayo preliminar. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



Figura 32. Estratigrafía de la Calicata 3 (C-3).

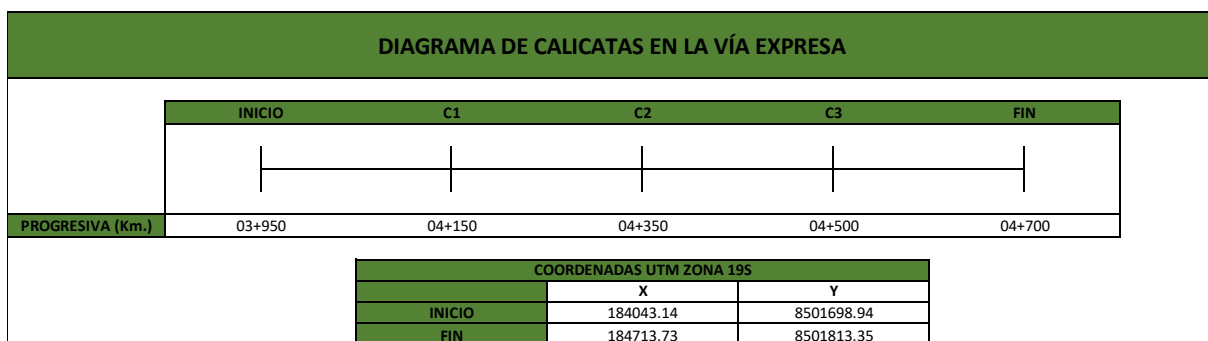


Nota. La calicata 3 presenta un material orgánico en los 30 primeros centímetros (raíces profundas y pastos), así mismo se evidencia visualmente el color y la textura típica de la arcilla. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

c) Toma de Datos

Se obtuvo los siguientes diagramas del muestreo de suelos.

Figura 33. Perfil en planta de la Vía Expresa



Nota. Diagrama de calicatas para la extracción de muestras. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021

Cada calicata necesita un perfil estratigráfico, esto para un mejor detalle del tipo de material que se encontró en cada zona de estudio.

Figura 34. Estratigrafía (C-1)

PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 01						
Prof. (m)	Tipo de Excavación	Estrato (espesores)	Símbolo	Descripción del material	Nombre del grupo	SUCS - AASHTO
0.00	Calicata N°01	E01 (0.00-0.15)		Presencia de relleno y raíces		
0.20		E02 (0.15 - 1.90)		Material que contiene más del 80% de fino de color marrón con poca presencia de grava	Arcilla con presencia de limos	CL - A-7-6
0.40						
0.60						
0.80						
1.00						
1.20						
1.40						
1.60						
1.80						
2.00						

Nota. Calicata n° 01 ubicada en el km 04+150 de la Vía Expresa, con 1.50 m de profundidad, donde se evidencia la presencia de arcilla limosa. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Figura 35. Estratigrafía (C-2)

PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 02						
Prof. (m)	Excavación	(espesores)	Símbolo	material	grupo	SUCS - AASHTO
0.00	Calicata N°02	E01 (0.00-0.20)		Presencia de relleno y raíces		
0.20		E02 (0.20 - 1.90)		Material que contiene más del 80% de fino de color marrón con poca presencia de grava	Arcilla con presencia de limos	CL - A-7-6
0.40						
0.60						
0.80						
1.00						
1.20						
1.40						
1.60						
1.80						
2.00						

Nota. Calicata n° 02 ubicada en el km 04+350 de la Vía Expresa, con 1.55 m de profundidad, donde se evidencia la presencia de arcilla limosa. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Figura 36. Estratigrafía (C-3)

PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 03						
Prof. (m)	Tipo de Excavación	Estrato (espesores)	Símbolo	Descripción del material	Nombre del grupo	SUCS - AASHTO
0.00	Calicata N°03	E01 (0.00-0.30)		Presencia de relleno y raíces		
0.20		E02 (0.30-1.90)		Material que contiene más del 80% de fino de color marrón con poca presencia de grava	Arcilla con presencia de limos	CL - A-7-6
0.40						
0.60						
0.80						
1.00						
1.20						
1.40						
1.60						
1.80						
2.00						

Nota. Calicata n° 03 ubicada en el km 04+550 de la Vía Expresa, con 1.50 m de profundidad, donde se evidencia la presencia de arcilla limosa. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021

d) Para la estabilización del suelo se usó dos tipos de aditivos, uno de ellos fue cal hidráulica puesto que la estabilización dependerá del contenido de calcio que pueda contener este material y se comparó con cal de obra; se pudo observar en las fichas técnicas que la cal hidráulica contenía más calcio respecto a la cal de obra.

Figura 37. Ficha técnica de Cal Hidráulica.





Nota. Cal hidráulica de la marca Martell, que se usará como aditivo principal en investigación. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

e) Se utilizó como agente estabilizador secundario, ceniza de mazorca de maíz, para la obtención de esta ceniza se utilizó la cuarta parte de un cilindro para que el material pueda ser quemado con facilidad y así no se pierda la ceniza por acción del viento.

**Figura 38. Incineración de la ceniza de mazorca de maíz.**



Nota. Ceniza de mazorca de maíz, después del proceso de calcinación, que se usará como aditivo secundario en investigación. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

f) El proceso de la quema de este material se realizó aproximadamente a unos 350 °C de temperatura, seguidamente se procedió al enfriamiento, este último proceso tardó casi un día puesto que siendo el cilindro de metal concentraba el calor y por la gran cantidad de ceniza, se dificultó el proceso de enfriamiento. Al final esta ceniza pasó por un proceso de tamizado para que este pueda ser mezclado con mayor facilidad con el suelo natural y la cal.

### **3.5.2. Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19)**

a) Instrumentos

- Balanza con sensibilidad de  $\pm 0.1$  g.
- Taras.
- Horno de secado con capacidad de mantener una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.



- Estufa de secado.
- Malla n° 40.
- Instrumentos de manipulación, guantes, cucharas, cucharón metálico y espátula.
- Piseta de 200 ml.
- Agua destilada.
- Soluciones Buffer.
- Medidor de pH de suelos.
- Recipientes cerrados.

b) Procedimiento

- Se seca el material en la estufa y cuando pierde la mayoría de humedad se procede a secar durante 24 horas en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.
- Se debe calibrar el medidor de pH de suelos con las soluciones buffer.
- Se pesan las 5 taras, secas y limpias en la balanza de precisión  $\pm 0.1$  gr.
- Se tamiza el suelo seco por la malla número 40 y se pesa  $25 \pm 0.1$  gr. en cuatro taras.
- Se agrega 3%, 4%, 5% y 6% de cal respecto al peso de la muestra del suelo seco, siendo 0.75 gr., 1.00 gr., 1.25 gr. y 1.50 gr. respectivamente.
- En una quinta tara se agrega 2 gr. de cal, que servirá de guía para establecer el pH al cual debemos llegar.
- Se procede a agregar 100 ml. de agua destilada en un recipiente cerrado, donde agregaremos los 2 gr. cal.
- Se agita durante 30 segundos el recipiente cerrado y se deja reposar durante 10 minutos, tal proceso se repite 6 veces. Al terminar se agita una séptima vez y se procede a hacer la medición con el medidor de pH de suelos, cabe resaltar que solo se tienen 15 minutos para poder realizar la medición después del proceso de mezclado. La medición de este ensayo servirá de guía para tener el pH óptimo de nuestra cal.



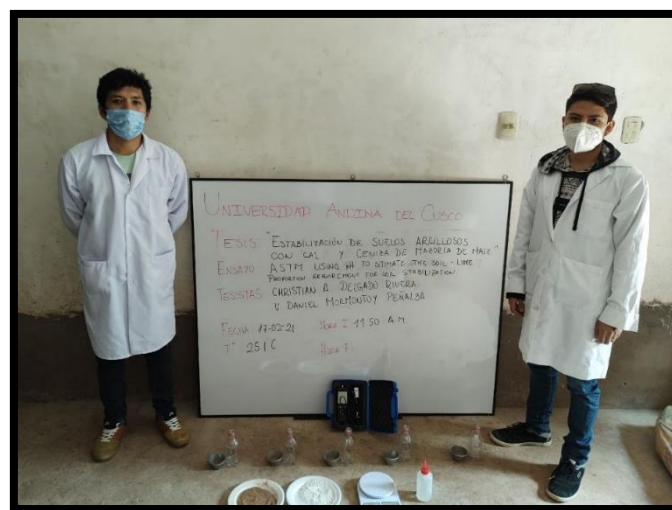
**Figura 39. Preparación y pesado de muestras de suelo tamizado y cal en las taras.**



Nota. Se tomaron 5 muestras de suelo para la realización de la prueba de PH, la muestra fue secada previamente, y se usa agua destilada. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

- Al determinar el pH óptimo de la cal podremos realizar el proceso de mezclado en el resto de las muestras.
- Se alistan 4 recipientes cerrados, y en cada uno se agrega 100 ml. de agua destilada, cal y suelo natural de las taras pesadas previamente. Cada recipiente se agita durante 30 segundos y se deja reposar 10 minutos, repitiendo este proceso 6 veces, al terminar se agita una séptima, con la cual podremos medir el pH de las muestras mezcladas en un máximo de 15 minutos.

**Figura 40. Equipos para ensayo de Determinación del porcentaje de Cal mediante pH**



Nota. Imagen tomada con todos los insumos preparados para la realización del ensayo del pH,





el equipo para medir el pH fue calibrado previamente con soluciones buffer, las cuales nos permitirán tener resultados de alta precisión. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 41. Resultados de las mediciones de pH**





Nota. Se puede observar en la imagen de la derecha que, la muestra de arcilla con 5% de Cal tiene un pH de 7.24, el cual es idéntico al resultado de la muestra patrón, como se puede observar en la imagen de la derecha, donde solo se tiene cal y agua destilada. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



c) Toma de Datos

Tabla 20. Toma de datos - Determinación del porcentaje de cal mediante pH

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 					
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"				
Ensayo:	Determinación del Contenido de Cal mediante en pH en la estabilización de un suelo				
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500				
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba				
Descripción de Muestra:	Suelo arcilloso				
Fecha de ensayo:	17/02/2021				
<u>Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19)</u>					
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04	Muestra Guía
Peso de Recipiente (gr)	30.80	30.10	31.00	30.50	31.10
Peso de Muestra Seca (gr)	25.00	25.00	25.00	25.00	0.00
Peso de Cal (gr)	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00
Porcentaje de Cal (%)	3.00	4.00	5.00	6.00	100.00
Contenido de Agua (ml)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
pH	7.21	7.22	7.24	7.24	7.24

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3. Determinación del Contenido de Humedad Natural

a) Equipos

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- Taras.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Instrumentos de manipulación, guantes, cucharas, cucharón metálico y espátula.

b) Procedimiento

- Se procede a pesar las taras metálicas en la balanza de precisión de ± 0.01g, y registrar el número de recipiente en la ficha de toma de datos.
- Se hace un proceso de cuarteo del material tomado de la calicata a estudiar, para seleccionar las muestras.
- Se añade muestras de la tierra húmeda en las taras y se procede a pesar.



- Se registran los datos del peso de la tara y la muestra húmeda.
- Las taras ingresan al horno de  $115 \pm 5$  °C de temperatura por 24 horas, pasado este tiempo se procede a pesar las taras con las muestras secas.
- Se registran los pesos en la balanza de precisión de 0.01g de las muestras en la ficha de datos.

**Figura 42. Cuarteo de suelos para la homogenización de muestras**



Nota. Para realizar los ensayos se homogenizó las muestras de arcilla, con el fin de tener un resultado más certero, usando el método de cuarteo. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 43. Ensayo de determinación del contenido de humedad natural**





Nota. En la imagen se puede observar resultado de las muestras de contenido de humedad, antes de ser secadas en horno y proceder a realizar sus cálculos. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



c) Toma de Datos

Véase la tabla 21 (MTC E 108)

Tabla 21. Toma de datos de Determinación del Contenido de Humedad

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Contenido de Humedad del Suelo Natural			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 04+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa Cusco.			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<u>MTC E 108, Basado en la Norma ASTM D-2216</u>				
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>	<b>Muestra 03</b>	<b>Muestra 04</b>
Peso de Recipiente (gr)	15.45	16.26	16.41	16.4
Peso de Recipiente + Muestra Húmeda (gr)	75.77	67.63	79.26	74.04
Peso de Recipiente + Muestra Seca (gr)	64.81	57.97	67.68	63.56
Peso del Agua (gr)	10.96	9.66	11.58	10.48
Peso de Muestra Seca (gr)	49.36	41.71	51.27	47.16
<b>Contenido de Humedad</b>				
<b>Contenido de Humedad Promedio</b>				

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.5.4. Análisis granulométrico por tamizado y granulometría por hidrómetro

a) Equipos

Granulometría por tamizado:

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Tamices: 75 mm (3"), 50.0 mm (2"), 37.5 mm (1 ½"), 25.0 mm (1"), 19.00 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N°4), 2.00 mm (N°10), 0.850mm (N°20), 0.425 mm (N°40), 0.250 mm (N°60), 0.106 mm (N°140), 0.075 (N°200).
- Tamizador vibratorio.
- Agua.



- Envases y fuentes para el material.
- Cepillo y brocha para la limpieza de los tamices.

#### Granulometría por hidrómetro:

- Cilindro de vidrio, para sedimentación.
- Termómetro de inmersión, con apreciación de 0,5 °C.
- Cronómetro o reloj.
- Hidrómetro. Graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión o los gramos por litro de suspensión.
- Agente dispersante. Una solución de hexametáfosfato de sodio.
- Aparato agitador.

#### b) Procedimiento

##### Análisis granulométrico por tamizado:

- Primero se hace un cuarteo del material para tener las muestras más representativas y homogéneas del suelo.
- La muestra obtenida será pesada y saturada durante 24 horas, con el fin de obtener una masa constante.
- Se procede a lavar las muestras pasadas las 24 horas, teniendo cuidado de no desperdiciar material, usando la malla #200 (75 mm), con el fin de separar los finos del suelo y conservando el material que quede en la malla #200, para luego ser secado en el horno.
- Cuando el material está seco, se procede a pesar y determinar la pérdida por lavado.
- El material seco se pone en la serie de tamices: 75 mm (3"), 50.0 mm (2"), 37.5 mm (1 ½"), 25.0 mm (1"), 19.00 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N°4), 2.00 mm (N°10), 0.850mm (N°20), 0.425 mm (N°40), 0.250 mm (N°60), 0.106 mm (N°140), 0.075 (N°200), teniendo un orden de abertura descendente. Una vez colocado, se procede a encender la tamizadora mecánica para obtener las fracciones retenidas en cada malla.
- Se registra el peso retenido en cada tamiz y con la balanza de precisión. Cabe resaltar que la sumatoria de los pesos retenidos y el peso inicial o debe variar en más de 1%.
- Finalmente se procede a graficar los datos en la curva granulométrica.

##### Análisis granulométrico con hidrómetro:

- Se separan 50 gr del material que paso la malla #200 (suelo seco) que se requerirán para el ensayo.



- En el tubo de ensayo se alista 1000 ml de agua destilada agregada más 3% de hexametáfosfato de sodio.
- Se agrega los 50 gramos al tubo de ensayo, teniendo cuidado de no perder material en los bordes, y se mezcla cuidadosamente con la solución.
- El hidrómetro se sumerge en el tubo de ensayo, hasta que este en equilibrio, donde se procede a realizar las mediciones.
- De acuerdo con el tiempo establecido en la ficha de datos, se tomarán mediciones tanto del hidrómetro como de la temperatura.
- Es importante limpiar el hidrómetro y el termómetro después de cada medición, por lo que es necesario tener un recipiente con agua destilada donde puedan reposar y limpiarse para su próxima medición.
- Los datos registrados son procesados en gabinete, donde obtendremos el porcentaje de arcillas y limos que posee el material fino del suelo tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco.

**Figura 44. Lavado de material en la malla #200**



Nota. Lavado del material usando el tamiz de malla #200. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

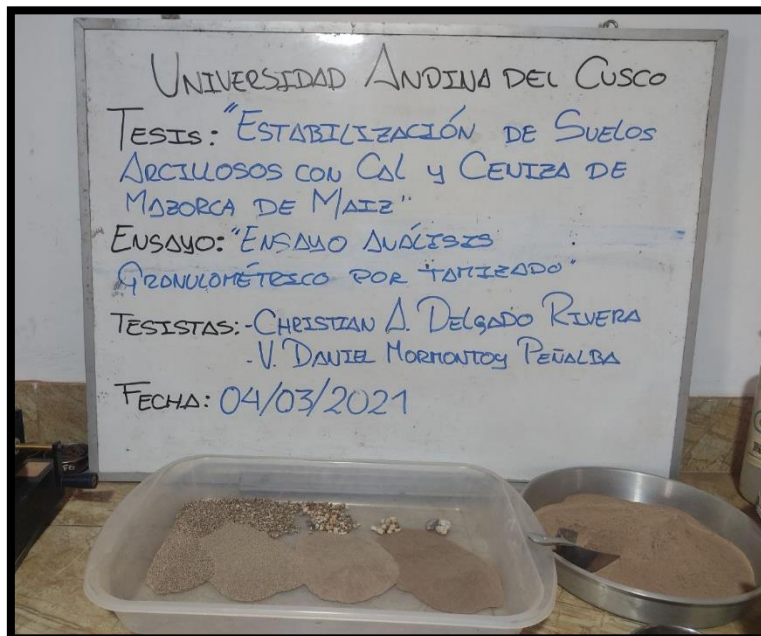


**Figura 45. Preparación de tamices para el ensayo granulométrico.**



Nota. Imagen de los tamices usados para el ensayo de granulometría, se puede observar que antes de ser sometidas a la máquina de tamizaje, se deben asegurar todos los tamices. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 46. Gradación de partículas del análisis granulométrico por tamizado**



Nota. Se puede observar en la imagen, el resultado del tamizado, el cual está separado por las muestras que fueron retenidas en cada tamiz, a la derecha se puede observar el material que paso la malla #200. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

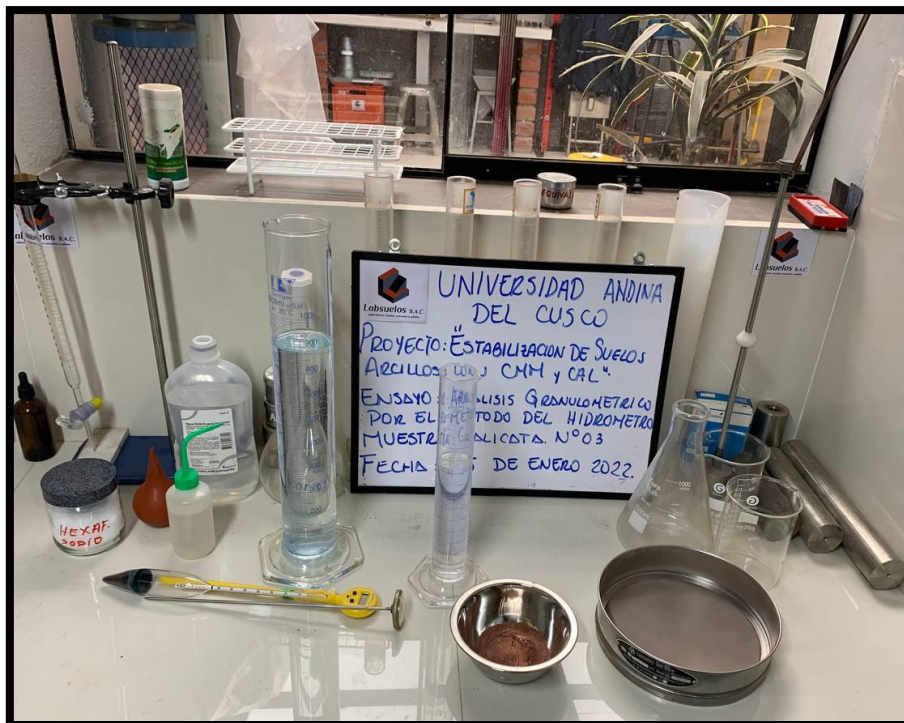


**Figura 47. Preparación de la muestra seca para ensayo del hidrómetro.**



Nota. Se prepararon 50 gr. del material que paso la malla #200, es decir el material fino que resultado de la granulometría por tamizado. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 48. Instrumentos usados en el ensayo de hidrómetro.**



Nota. Los equipos necesarios para realizar la prueba del hidrómetro son especiales para determinar el porcentaje de finos que se tiene en las muestras de suelo, ya que los tamices no tienen aberturas tan pequeñas. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.





**Figura 49. Preparación de la solución para el ensayo del hidrómetro.**



Nota. La solución consta de 1000 ml de agua destilada + 3% de hexametáfosfato de sodio.  
Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 50. Realización del ensayo del hidrómetro.**





Nota. Se puede apreciar en la imagen, el hidrómetro sumergido en la muestra con la solución para su medición. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



c) Toma de Datos

Véase tabla 22 (MTC E 107)



Tabla 22. Toma de datos – Análisis granulométrico por tamizado

	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"				
Ensayo:	Análisis Granulométrico del Suelo por Tamizado				
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500				
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba				
Descripción de Muestra:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa Cusco, secado previamente en la estufa.				
Fecha de ensayo:	04/03/2021				
<u>MTC E 107 – ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO</u>					
Peso de la Muestra Seca:	1050.5	gr.			
Peso de Muestra Lavada	302.45	gr.			
Pérdida por Lavado:	748.05	gr.			
<b>Tamiz N°</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (gr)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Acumulado</b>	
				<b>% Retenido</b>	<b>% Pasa</b>
3"	75.000	0.000			
2"	50.800	0.000			
1 1/2"	38.100	0.000			
1"	25.400	0.000			
3/4"	19.000	0.000			
3/8"	9.500	7.420			
N° - 4	4.760	5.140			
N° - 10	2.000	11.350			
N° - 20	0.840	16.190			
N° - 40	0.425	11.770			
N° - 60	0.250	13.070			
N° - 140	0.106	57.490			
N° - 200	0.075	83.230			
Fondo		96.680			
Pérdida por lavado		748.050			
Parcial Fondo + Pérdida por		844.730			
<b>TOTAL</b>		<b>1050.390</b>			
Tamaño Máximo Absoluto:	3/4"	Error:			
Tamaño Máximo Nominal:	3/8"				
Cu=	*NP= No presenta				
Cc=					

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 23. Toma de Datos -Análisis granulométrico por medio del hidrómetro.

	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"								
Ensayo:	Granulometría por hidrómetro								
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500								
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba								
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Vía Expresa km 04+500								
Fecha de ensayo:	22/01/2022								
<u>MTCE 109 – ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO</u>									
Masa del suelo seco: 50 gr.	Corrección por agente defloculante y punto cero (g/L): 6.5								
Tipo de Hidrómetro: 152 H	Gravedad Específica: 2.67								
Tiempo (min)	Lectura del Hidrómetro	Temperatura °C	Rcp	Profundidad efectiva mm	Diámetro mm	Corrección de temperatura	R Corregida	% pasante	Constante K
1	46	19							
2	44	19							
10	40	19							
15	38	19							
30	35	19							
60	33	19							
250	30	20							
384	28	20							
470	27	20							
1326	25	17							
De la tabla:									
2.65		=0.99549							
2.67									
2.75									

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.5. Determinación del Limite Líquido

#### a) Equipos

- Aparato “Cuchara de Casa Grande”.
- Recipientes para almacenaje.
- Ranurador o Acanalador.
- Calibrador.
- Recipientes Metálicos.
- Pipeta.
- Tamiz N°40.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Espátula de hoja flexible y mortero.



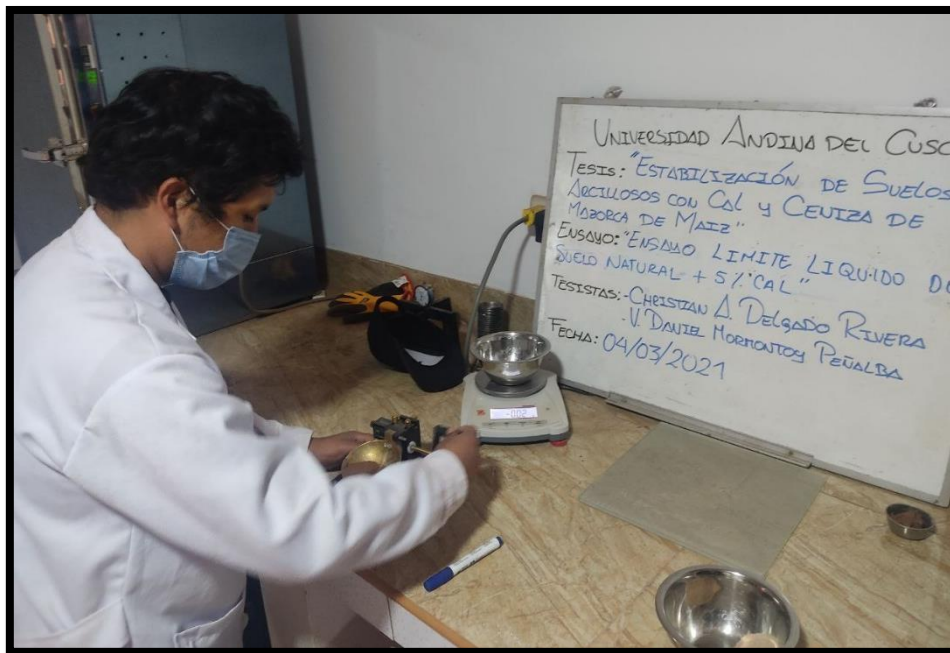
- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.

b) Procedimiento

- Se calibra la cuchara de Casa Grande, haciendo que tenga una caída de 1 cm.
- Para la preparación de muestra, se obtiene una porción de muestra representativa de 150 a 250 gr. de material que pase por la malla n° 40.
- La muestra representativa se mezcla con agua en un recipiente de porcelana, con la ayuda de la espátula se llegará a tener una consistencia pegajosa y homogénea.
- Se coloca el material mezclado en la cuchara de Casa Grande, aproximadamente 1 cm de espesor y dándole un acabado nivelado con superficie regular, es importante tratar de pasar la menor cantidad de veces con la espátula.
- Con el acanalador hacemos una línea por el medio de la cuchara, esta línea debe ser limpia, separando el material de la cuchara en dos partes.
- Girando la manija del aparato de Casa Grande, a una velocidad constante, la cuchara se elevará 1 cm y caerá golpeándola, esto generará que el material separado por el acanalador se junte, siendo el número de golpes necesario para juntar el material el dato que se procede a registrar.
- Se toma una porción de muestra, perpendicular a la ranura, de aproximadamente una pulgada de ancho y se coloca en un recipiente metálico, el cual pesaremos y registraremos para determinar el contenido de humedad.
- El proceso se repite con el material restante, hasta tener los datos necesarios para cumplir los intervalos de golpes que requiere la ficha de toma de datos, se puede agregar o quitar humedad del material según sea conveniente.
- Se registrará los números de golpes y se extraerá la muestra representativa de cada ensayo, las cuales se procederán a pesar y secar en el horno a  $110 \pm 5$  °C durante 24 horas, para poder determinar el contenido de humedad.

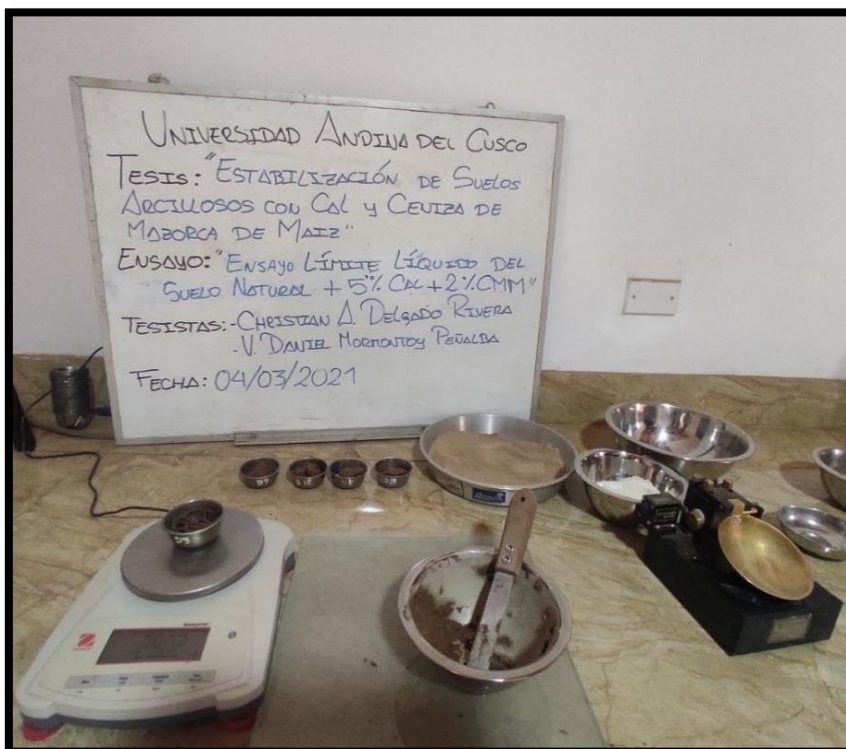


Figura 51. Realización del ensayo de límite líquido



Nota. Imagen tomada en el proceso de límite líquido [Fotografía], 2021.

Figura 52. Ensayo de límite líquido, muestras pesadas y equipos.





Nota. Imagen de los instrumentos usados para la determinación de límite líquido. Adaptación Propia [Fotografía], 2021.



c) Toma de Datos

Véase Tablas 24, 25, 26, 27, 28. (MTC E 110)



Tabla 24. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<p><u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u></p>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	50.38	54.06	55.59	51.48
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	38.95	42.78	44.56	41.14
Peso Recipiente Metálico (gr)	15.34	16.31	16.78	15.23
Peso Suelo Seco (gr)	23.61	26.47	27.78	25.91
Peso Agua (gr)	11.43	11.28	11.03	10.34
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
<b>Número de Golpes (N)</b>	8	17	23	33
<b>Límite Líquido</b>				

Fuente: Adaptación Propia.





Tabla 25. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo + 5% de CAL			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<p><u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u></p>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	54.01	52.98	47.31	49.71
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	43.12	43.69	39.68	41.83
Peso Recipiente Metálico (gr)	14.93	16.11	15.00	15.56
Peso Suelo Seco (gr)	28.19	27.58	24.68	26.27
Peso Agua (gr)	10.89	9.29	7.63	7.88
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
<b>Número de Golpes (N)</b>	4	13	25	38
<b>Límite Líquido</b>				

Fuente: Adaptación Propia.



Tabla 26. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo + 5% de CAL + 1% de CMM			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<p><u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u></p>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	51.25	48.74	47.80	53.52
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	42.00	40.60	40.11	44.85
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.36	15.46	15.82	16.75
Peso Suelo Seco (gr)	25.64	25.14	24.29	28.10
Peso Agua (gr)	9.25	8.14	7.69	8.67
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
<b>Número de Golpes (N)</b>	5	15	27	36
<b>Límite Líquido</b>				

Fuente: Elaboración Propia.







Tabla 27. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo + 5% de CAL + 2% de CMM			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<p><u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u></p>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	47.34	46.89	46.68	46.99
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	38.35	39.07	39.29	39.91
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.16	16.62	16.29	16.13
Peso Suelo Seco (gr)	22.19	22.45	23.00	23.78
Peso Agua (gr)	8.99	7.82	7.39	7.08
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
<b>Número de Golpes (N)</b>	3	14	22	38
<b>Límite Líquido</b>				

Fuente: Adaptación Propia.



Tabla 28. Toma de datos – Ensayo de límite líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo + 5% de CAL + 3% de CMM			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<p><u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u></p>				
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>	<b>Muestra 03</b>	<b>Muestra 04</b>
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	49.08	47.55	47.42	47.85
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	39.87	39.71	39.91	40.63
Peso Recipiente Metálico (gr)	15.96	16.70	16.47	15.81
Peso Suelo Seco (gr)	23.91	23.01	23.44	24.82
Peso Agua (gr)	9.21	7.84	7.51	7.22
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
<b>Número de Golpes (N)</b>	6	15	24	36
<b>Límite Líquido</b>				

Fuente: Adaptación Propia.



### 3.5.6. Determinación del Limite Plástico e Índice de Plasticidad

#### a) Equipos

- Vasija de porcelana para almacenado.
- Vidrio esmerilado.
- Balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- Recipientes Metálicos.
- Espátula y mortero.
- Tamiz n° 40
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.

#### b) Procedimiento

- Con la muestra del ensayo de límite líquido (en las mismas dosificaciones de CAL y CMM), se procede a tomar muestras de 1.5 a 2.0 gr.
- Las muestras se deslizan en el vidrio esmerilado, usando las yemas de los dedos se dan forma de cilindros de aproximadamente 3.2 mm y cuidando que sean regulares y uniformes de inicio a fin.
- Al perder humedad los cilindros se desmoronarán aproximadamente en su diámetro total (3.2 mm) y es cuando termina el ensayo.
- Se repetirá el proceso hasta tener el peso adecuado en los recipientes; y lo mismo se hará con la otra mitad de material para tener dos muestras agregando agua de ser necesario.
- Se pesará los recipientes y se registrarán tales datos, luego se procede a secar las muestras durante 24 horas en el horno de  $110 \pm 5$  °C.
- Pasadas las 24 horas se toma registro del peso seco y se procede a determinar el contenido de humedad.



**Figura 53. Realización del ensayo de límite plástico.**



Nota. Se puede observar que, para realizar el ensayo de límite plástico, se requiere del vidrio esmerilado y mucho cuidado para poder culminar con las muestras tubulares que serán pesadas, etiquetadas y llevadas al horno. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 54. Muestras y equipos del ensayo de límite plástico**



Nota. La imagen muestra la culminación del ensayo de límite líquido y plástico, usando el equipo de protección que requiere el uso del laboratorio. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



**Figura 55. Muestras resultado de los ensayos de límites de consistencia.**





Nota. Las muestras fueron etiquetadas, y puestas en taras para poder secarlas en el horno, es importante tomar con exactitud los pesos en su estado húmedo, ya que son parte fundamental del análisis de datos. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

c) Toma de Datos

Véase tablas 29, 30, 31, 32 y 33. (MTC E 111)





Tabla 29. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	47.51	49.17
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	40.74	41.97
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.12	16.36
Peso Suelo Seco (gr)	24.62	25.61
Peso Agua (gr)	6.77	7.20
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Límite Líquido</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Índice de Plasticidad</b>		

Fuente: Elaboración Propia.





Tabla 30. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural + 5% de CAL.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo + 5% de CAL	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	46.54	48.22
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	39.84	41.37
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.17	17.33
Peso Suelo Seco (gr)	23.67	24.04
Peso Agua (gr)	6.70	6.85
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Límite Líquido</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Índice de Plasticidad</b>		

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 31. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural +5% de CAL + 1% de CMM.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo + 5% de CAL + 1% de CMM	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	45.71	47.88
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	38.83	40.67
Peso Recipiente Metálico (gr)	14.61	16.3
Peso Suelo Seco (gr)	24.22	24.37
Peso Agua (gr)	6.88	7.21
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Límite Líquido</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Índice de Plasticidad</b>		

Fuente: Elaboración Propia.







Tabla 32. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural +5% de CAL + 2% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo + 5% de CAL + 2% de CMM	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	46.3	46.09
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	39.19	38.95
Peso Recipiente Metálico (gr)	15.42	15.38
Peso Suelo Seco (gr)	23.77	23.57
Peso Agua (gr)	7.11	7.14
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Límite Líquido</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Índice de Plasticidad</b>		

Fuente: Adaptación Propia.



Tabla 33. Toma de datos – Determinación del Límite Plástico e Índice de plasticidad del Suelo Natural +5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo + 5% de CAL + 3% de CMM	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	51.99	46.69
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	43.07	39.48
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.90	15.92
Peso Suelo Seco (gr)	26.17	23.56
Peso Agua (gr)	8.92	7.21
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Límite Líquido</b>		
<b>Límite Plástico</b>		
<b>Índice de Plasticidad</b>		

Fuente: Elaboración Propia.



### 3.5.7. Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado)

#### a) Equipos

- Molde de 6".
- Pisón o martillo.
- Horno o estufa de secado con capacidad de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.
- Bandeja o recipiente metálico.
- Extractor de muestras.
- Cucharón, badilejo, espátula
- Enrasador o regla de metálica.
- Balanza con aproximación de 0.01 g.
- Tamices  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y N°4.

#### b) Procedimiento

- Primero se debe determinar el método a usar dependiendo las características del suelo, para lo cual haremos secar muestra en el horno a  $110 \pm 5$  °C, y la tamizaremos en las mallas  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y N° 4.
- Se determina los porcentajes retenidos en cada malla mencionada anteriormente, y se procede a elegir el método a partir de la siguiente tabla (véase tabla 32):

Tabla 34. Métodos de Proctor Modificado según el tamizado.

Método	% Acumulado Retenido en Tamiz n° 04	% Acumulado Retenido en Tamiz $\frac{3}{8}$ "	% Acumulado Retenido en Tamiz $\frac{3}{4}$ "	Material a usar
A	$\leq 20\%$			Pasa N° 04
B	$> 20\%$	$\leq 20\%$		Pasa $\frac{3}{8}$ "
C	-	$> 20\%$	$\leq 30\%$	Pasa $\frac{3}{4}$ "

Fuente: Elaboración Propia

- Con la tabla anterior se pudo determinar que el método de ensayo será el "A" dado que es un material con alta presencia de finos.
- Se procede a secar el suelo y a pesarlo (aproximadamente 6 kg por punto de Proctor), así mismo, se registrará los pesos de los moldes que se usarán para el ensayo. También se pesará los porcentajes en gramos de cal y ceniza de mazorca de maíz, como se indica en la siguiente tabla (Véase tabla 33):



Tabla 35. Pesos de los porcentajes de Cal y Ceniza de Mazorca de Maíz para el ensayo de Proctor

Ensayo	Peso suelo Natural Seco (gr)	% de CAL	Peso de Cal (gr)	% de CMM	Peso de Cal (gr)
Proctor Modificado Suelo Natural	6000.00	0%	0.00	0%	0.00
Proctor Modificado Suelo Natural + 5% CAL + 0% CMM	6000.00	5%	300.00	0%	0.00
Proctor Modificado Suelo Natural + 5% CAL + 1% CMM	6000.00	5%	300.00	1%	60.00
Proctor Modificado Suelo Natural + 5% CAL + 2% CMM	6000.00	5%	300.00	2%	120.00
Proctor Modificado Suelo Natural + 5% CAL + 3% CMM	6000.00	5%	300.00	3%	180.00

Fuente: Adaptación Propia.

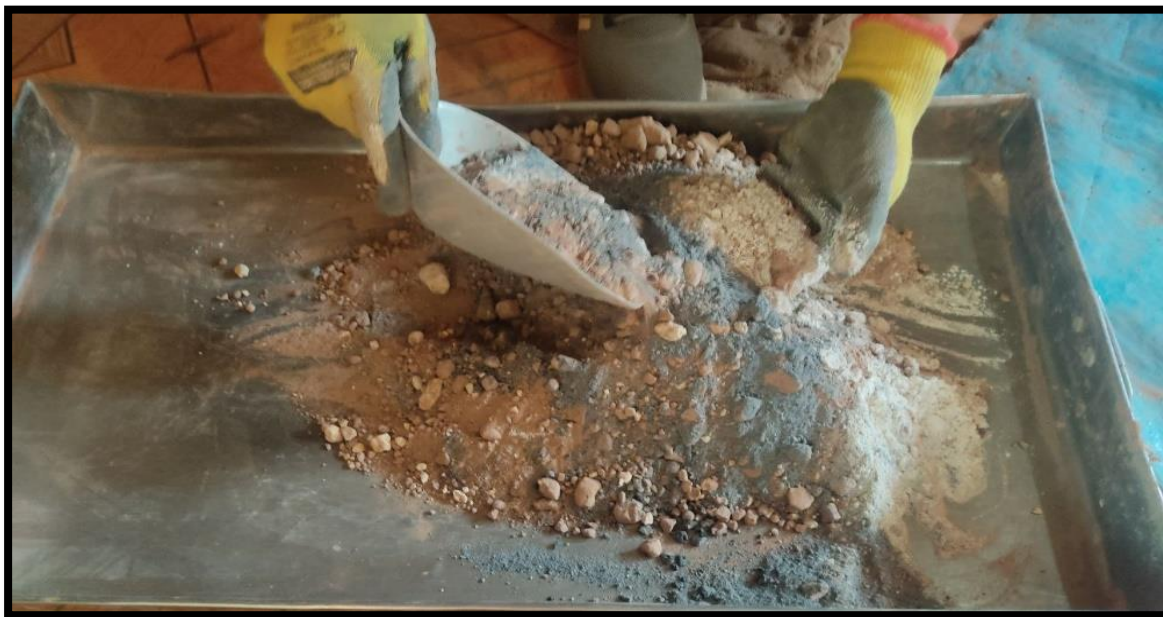
- Al tener el peso del suelo seco y los porcentajes que se usarán de CAL y CMM, se agrega agua en diferentes porcentajes (en arcillas el contenido de humedad varía entre 10% y 17%) para elaborar cada punto del Proctor, se procede a mezclar la muestra en una bandeja metálica, hasta que la muestra quede homogénea.
- Una vez mezclada la muestra se procede a dividir en 5 partes iguales, haciendo uso del cucharón, lo que nos servirá para agregar a los moldes (molde + collarín) en 5 capas.
- Se agrega las muestras separadas anteriormente en el molde y se procede a la compactación con el pisón, se dan 56 golpes por cada capa, hasta cumplir con las 5 capas. Es recomendable extender y acomodar con el pisón para formar una capa uniforme antes de compactar.
- Al terminar las 5 capas se procede a retirar el collarín de extensión, y a enrasar el material que quedo en el molde con una regla metálica dejando una superficie plana en la parte superior e inferior, se rellena cualquier hoyo o hueco que tenga, con el material del collarín, siempre procurando dejar la superficie plana.
- Se extrae una muestra representativa y compactada del molde (axialmente) de la parte central, con la cual determinaremos el contenido de humedad (Obtener el contenido de



humedad de acuerdo al Método ensayo NTP 339.127), tales muestras serán pesadas en recipientes metálicos y registradas.

- Se secarán las muestras durante 24 horas en un horno de  $110 \pm 5$  °C y se pesará en estado seco para determinar su contenido de humedad.
- Se repetirá este proceso para determinar los 4 puntos del ensayo de Proctor y así poder realizar la curva de compactación (Densidad seca / Humedad).

**Figura 56. Muestra de suelo seca y aditivos estabilizadores para ensayo de Proctor Modificado.**



Nota. para realizar el ensayo de Proctor Modificado, se puso en una bandeja la cantidad de material aproximado para realizar el ensayo, en base al peso del material, se agregó los aditivos estabilizantes según su porcentaje, y se procedió a mezclar las muestras. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 57. Mezclado de muestras y aditivos estabilizadores para ensayo de Proctor Modificado.**



Nota. En la imagen se puede apreciar que para en ensayo de SN + 5% de Cal + 3% de CMM, se prepara previamente el material antes de añadirle el contenido de humedad óptimo y homogenizar la muestra. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 58. Separación en 5 capas para Proctor Modificado del Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.**



Nota. En la imagen se puede apreciar la división en 5 partes del material mezclado con los aditivos estabilizadores, los cuales entrarán en capas compactadas al molde. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



**Figura 59. Compactación de Suelo usando pisón del Suelo Natural + 5% CAL + 1% de CMM para Proctor Modificado.**



Nota. Imagen referencial para la elaboración del ensayo de Proctor modificado. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 60. Extracción de muestras representativas para la determinación del contenido de humedad en el ensayo de Proctor Modificado.**



Nota. Se extraen muestras después de la compactación, las cuales serán pesadas y secadas en el horno. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



**Figura 61. Pesado de muestras de Proctor Modificado compactadas + Molde.**



Nota. Al culminar la compactación de las muestras se registra el peso del molde compactado para realizar el análisis de datos. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



c) Toma de Datos

Véase las tablas 36, 37, 38, 39 y 40. (MTC E 115)







Tabla 36. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado en Suelo Natural							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco.							
Fecha de ensayo:	04/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9970.000	9834.00	9590.00	10015.00				
Peso del Molde (gr)	5991.000	5991.00	5991.00	5991.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)								
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )								
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	66.860	67.060	63.83	59.24	58.74	58.48	67.34	73.73
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	58.710	58.930	57.45	53.50	53.94	54.80	59.51	65.53
Peso del Agua (gr)								
Peso de Tara	15.820	16.310	15.89	15.72	15.94	16.71	15.46	15.44
Peso de Muestra Seca (gr)								
Contenido de Humedad (%)								
Contenido de Humedad Promedio (%)								
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )								
Humedad Óptima (%)								
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )								

Fuente: Elaboración Propia.





Tabla 37. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL.							
Fecha de ensayo:	04/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9924.000	9940.00	9676.00	9856.00				
Peso del Molde (gr)	5795.000	5795.00	5795.00	5795.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)								
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )								
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	82.580	75.780	60.58	72.14	62.44	66.21	69.76	77.49
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	71.990	66.910	53.88	64.36	57.66	61.22	62.57	69.42
Peso del Agua (gr)								
Peso de Tara	16.480	15.410	14.32	15.83	14.97	16.60	15.80	16.23
Peso de Muestra Seca (gr)								
Contenido de Humedad (%)								
Contenido de Humedad Promedio (%)								
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )								
Humedad Óptima (%)								
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )								

Fuente Elaboración Propia.





Tabla 38. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL + 1% de CMM							
Fecha de ensayo:	05/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9908.000	10155.00	10172.00	10067.00				
Peso del Molde (gr)	5991.000	5991.00	5991.00	5991.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)								
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )								
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	65.540	64.350	58.29	52.63	66.98	69.53	74.46	81.64
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	60.510	60.240	53.29	48.08	59.59	61.89	65.50	71.20
Peso del Agua (gr)								
Peso de Tara	16.370	16.650	16.61	15.46	15.73	16.75	16.60	16.86
Peso de Muestra Seca (gr)								
Contenido de Humedad (%)								
Contenido de Humedad Promedio (%)								
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )								
Humedad Óptima (%)								
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )								

Fuente: Elaboración Propia.





Tabla 39. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL + 2% de CMM							
Fecha de ensayo:	05/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9537.000	9945.00	10014.00	9922.00				
Peso del Molde (gr)	5795.000	5795.00	5795.00	5795.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)								
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )								
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	77.040	50.260	67.89	66.88	72.12	59.83	61.91	57.82
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	71.360	47.110	62.21	60.64	64.06	53.76	54.57	51.09
Peso del Agua (gr)								
Peso de Tara	16.550	15.610	16.81	15.20	16.84	15.93	15.35	16.87
Peso de Muestra Seca (gr)								
Contenido de Humedad (%)								
Contenido de Humedad Promedio (%)								
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )								
Humedad Óptima (%)								
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )								

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 40. Toma de Datos – Ensayo de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL + 3% de CMM							
Fecha de ensayo:	05/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9842.000	9986.00	10094.00	10036.00				
Peso del Molde (gr)	5795.000	5795.00	5795.00	5795.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)								
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )								
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	64.480	67.870	76.05	69.38	66.49	74.46	76.24	79.90
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	59.940	63.070	69.30	63.07	59.48	66.62	66.46	69.80
Peso del Agua (gr)								
Peso de Tara	15.960	16.540	16.55	17.02	15.65	15.45	15.93	16.62
Peso de Muestra Seca (gr)								
Contenido de Humedad (%)								
Contenido de Humedad Promedio (%)								
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )								
Humedad Óptima (%)								
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )								

Fuente: Elaboración Propia.



### 3.5.8. Determinación de Capacidad de Soporte CBR

#### a) Equipos

- Pisón de compactación.
- Molde de metal de 6" con collarín.
- Tamices n° 4, ¾" y 2".
- Balanza con aproximación de 0.01 g.
- Cucharón y enrasador.
- Disco espaciador de metal, con forma circular.
- Aparato medidor de expansión.
- Pesas cerradas para CBR de 2.71 kg.
- Placa de expansión en bronce.
- Pesas ranuradas de metal (Pesas abiertas) cada una con peso de 2.293 kg.
- Trípode de expansión para CBR y diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y divisiones lecturas en 0.025 mm (0.001").
- Aparato para aplicar la carga: Prensa hidráulica con anillo de carga.  $V = 0.05$  pulg/min.
- Pozo de agua.
- Papel filtro o hojas de papel.

#### b) Procedimiento

- Se debe tener el contenido de humedad óptimo, del ensayo de Proctor modificado, para el tipo de suelo que ensayaremos, esto variará dependiendo los porcentajes de CAL y CMM que usaremos. Así mismo, analizar el contenido de humedad natural y calcular el ajuste de humedad para cada ensayo de CBR.
- Se usará 6.5 kg de suelo que será el 100% para cada ensayo de CBR, y los porcentajes de CAL y CMM se usarán en proporciones como se ve en la siguiente tabla:



Tabla 41. Porcentajes en peso de CAL y CMM para los ensayos de CBR.

Ensayo	Peso suelo Natural Seco (gr)	% de CAL	Peso de Cal (gr)	% de CMM	Peso de Cal (gr)
CBR Suelo Natural	6500.00	0%	0.00	0%	0.00
CBR Suelo Natural + 5% CAL + 0% CMM	6500.00	5%	325.00	0%	0.00
CBR Suelo Natural + 5% CAL + 1% CMM	6500.00	5%	325.00	1%	65.00
CBR Suelo Natural + 5% CAL + 2% CMM	6500.00	5%	325.00	2%	130.00
CBR Suelo Natural + 5% CAL + 3% CMM	6500.00	5%	325.00	3%	195.00

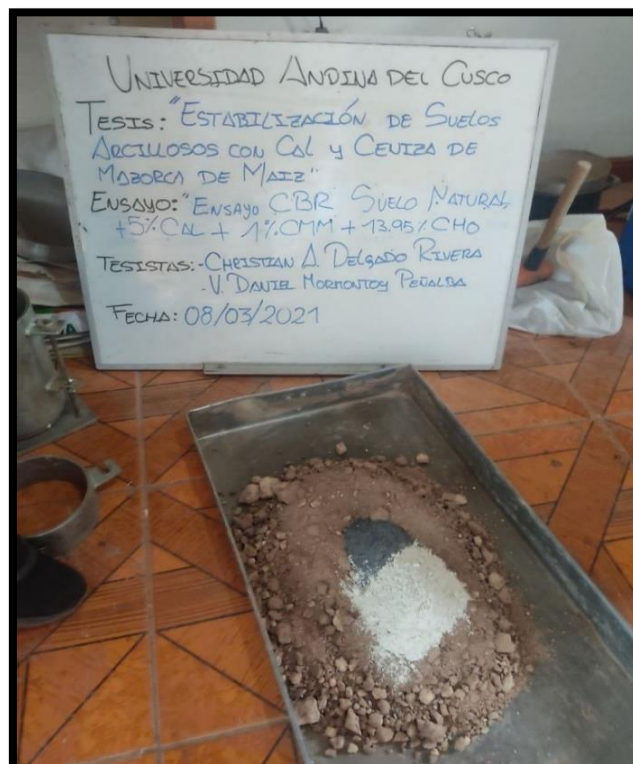
Fuente: Elaboración Propia.

- Se procede a pesar los moldes y prepararlos para el ensayo, colocando el collarín, disco espaciador y el papel filtro en los tres moldes de CBR.
- Se preparan las muestras en una bandeja metálica, mezclando el suelo con los porcentajes de CAL y CMM, según el ensayo que se va a realizar, y agregando agua para cumplir el contenido de humedad óptimo.
- La muestra mezclada y homogenizada en la bandeja se divide en 5 porciones iguales, esas servirán para llenar las 5 capas del molde. Este proceso se repetirá 3 veces con una muestra de 6500 gr como el 100% hasta completar los 3 ensayos de CBR (12, 25 y 56 golpes) por cada dosificación de suelo natural, cal y ceniza de mazorca de maíz.
- Cuando las muestras fueron compactadas con el determinado número de golpes, se procede a separar del collarín y enrasar con una regla metálica, se gira el molde de modo que la parte superior quede abajo, y asegurándolo con a la base y se retira el disco espaciador, donde luego entrarán las sobrecargas (pesas).
- Se registra el peso de la muestra compacta con la base y molde.
- Se coloca papel filtro en la parte superior de la muestra, luego se pondrá la placa perforada con vástago ajustable y sobre ella se coloca las pesas de sobrecarga.
- Se procede a hacer la lectura con el trípode y el dial, marcando los puntos en los cuales se apoyó el trípode.



- Las muestras se sumergen en agua, saturándose durante 4 días, a lo largo de este tiempo se tomará las variaciones de volumen que tendrá la muestra usando el trípode y el dial, teniendo en cuenta que las patas del trípode estén puestas en los puntos marcados.
- Después de 4 días se sacan las muestras del pozo de inmersión, y se deja drenar durante 15 minutos, se retira el vástago y la placa, quedando las pesas puestas en la muestra.
- Se procede a hacer el ensayo de penetración en el equipo de CBR, verificando que el dial de presión (carga) y el de deformación estén en cero.
- La velocidad de penetración será de 0.05 pulgadas por minuto, y registrando los datos de presión a 0.00, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 y 0.500 pulgadas de penetración.
- Finalmente se retira la muestra del equipo de CBR y se quitan las sobrecargas de la muestra (pesas), para tomar una muestra del suelo ensayado y determinar la humedad final.

**Figura 62. Preparación de la muestra de CBR para suelo natural + 5% de CAL +1% de CMM + 13.95 de agua.**



Nota. para realizar el ensayo de CBR se prepara las muestras de suelo, cal y CMM para homogenizarlas, antes de agregar el contenido de humedad óptimo. Adaptación Propia [Fotografía], 2021.



**Figura 63. Compactación se suelos para ensayo de CBR con suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM + 15.10% de agua.**



Nota. Se puede observar en la imagen, el proceso de compactación de muestras en el molde, se divide en 5 capas. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 64. Muestras de CBR compactadas y listas para inmersión (con pesas)**



Nota. Las muestras son sometidas a presión mediante pesas, y las cuales proceden a sumergirse en agua. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

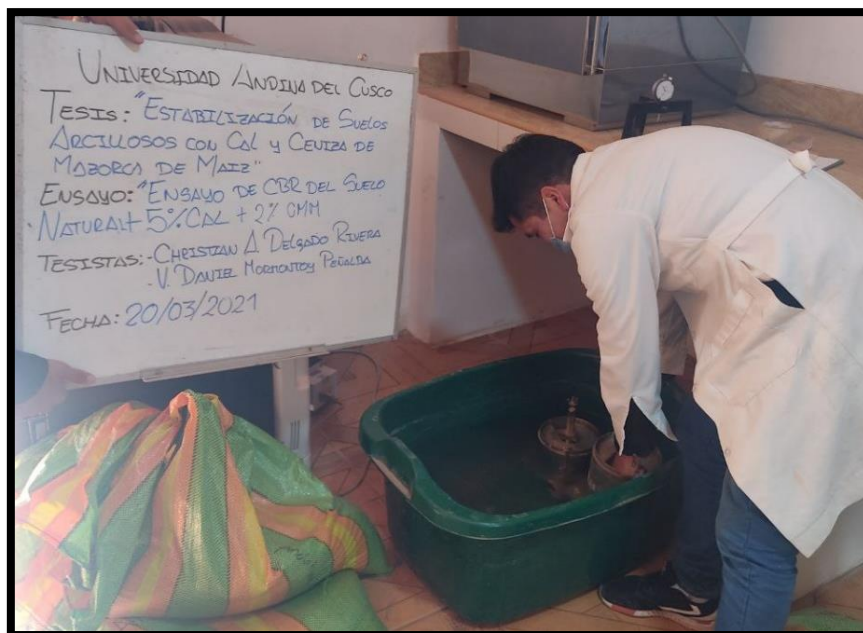


**Figura 65. Enrasado de muestras de CBR en ensayo de suelo natural.**



Nota. Las muestras fueron enrasadas con una regla, en caso haya huecos en el molde, estos deben ser rellenados. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 66. Inmersión en agua de muestras de CBR en el ensayo de suelo natural + 5% de CAL + 2% de CMM.**



Nota. Los moldes con la muestra compactada son sumergidos en agua por 4 días. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 67.** Toma de datos con el trípode y dial, en el ensayo de CBR para la verificación del hinchamiento.



Nota. Las muestras sumergidas, son monitoreadas con un dial cada 24 horas, para verificar el hinchamiento que tendrán. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

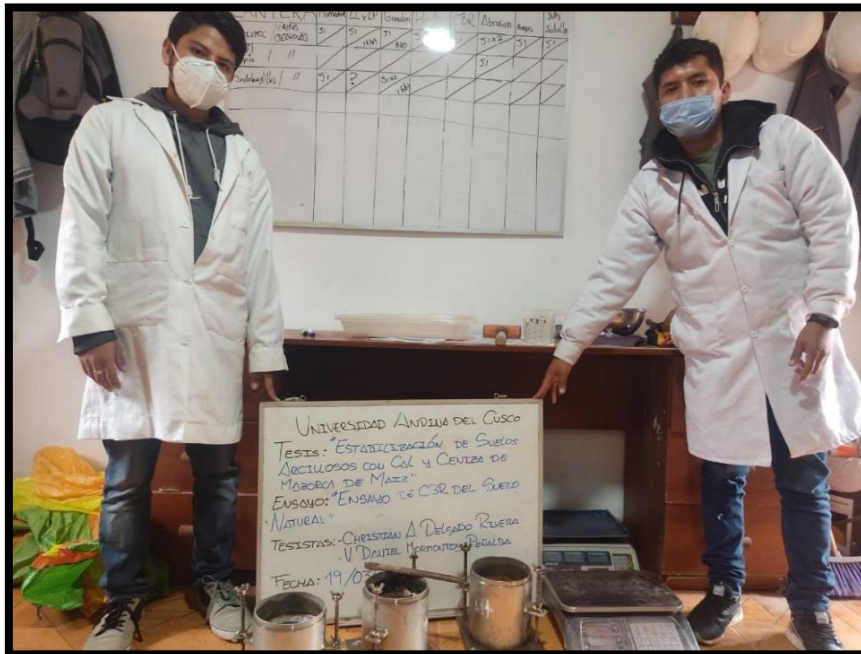
**Figura 68.** Ensayo de penetración en equipo de CBR de suelo natural + 5% de CAL.



Nota. La muestra en el molde es sometida a una penetración controlada, y mediante el dial se cuantifica los datos. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

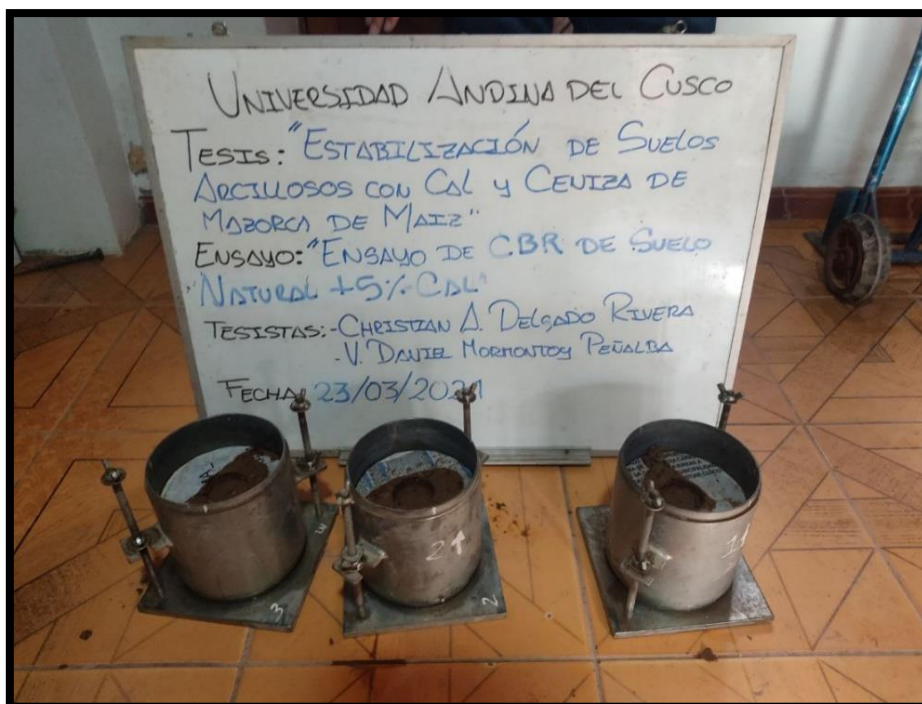


**Figura 69. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural.**



Nota. Se aprecia en imagen los 3 moldes del ensayo de CBR después de cuantificar la penetración. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

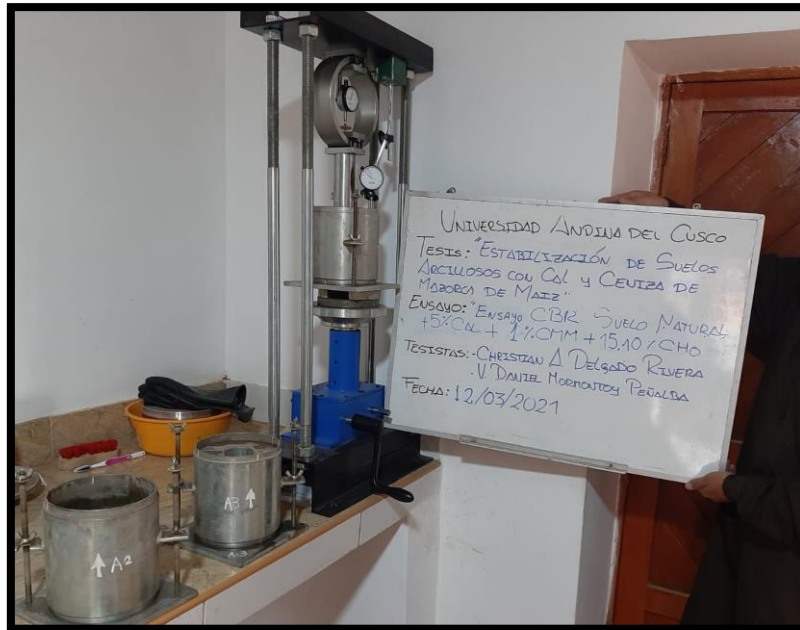
**Figura 70. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL.**



Nota. Se aprecia en imagen los 3 moldes del ensayo de CBR después de cuantificar la penetración. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



**Figura 71. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL + 1% de CMM.**



Nota. Los moldes deben colocados correctamente para realizar el ensayo de penetración, y mediante los diales podremos determinar los datos para analizarlos. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 72. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL + 2% de CMM.**



Nota. Se aprecia en imagen los 3 moldes del ensayo de CBR después de cuantificar la penetración. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



**Figura 73. Muestras de CBR después del ensayo de penetración en suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM.**



Nota. Los moldes deben colocados correctamente para realizar el ensayo de penetración, y mediante los diales podremos determinar los datos para analizarlos. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.

**Figura 74. Muestra de CBR después del ensayo de penetración, para determinar el Contenido de humedad final.**





Nota. Al culminar el ensayo, el molde tendrá una porción circular más compactada, la cual es el indicativo de la resistencia a la compresión que adquirió. Adaptación *Propia* [Fotografía], 2021.



c) Toma de Datos

Véase las tablas 42, 43, 44, 45 y 46. (MTC E 132)

Tabla 42. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Vía Expresa km 04+500.					
Fecha de ensayo:	04/03/2010					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.286		15.286		15.242	
Altura de Molde (cm)	17.811		17.735		17.784	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>						
Peso Molde + Base (gr)	7371.000		7342.00		7381.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	10934.000		11040.00		11338.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>						
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )						
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	84.320	87.930	77.32	73.83	80.35	74.69
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	78.170	81.920	71.53	68.64	74.86	69.22
Peso del Agua (gr)						
Peso del Recipiente (gr)	16.400	16.410	16.24	16.43	16.53	15.57
Peso de Muestra Seca (gr)						
Contenido de Humedad Final (%)						
Contenido de Humedad Promedio Final (%)						
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )						



Datos de hinchamiento de CBR (Tabla 42).

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
Horas	Días	Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
		*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	123			235			191		
24	1	187			287			230		
48	2	215			338			287		
72	3	258			362			324		
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>267</b>			<b>380</b>			<b>338</b>		

Datos de Penetración (Tabla 42).



Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)
0.00	0.000	0			0			0		
0.64	0.025	3			5			5		
1.27	0.050	5			9			9		
1.91	0.075	9			11			13		
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>11</b>			<b>14</b>			<b>17</b>		
3.18	0.125	13			16			20		
3.81	0.150	15			18			22		
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>21</b>			<b>23</b>			<b>26</b>		
6.35	0.250	24			25			30		
7.62	0.300	28			27			34		
10.16	0.400	30			31			37		
12.70	0.500	34			37			43		

Fuente: Elaboración Propia.





Tabla 43. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL.					
Fecha de ensayo:	08/03/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.261		15.237		15.193	
Altura de Molde (cm)	17.786		17.802		17.758	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>						
Peso Molde + Base (gr)	7348.000		7433.00		6956.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	10930.000		11149.00		10880.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>						
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )						
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	58.870	60.270	80.60	91.15	80.19	87.11
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	54.520	56.680	74.19	83.57	73.44	79.75
Peso del Agua (gr)						
Peso del Recipiente (gr)	16.160	16.430	15.83	16.60	15.45	16.26
Peso de Muestra Seca (gr)						
Contenido de Humedad Final (%)						
Contenido de Humedad Promedio Final (%)						
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )						



Datos de hinchamiento de CBR (Tabla 43).

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	190			266			598		
24	1	234			301			663		
48	2	264			340			685		
72	3	285			365			702		
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>293</b>			<b>373</b>			<b>713</b>		



Datos de Penetración (Tabla 43).

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)
0.00	0.000	0			0			0		
0.64	0.025	3			3			6		
1.27	0.050	6			6			8		
1.91	0.075	8			8			15		
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>9</b>			<b>11</b>			<b>17</b>		
3.18	0.125	11			13			24		
3.81	0.150	12			16			27		
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>14</b>			<b>19</b>			<b>31</b>		
6.35	0.250	16			24			35		
7.62	0.300	18			26			40		
10.16	0.400	20			29			46		
12.70	0.500	22			34			50		

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 44. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

		<p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p>				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL + 1% de CMM					
Fecha de ensayo:	08/03/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.261		15.237		15.193	
Altura de Molde (cm)	17.786		17.802		17.758	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>						
Peso Molde + Base (gr)	7350.000		7434.00		6956.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	11207.000		11432.00		11242.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>						
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )						
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	56.880	55.730	59.63	57.96	55.75	54.94
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	51.490	50.860	54.32	52.26	50.07	49.97
Peso del Agua (gr)						
Peso del Recipiente (gr)	16.370	16.640	16.60	15.46	15.74	16.74
Peso de Muestra Seca (gr)						
Contenido de Humedad Final (%)						
Contenido de Humedad Promedio Final (%)						
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )						



Datos de hinchamiento de CBR (Tabla 44).

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	145			261			525		
24	1	189			301			558		
48	2	215			325			595		
72	3	250			375			628		
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>255</b>			<b>377</b>			<b>644</b>		



Datos de Penetración (Tabla 44).

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)
0.00	0.000	0			0			0		
0.64	0.025	6			6			6		
1.27	0.050	8			8			8		
1.91	0.075	9			11			12		
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>10</b>			<b>14</b>			<b>20</b>		
3.18	0.125	12			16			24		
3.81	0.150	13			18			30		
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>18</b>			<b>26</b>			<b>42</b>		
6.35	0.250	20			30			47		
7.62	0.300	21			33			53		
10.16	0.400	23			36			60		
12.70	0.500	29			43			69		

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 45. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL + 2% de CMM					
Fecha de ensayo:	05/03/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.193		15.237		15.261	
Altura de Molde (cm)	17.758		17.802		17.786	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>						
Peso Molde + Base (gr)	6956.000		7433.00		7348.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	10625.000		11282.00		11429.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>						
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )						
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	53.460	58.650	57.36	57.16	50.63	64.07
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	50.110	54.590	52.90	52.81	46.85	59.48
Peso del Agua (gr)						
Peso del Recipiente (gr)	15.730	16.750	16.60	15.46	16.37	16.65
Peso de Muestra Seca (gr)						
Contenido de Humedad Final (%)						
Contenido de Humedad Promedio Final (%)						
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )						



Datos de hinchamiento de CBR (Tabla 45).

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	185			274			194		
24	1	210			290			228		
48	2	253			318			266		
72	3	280			359			295		
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>287</b>			<b>362</b>			<b>300</b>		



Datos de Penetración (Tabla 45).

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)
0.00	0.000	0			0			0		
0.64	0.025	3			6			5		
1.27	0.050	6			12			11		
1.91	0.075	8			18			20		
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>11</b>			<b>22</b>			<b>27</b>		
3.18	0.125	15			26			34		
3.81	0.150	18			30			40		
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>20</b>			<b>36</b>			<b>47</b>		
6.35	0.250	22			42			54		
7.62	0.300	25			45			60		
10.16	0.400	29			51			70		
12.70	0.500	33			58			77		

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 46. Toma de datos – Ensayo de CBR para Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL + 3% de CMM					
Fecha de ensayo:	15/08/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.286		15.286		15.242	
Altura de Molde (cm)	17.811		17.735		17.784	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>						
Peso Molde + Base (gr)	7372.000		7342.00		7385.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	11219.000		11392.00		11623.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>						
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )						
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	60.100	51.030	57.65	50.55	52.62	55.58
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	54.700	47.090	53.13	46.56	48.19	51.25
Peso del Agua (gr)						
Peso del Recipiente (gr)	15.960	16.540	16.55	17.01	15.65	15.43
Peso de Muestra Seca (gr)						
Contenido de Humedad Final (%)						
Contenido de Humedad Promedio Final (%)						
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )						



Datos de hinchamiento de CBR (Tabla 46).

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	107			223			175		
24	1	137			237			199		
48	2	166			258			225		
72	3	189			292			253		
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>191</b>			<b>301</b>			<b>254</b>		

Datos de Penetración (Tabla 46).

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm2)
0.00	0.000	0			0			0		
0.64	0.025	6			6			5		
1.27	0.050	11			12			15		
1.91	0.075	15			20			27		
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>18</b>			<b>27</b>			<b>44</b>		
3.18	0.125	20			34			52		
3.81	0.150	23			40			60		
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>29</b>			<b>49</b>			<b>70</b>		
6.35	0.250	32			56			78		
7.62	0.300	35			62			85		
10.16	0.400	39			72			101		
12.70	0.500	46			83			110		

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.6. Procedimiento de Análisis de Datos

#### 3.6.1. Determinación de Porcentaje de Cal mediante pH (ASTM- D6276 – 19)

##### 3.6.1.1. Análisis del Ensayo

Según el ensayo de Determinación del Porcentaje de Cal mediante pH, se pudo observar que al 5% de cal se llega al pH óptimo que es 7.24 según el ensayo de la muestra guía, donde se obtiene el equilibrio catiónico de la cal, a partir de este porcentaje el valor se mantiene igual, como se ve en 6%.





Tabla 47. Procesamiento de Datos – Determinación del porcentaje de cal mediante pH

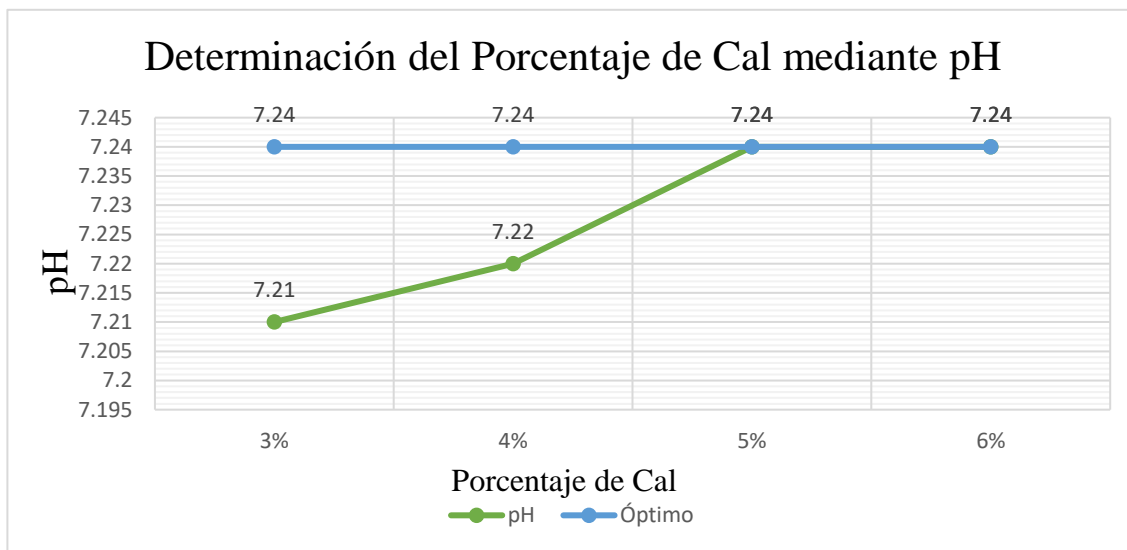
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04	Muestra Guía
Peso de Recipiente (gr)	30.80	30.10	31.00	30.50	31.10
Peso de Muestra Seca (gr)	25.00	25.00	25.00	25.00	0.00
Peso de Cal (gr)	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00
Porcentaje de Cal (%)	3.00	4.00	5.00	6.00	100.00
Contenido de Agua (ml)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
pH	7.21	7.22	7.24	7.24	7.24

Fuente: *Elaboración Propia*

### 3.6.1.2. Diagrama del Ensayo

Se determina que el porcentaje óptimo de cal para los suelos arcillosos tomados del km 04+500 de la Vía Expresa es 5%.

Figura 75. Gráfico del Porcentaje Óptimo de cal para el Suelo Arcilloso



Nota. La línea verde indica el pH que tienen las muestras propuestas, añadidas con distintos porcentajes de cal, siendo la línea azul el objetivo al que se quiere llegar, ya que este es el pH ideal según la muestra patrón. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

### 3.6.2. Determinación del Contenido de Humedad Natural

#### 3.6.2.1. Procesamiento del ensayo

- Peso del Agua: es el resultado de la diferencia del peso del suelo húmedo y el peso del suelo seco.
- Contenido de humedad: se emplea la siguiente fórmula:



$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

$W$ : Contenido de Humedad (%).



$W_w$ : Peso del Agua (gr).

$W_s$ : Peso del Materia. (gr).

### 3.6.2.2. Diagrama del Ensayo

Véase tabla 48.

Tabla 48. Procesamiento de Datos – Ensayo de Contenido de Humedad Natural.

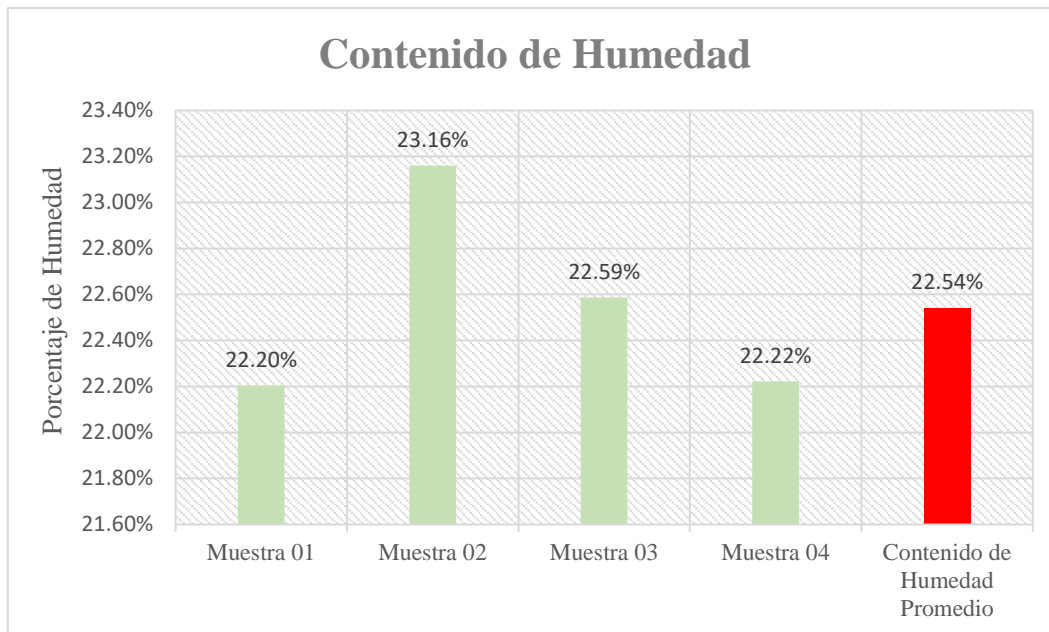
 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Contenido de Humedad del Suelo Natural			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 04+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa Cusco.			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<u>MTC E 108, Basado en la Norma ASTM D-2216</u>				
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>	<b>Muestra 03</b>	<b>Muestra 04</b>
Peso de Recipiente (gr)	15.45	16.26	16.41	16.4
Peso de Recipiente + Muestra Húmeda (gr)	75.77	67.63	79.26	74.04
Peso de Recipiente + Muestra Seca (gr)	64.81	57.97	67.68	63.56
Peso del Agua (gr)	10.96	9.66	11.58	10.48
Peso de Muestra Seca (gr)	49.36	41.71	51.27	47.16
<b>Contenido de Humedad</b>	22.20%	23.16%	22.59%	22.22%
<b>Contenido de Humedad Promedio</b>	22.54%			

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.6.2.3. Análisis del Ensayo

De acuerdo con los datos obtenidos en las cuatro muestras se determinó un contenido de humedad promedio, siendo 22.54% como se aprecia a continuación:

Figura 76. Gráfico de los porcentajes de Contenido de Humedad Natural del Suelo.



Nota. Se analizaron un total de 4 muestras (según la norma peruana) para determinar el contenido de humedad, las cuales podemos apreciar en el gráfico. El rectángulo rojo nos indica el promedio de estas 4 muestras, tomando este como resultado del ensayo. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

### 3.6.3. Análisis Granulométrico por Tamizado y análisis Granulométrico por Hidrómetro.

#### 3.6.3.1. Procesamiento del Ensayo Análisis Granulométrico por Tamizado.

- Porcentaje Retenido: se determinó el porcentaje retenido en cada uno de los tamices, utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido en el Tamiz}}{\text{Peso total}} \times 100$$

- Porcentaje Retenido Acumulado: Se determinó usando la sumatoria de los porcentajes retenidos en cada tamiz, de la siguiente forma:

$$\% \text{ Retenido Acumulado} = \sum \% \text{ Retenidos en los tamices anteriores}$$

- Porcentaje que Pasa: se calcula la cantidad (en %) de material fino que pasa, en forma acumulativa del 100% en cada tamiz, usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Pasa} = 100\% - \% \text{ Retenido Acumulado}$$

- Porcentaje de Error: se usó para determinar la aceptabilidad del ensayo, con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error} = \frac{(PMS - \sum \text{Pesos Retenidos})}{PMS}$$



Donde:

$PMS$  = Peso de la muestra Seca (antes del ensayo).

$\Sigma$  Pesos Retenidos = Sumatoria de pesos retenidos en los tamices, incluyendo la pérdida por lavado y fondo (cazuela).

- Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ ): determinará la uniformidad y variación del tamaño de las partículas del suelo a estudiar, se usa la siguiente relación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

$D_{60}$  = Tamaño de abertura en el que pasa el 60% de la muestra.

$D_{10}$  = Tamaño de abertura en el que pasa el 10% de la muestra.

- Coeficiente de Concavidad ( $C_c$ ): nos proporciona información de la gradación del suelo y determinará si es bien gradado o mal gradado, con la siguiente relación:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{\left(\frac{D_{10}}{D_{60}}\right)}$$

Donde:

$D_{60}$  = Tamaño de abertura en el que pasa el 60% de la muestra.

$D_{10}$  = Tamaño de abertura en el que pasa el 10% de la muestra.

$D_{30}$  = Tamaño de abertura en el que pasa el 30% de la muestra.



Los ensayos fueron realizados en base al “Manual de Ensayos de Materiales” del Ministerio de Transportes y comunicaciones 2016.

### 3.6.3.2. Diagrama del Ensayo

Véase la tabla 49.



Tabla 49. Procesamiento de Datos – Análisis Granulométrico por Tamizado.

	Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil	
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Análisis Granulométrico del Suelo por Tamizado	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 04+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Víctor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se uso suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa Cusco, secado previamente en la estufa.	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	

MTC E 107 – ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

Peso de la Muestra Seca:	1050.5	gr.
Peso de Muestra Lavada	302.45	gr.
Pérdida por Lavado:	748.05	gr.

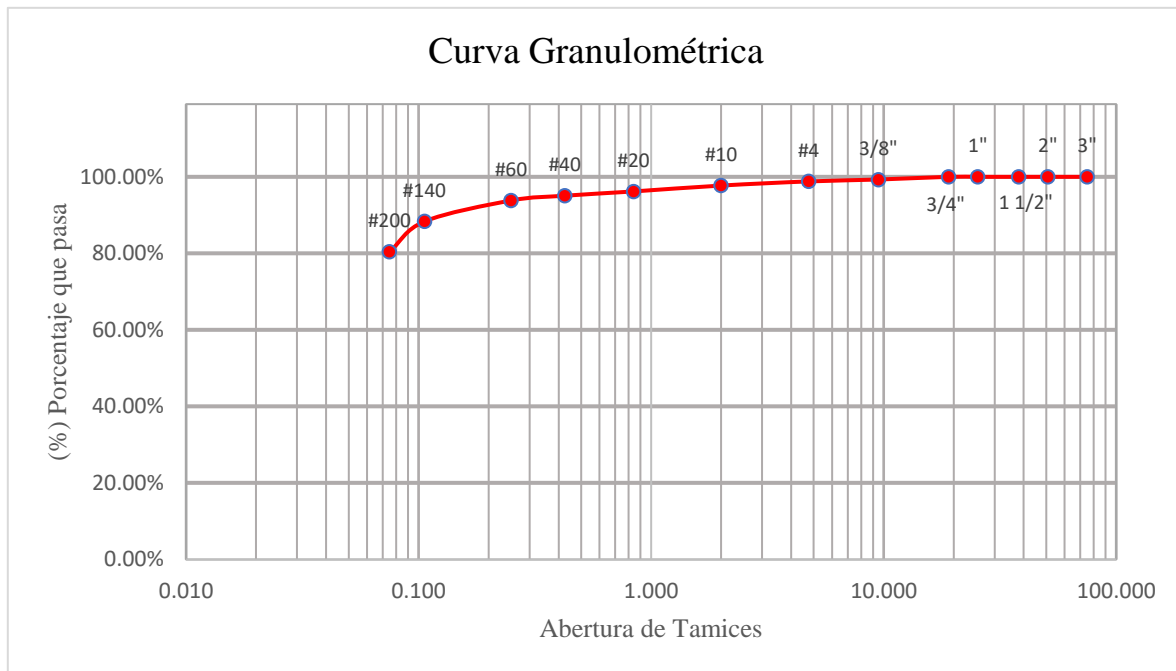
Tamiz N°	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido	Acumulado	
				% Retenido	% Pasa
3"	75.000	0.000	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50.800	0.000	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	38.100	0.000	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	0.000	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19.000	0.000	0.00%	0.00%	100.00%
3/8"	9.500	7.420	0.71%	0.71%	99.29%
N° - 4	4.760	5.140	0.49%	1.20%	98.80%
N° - 10	2.000	11.350	1.08%	2.28%	97.72%
N° - 20	0.840	16.190	1.54%	3.82%	96.18%
N° - 40	0.425	11.770	1.12%	4.94%	95.06%
N° - 60	0.250	13.070	1.24%	6.18%	93.82%
N° - 140	0.106	57.490	5.47%	11.66%	88.34%
N° - 200	0.075	83.230	7.92%	19.58%	80.42%
Fondo		96.680	9.20%	28.78%	
Pérdida por lavado		748.050	71.22%	100.00%	
Parcial Fondo + Pérdida por lavado		844.730	80.42%		
TOTAL		1050.390	100.00%	100.00%	

Tamaño Máximo Absoluto:	3/4"		Error:	0.01%
Tamaño Máximo Nominal:	3/8"			

Cu= NP	*NP= No presenta
Cc= NP	

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 77. Gráfico de la Curva Granulométrica.



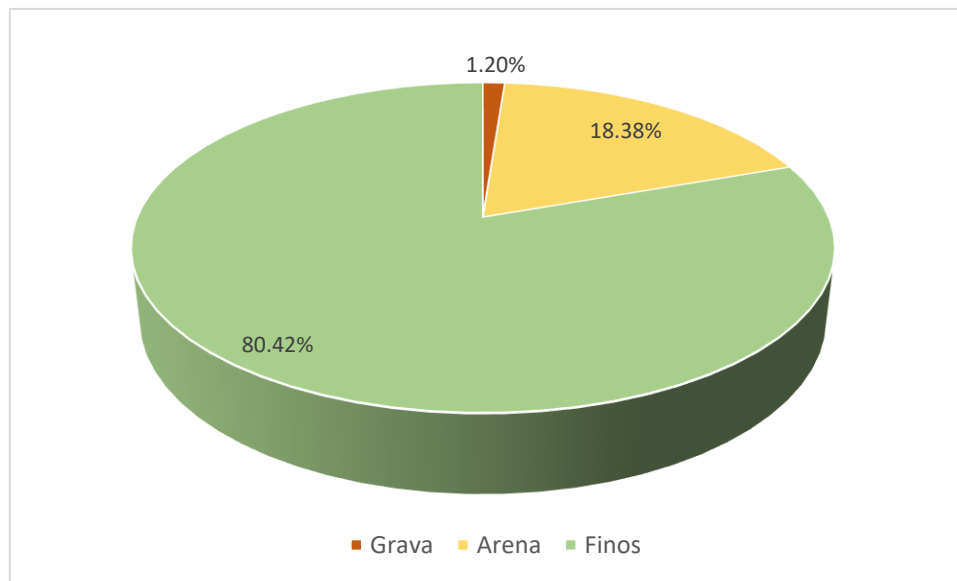
Nota. En el gráfico tenemos en las abscisas las aberturas de los tamices en mm y como ordenadas el porcentaje que pasa por cada tamiz, en ese sentido, podemos observar los puntos que nos indican la curva granulométrica que se obtuvo del presente ensayo, se evidencia la gran presencia de materiales finos que posee el suelo. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

### 3.6.3.3. Análisis del Ensayo

De acuerdo con la curva granulométrica podemos afirmar que, el suelo ensayado, obtenido del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, presenta en su gran mayoría material fino que pasa la malla #200, siendo este el porcentaje más representativo, teniendo un 80.42% del total, como se aprecia en el siguiente gráfico.

De acuerdo con la curva granulométrica, podemos apreciar que la muestra ensayada no presenta  $D_{60}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{10}$ , por lo que, no se puede determinar el Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Concavidad.

Figura 78. Gráfico de Porcentajes de Grava, Arena y Finos del ensayo de Granulometría.



Nota. En el gráfico podemos observar que un gran porcentaje de la muestra del suelo presenta material fino, y arenas, lo cual es una característica de las arcillas. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

#### 3.6.3.4. Procesamiento del Ensayo Análisis Granulométrico por Hidrómetro.

- Constante k: ecuación para determinar la constante “k”

$$k = \sqrt{\frac{30 * \mu/g}{\tau_s - \tau_w}}$$

Donde:

g= aceleración gravitacional.

$\mu$ = Coeficiente de viscosidad del agua en Poises.

$\tau_s$ = Peso unitario de los sólidos del suelo en gr/cm<sup>3</sup>.

$\tau_w$ = Peso unitario del agua destilada, a la temperatura T, en g/cm<sup>3</sup>.

- Profundidades Efectivas: se determina las profundidades efectivas “L” mediante la siguiente ecuación:

$$L = H_R + \frac{1}{2} * (h - \frac{V_b}{A})$$

Donde:

L= Profundidades efectivas

$H_R$  = Distancias correspondientes a las lecturas.

h= Distancia desde el cuello hasta la punta inferior del bulbo.

$V_b$ = Volumen del bulbo.



$A$  = Área del cilindro graduado.

- Diámetro de las partículas: en este apartado podremos determinar el diámetro que poseen las partículas en suspensión en mm.

$$D = k * \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

$L$  = Profundidad efectiva.

$t$  = Tiempo transcurrido en mm.

- Porcentaje que pasa: determina el porcentaje que pasa de acuerdo con el tamaño de las partículas, esto nos sirve para elaborar la curva granulométrica.

$$\% \text{ Pasa} = \left( R * \frac{a}{w} \right) * 100$$

Donde:

$R$  = Lectura corregida del hidrómetro.

$a$  = Factor de corrección por peso específico.

$w$  = Peso de la muestra seca (gr).



### 3.6.3.5. Diagrama del ensayo

Véase la tabla 50.



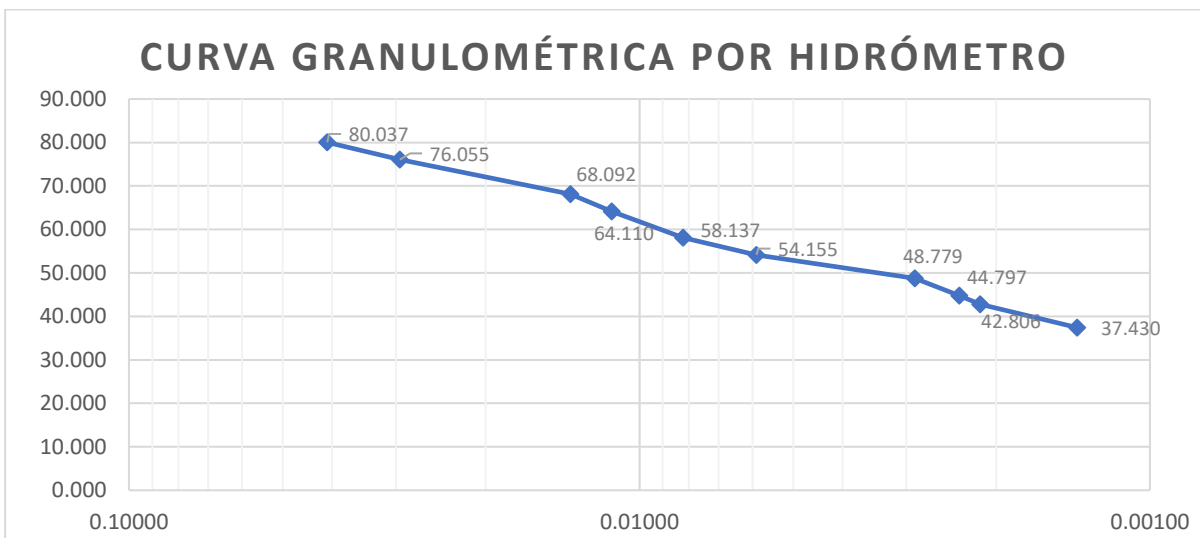


Tabla 50. Procesamiento de datos del análisis granulométrico por hidrómetro.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 									
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"								
Ensayo:	Granulometría por hidrómetro								
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500								
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba								
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Vía Expresa km 04+500								
Fecha de ensayo:	22/01/2022								
<u>MTC E 109 – ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO</u>									
Masa del suelo seco: 50 gr.	Corrección por agente defloculante y punto cero (g/L): 6.5								
Tipo de Hidrómetro: 152 H	Gravedad Específica: 2.67								
Tiempo (min)	Lectura del Hidrómetro	Temperatura °C	Rcp	Profundidad efectiva mm	Diámetro mm	Corrección de temperatura	R Corregida	% pasante	Constante K
1	46	19	47	86	0.041	-0.300	40.200	80.037	0.0044
2	44	19	45	90	0.029	-0.300	38.200	76.055	0.0044
10	40	19	41	96	0.014	-0.300	34.200	68.092	0.0044
15	38	19	39	100	0.011	-0.300	32.200	64.110	0.0044
30	35	19	36	105	0.008	-0.300	29.200	58.137	0.0044
60	33	19	34	108	0.006	-0.300	27.200	54.155	0.0044
250	30	20	31	113	0.003	0.000	24.500	48.779	0.0043
384	28	20	29	116	0.002	0.000	22.500	44.797	0.0043
470	27	20	28	118	0.002	0.000	21.500	42.806	0.0043
1326	25	17	26	121	0.001	-0.700	18.800	37.430	0.0046
De la tabla:									
2.65	1								
2.67	X								
2.75	0.98								
=0.99549									

Fuente: Elaboración Propia.

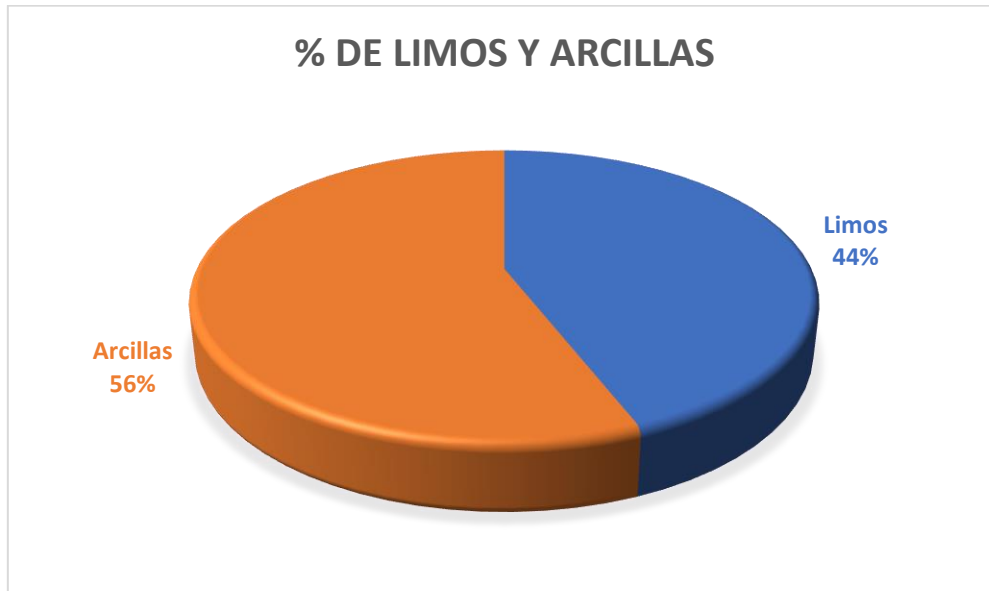
Figura 79. Curva granulométrica de material fino.



Nota. En el gráfico podemos observar la curva granulométrica del material fino del suelo

estudiado, a partir de 0.075mm de abertura consideraremos como material limoso y material menor a 0.002mm como material arcilloso. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

**Figura 80. Porcentajes de limo y arcilla en el ensayo.**



Nota. De acuerdo con la curva granulométrica de finos, podemos determinar que el mayor porcentaje es arcilla. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

#### 3.6.3.6. Análisis del Ensayo

Como podemos apreciar en el procesamiento del ensayo, el suelo fino del km 04+500 de la Via Expresa de Cusco, tiene 56% material arcilloso y un 44% de material limoso. En un contexto general de la granulometría podemos asumir que el suelo contiene en mayor porcentaje partículas arcillosas.

### 3.6.4. Determinación del Límite Líquido

#### 3.6.4.1. Procesamiento del Ensayo

- Determinación del contenido de Humedad: al realizar el ensayo en la cuchara de Casagrande los datos se procesaron usando la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso de Suelo Seco}} \times 100 = \frac{PMH - PMS}{PMS - PR} \times 100$$

Donde:

W = Contenido de Humedad (%).

PMH = Peso de muestra húmeda más recipiente (gr).

PMS = Peso de muestra secada en horno más recipiente (gr).

PR = Peso de recipiente (gr).





Se procede a graficar en las ordenadas el porcentaje de humedad de la muestra y en las abscisas el número de golpes, determinando el porcentaje de humedad a los 25 golpes cuando intercepta con la curva de tendencia.

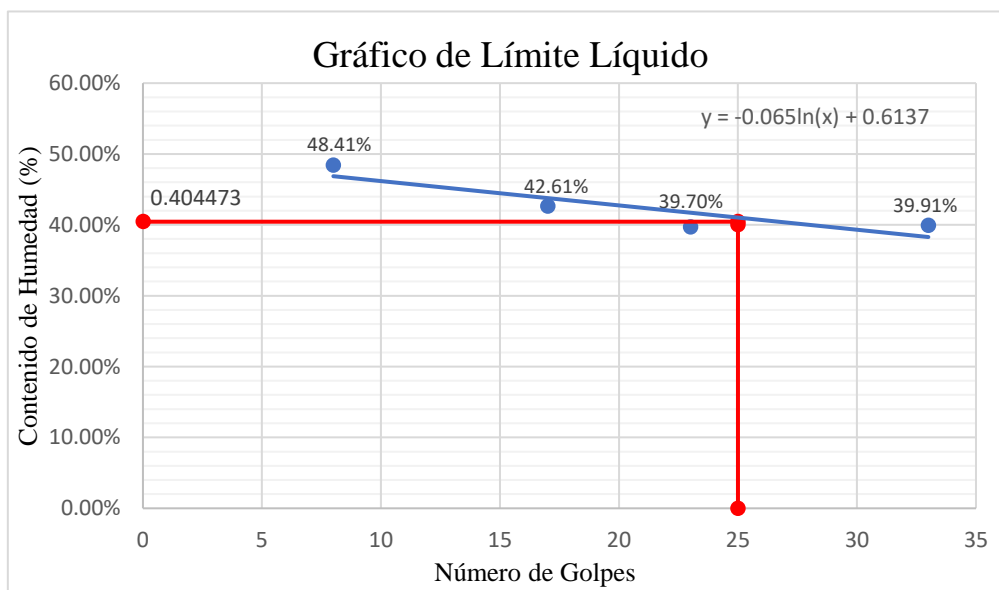
#### 3.6.4.2. Diagrama del Ensayo

Véase las tablas 51, 52, 53, 54 y 55.



Tabla 51. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	50.38	54.06	55.59	51.48
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	38.95	42.78	44.56	41.14
Peso Recipiente Metálico (gr)	15.34	16.31	16.78	15.23
Peso Suelo Seco (gr)	23.61	26.47	27.78	25.91
Peso Agua (gr)	11.43	11.28	11.03	10.34
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	48.41%	42.61%	39.70%	39.91%
<b>Número de Golpes (N)</b>	8	17	23	33
<b>Límite Líquido</b>	40.447%			

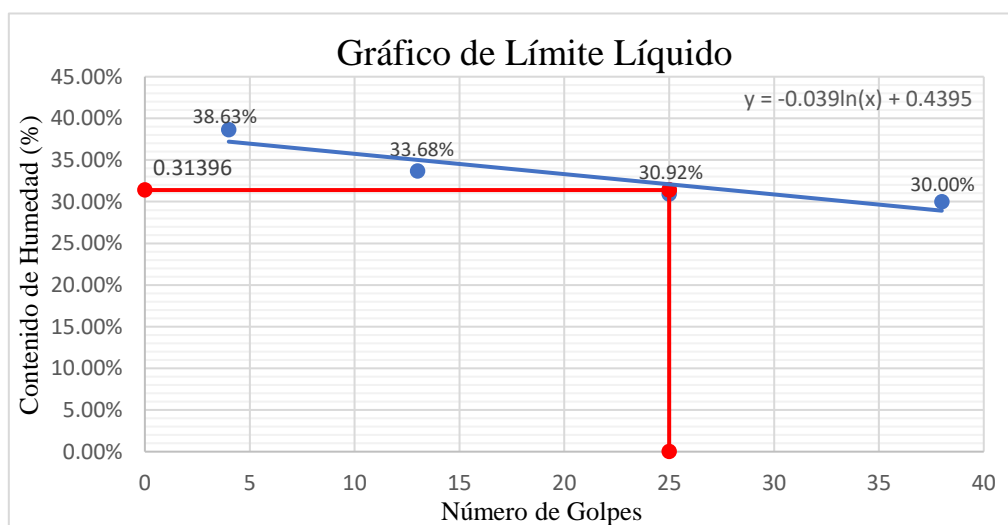


Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 52. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL al total del peso usado.			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<p><u>MTC E 110. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u></p>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Humedo + Recipiente Metálico (gr)	54.01	52.98	47.31	49.71
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	43.12	43.69	39.68	41.83
Peso Recipiente Metálico (gr)	14.93	16.11	15.00	15.56
Peso Suelo Seco (gr)	28.19	27.58	24.68	26.27
Peso Agua (gr)	10.89	9.29	7.63	7.88
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	38.63%	33.68%	30.92%	30.00%
<b>Número de Golpes (N)</b>	4	13	25	38
<b>Límite Líquido</b>	31.396%			



Fuente: Elaboración Propia.

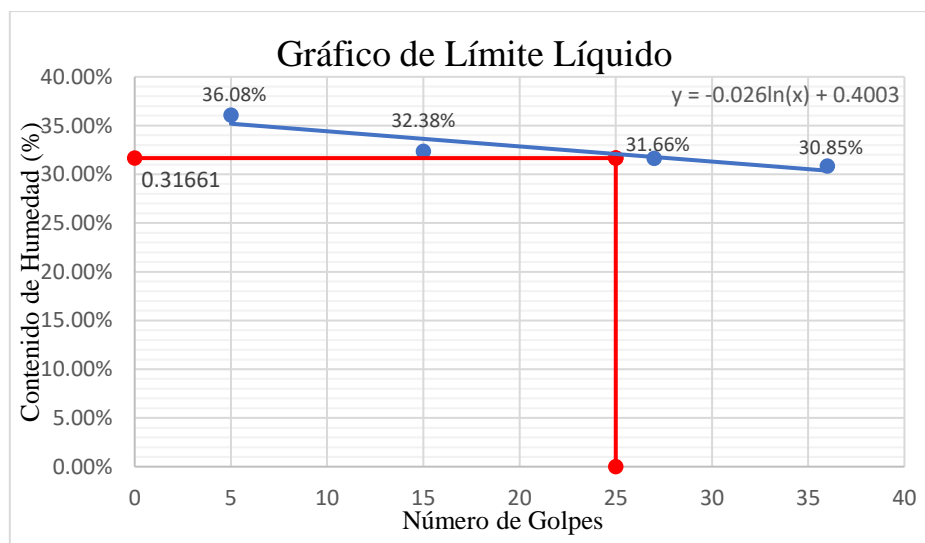


Tabla 53. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 	
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL y 1% de CMM, al total del peso usado.
Fecha de ensayo:	04/03/2021

MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS



Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	51.25	48.74	47.80	53.52
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	42.00	40.60	40.11	44.85
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.36	15.46	15.82	16.75
Peso Suelo Seco (gr)	25.64	25.14	24.29	28.10
Peso Agua (gr)	9.25	8.14	7.69	8.67
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	<b>36.08%</b>	<b>32.38%</b>	<b>31.66%</b>	<b>30.85%</b>
<b>Número de Golpes (N)</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>27</b>	<b>36</b>
<b>Límite Líquido</b>	<b>31.661%</b>			

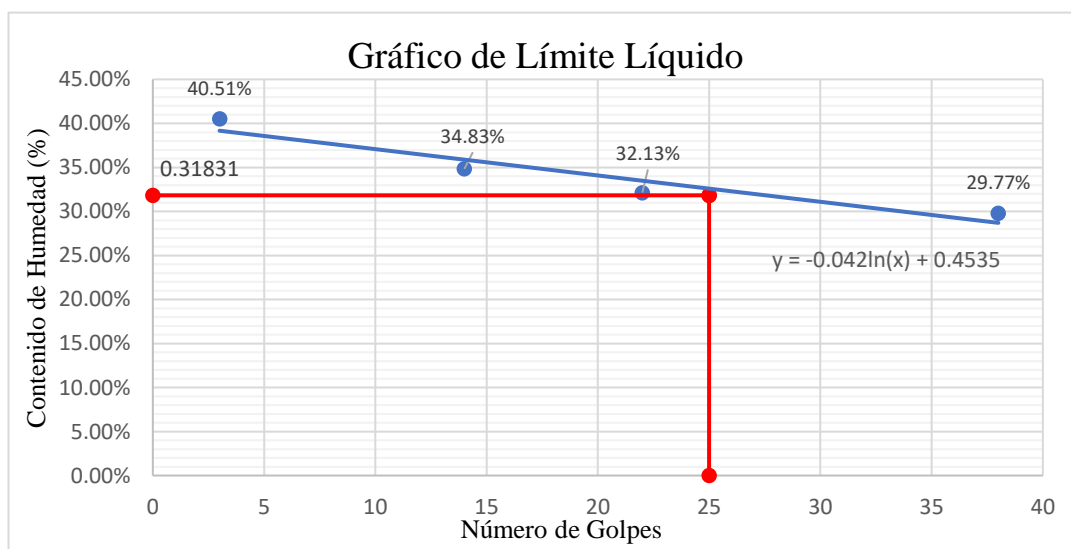


Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 54. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL y 2% de CMM, al total del peso usado.			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	47.34	46.89	46.68	46.99
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	38.35	39.07	39.29	39.91
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.16	16.62	16.29	16.13
Peso Suelo Seco (gr)	22.19	22.45	23.00	23.78
Peso Agua (gr)	8.99	7.82	7.39	7.08
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	40.51%	34.83%	32.13%	29.77%
<b>Número de Golpes (N)</b>	3	14	22	38
<b>Límite Líquido</b>	31.831%			

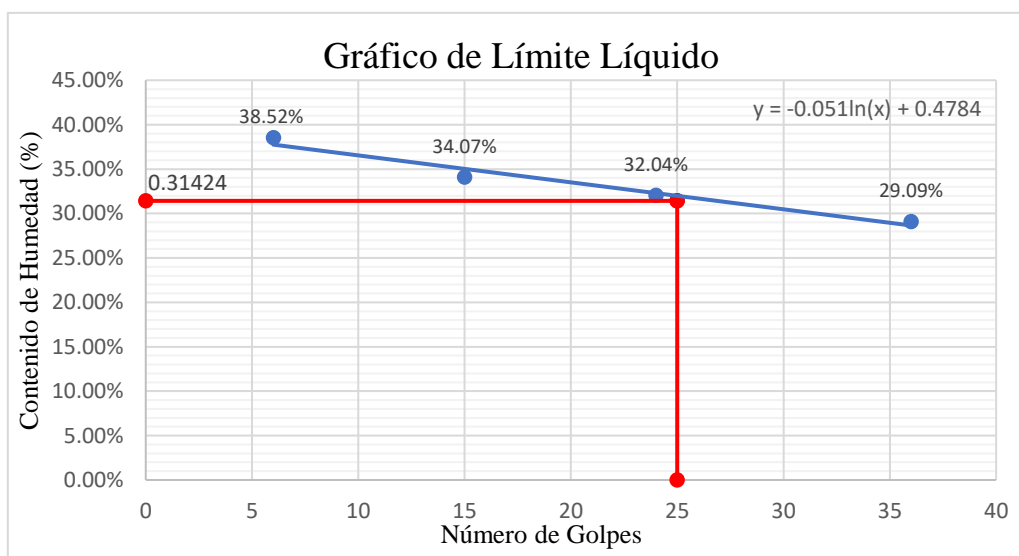


Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 55. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Líquido de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 				
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"			
Ensayo:	Determinación del Límite Líquido del Suelo			
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500			
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba			
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL y 3% de CMM, al total del peso usado.			
Fecha de ensayo:	04/03/2021			
<u>MTC E 110, DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) DE LOS SUELOS</u>				
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04
Denominación del recipiente	1	2	3	4
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	49.08	47.55	47.42	47.85
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	39.87	39.71	39.91	40.63
Peso Recipiente Metálico (gr)	15.96	16.70	16.47	15.81
Peso Suelo Seco (gr)	23.91	23.01	23.44	24.82
Peso Agua (gr)	9.21	7.84	7.51	7.22
Contenido de Humedad (%)	38.52%	34.07%	32.04%	29.09%
Número de Golpes (N)	6	15	24	36
Límite Líquido	31.424%			



Fuente: Elaboración Propia.



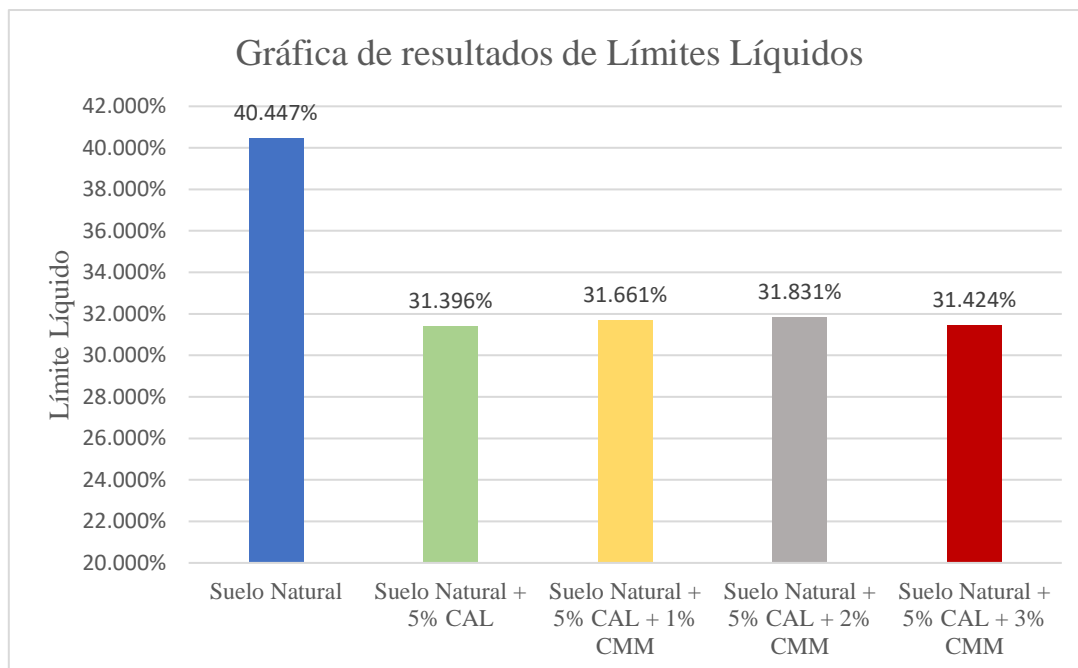


### 3.6.4.3. Análisis del Ensayo

Con el ensayo se pudo determinar que el límite líquido del suelo natural es de 40.447%, tal porcentaje se tuvo una significativa reducción al agregarle los aditivos estabilizadores en los porcentajes propuestos, de la siguiente manera:

- Límite Líquido del Suelo Natural: 40.447%
- Límite Líquido del Suelo Natural + 5% de CAL: 31.396%
- Límite Líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM: 31.661%
- Límite Líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM: 31.831%
- Límite Líquido del Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM: 31.424%

**Figura 81. Gráfica de Resultados del Ensayo de Límites Líquidos.**



Nota. En la gráfica se puede observar los resultados del ensayo de límite líquido mediante una comparativa de las distintas dosificaciones. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

### 3.6.5. Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad

#### 3.6.5.1. Procesamiento del Ensayo

- Contenido de Humedad: se determinará con la siguiente fórmula.

$$W = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso de Suelo Seco}} \times 100 = \frac{PMH - PMS}{PMS - PR} \times 100$$

Donde:

$W$  = Contenido de Humedad (%).

$PMH$  = Peso de muestra húmeda más recipiente (gr).



$PMS$  = Peso de muestra secada en horno más recipiente (gr).

$PR$  = Peso de recipiente (gr).

Tomando como resultado el promedio del contenido de humedad de ambas muestras, para cada ensayo.

- Índice de Plasticidad: El índice de plasticidad será la diferencia del Límite Líquido (LL) y Límite Plástico (LP), tal resultado está sujeto a una aceptabilidad propuesta por la norma técnica peruana.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

$IP$  = Índice de Plasticidad

$LL$  = Límite Líquido

$LP$  = Límite Plástico



Los ensayos fueron realizados en base al “Manual de Ensayos de Materiales” del Ministerio de Transportes y comunicaciones 2016 (MTC E 111).

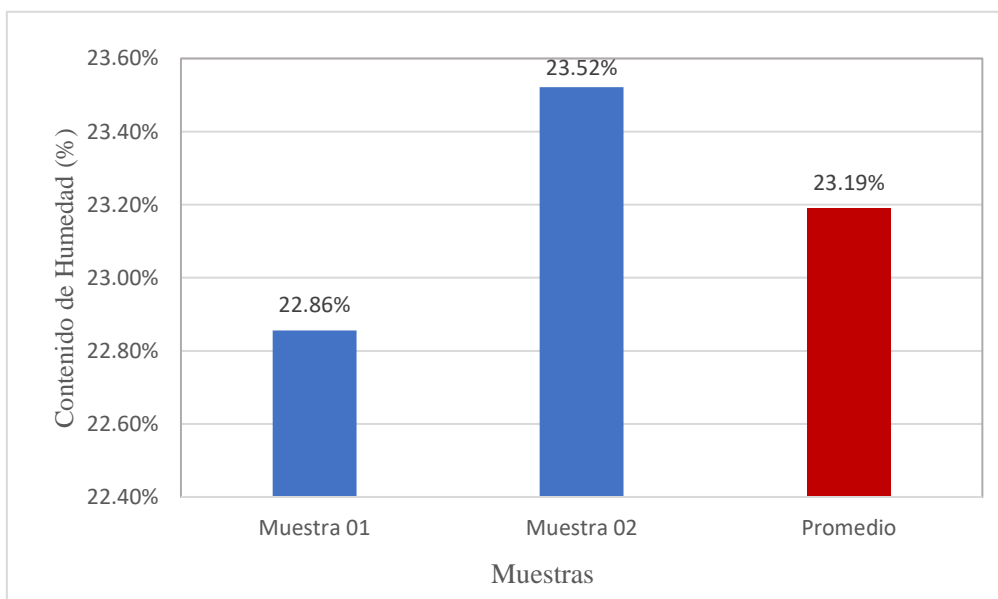
#### 3.6.5.2. Diagrama del Ensayo

Véase las tablas 56, 57, 58, 59 y 60.



Tabla 56. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	52.51	54.17
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	45.74	46.97
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.12	16.36
Peso Suelo Seco (gr)	29.62	30.61
Peso Agua (gr)	6.77	7.2
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	22.86%	23.52%
<b>Límite Plástico</b>	<b>23.19%</b>	
<b>Límite Líquido</b>	40.44%	
<b>Límite Plástico</b>	23.19%	
<b>Índice de Plasticidad</b>	17.25%	

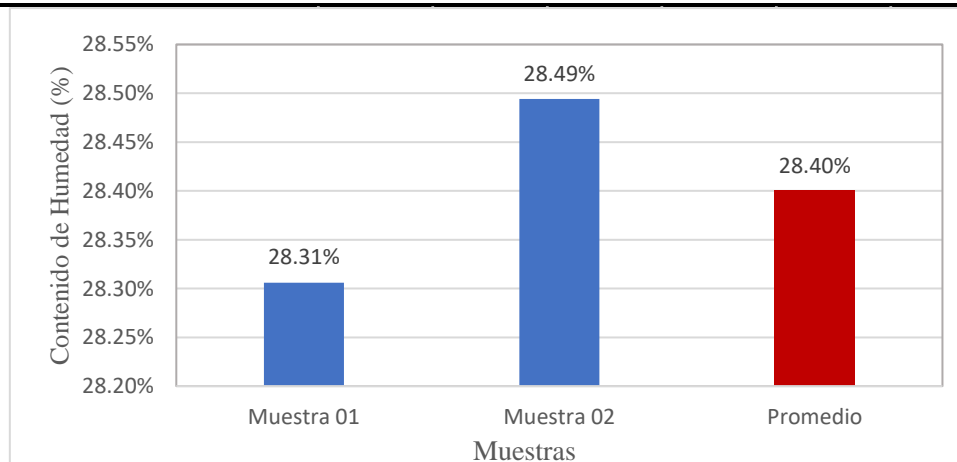


Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 57. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL.	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	46.54	48.22
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	39.84	41.37
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.17	17.33
Peso Suelo Seco (gr)	23.67	24.04
Peso Agua (gr)	6.7	6.85
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	28.31%	28.49%
<b>Límite Plástico</b>	<b>28.40%</b>	
<b>Límite Líquido</b>	31.40%	
<b>Límite Plástico</b>	28.40%	
<b>Índice de Plasticidad</b>	3.00%	

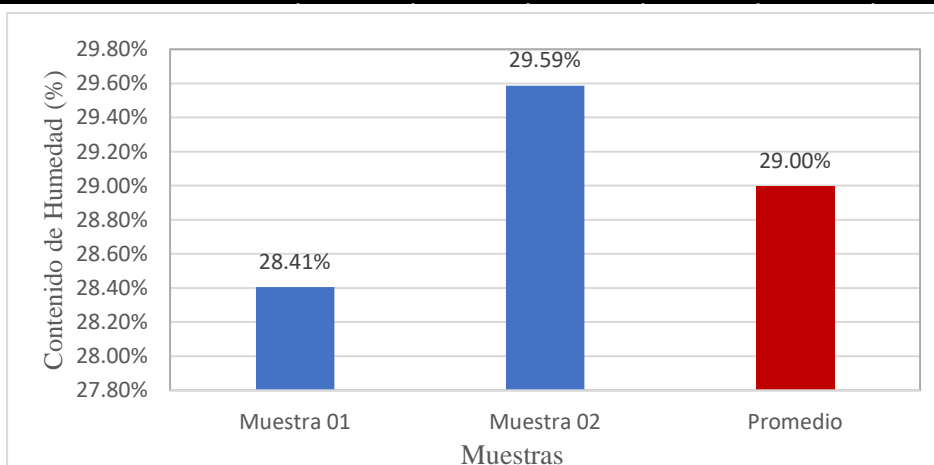


Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 58. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL y 1% de CMM, al total del peso usado.	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	45.71	47.88
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	38.83	40.67
Peso Recipiente Metálico (gr)	14.61	16.3
Peso Suelo Seco (gr)	24.22	24.37
Peso Agua (gr)	6.88	7.21
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	28.41%	29.59%
<b>Límite Plástico</b>	<b>29.00%</b>	
<b>Límite Líquido</b>	31.66%	
<b>Límite Plástico</b>	29.00%	
<b>Índice de Plasticidad</b>	2.66%	

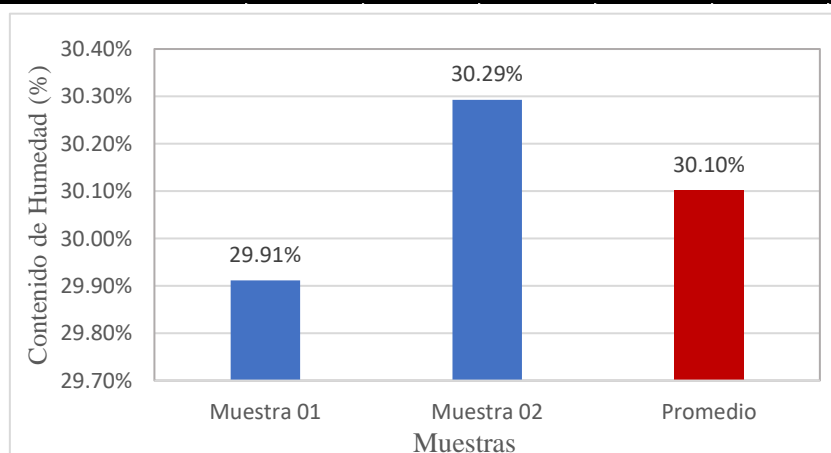


Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 59. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.



 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Víctor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL y 2% de CMM, al total del peso usado.	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	46.3	46.09
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	39.19	38.95
Peso Recipiente Metálico (gr)	15.42	15.38
Peso Suelo Seco (gr)	23.77	23.57
Peso Agua (gr)	7.11	7.14
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	29.91%	30.29%
<b>Límite Plástico</b>	<b>30.10%</b>	
<b>Límite Líquido</b>	31.83%	
<b>Límite Plástico</b>	30.10%	
<b>Índice de Plasticidad</b>	1.73%	

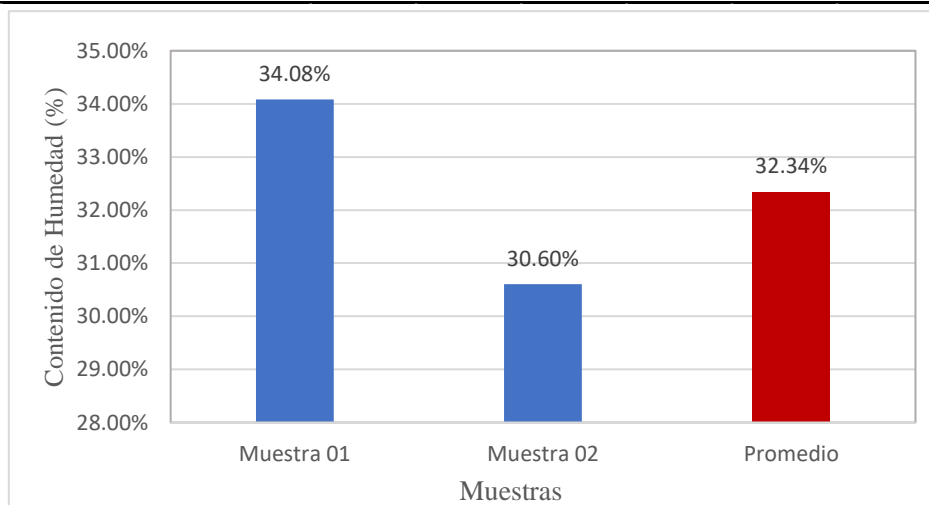


Fuente: Elaboración Propia



Tabla 60. Procesamiento de Datos – Ensayo de Límite Plástico en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 		
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"	
Ensayo:	Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad del Suelo	
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500	
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba	
Descripción de Muestra:	Se usa material arcilloso que pasa por la malla #40, agregando 5% de CAL y 3% de CMM, al total del peso usado.	
Fecha de ensayo:	04/03/2021	
<p><u>MTC E 111 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P.) DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)</u></p>		
<b>Descripción</b>	<b>Muestra 01</b>	<b>Muestra 02</b>
Denominación del recipiente	1	2
Peso Suelo Húmedo + Recipiente Metálico (gr)	51.99	46.69
Peso Suelo Seco + Recipiente Metálico (gr)	43.07	39.48
Peso Recipiente Metálico (gr)	16.90	15.92
Peso Suelo Seco (gr)	26.17	23.56
Peso Agua (gr)	8.92	7.21
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	34.08%	30.60%
<b>Límite Plástico</b>	<b>32.34%</b>	
<b>Límite Líquido</b>	31.42%	*NP= No plástico
<b>Límite Plástico</b>	32.34%	
<b>Índice de Plasticidad</b>	NP	

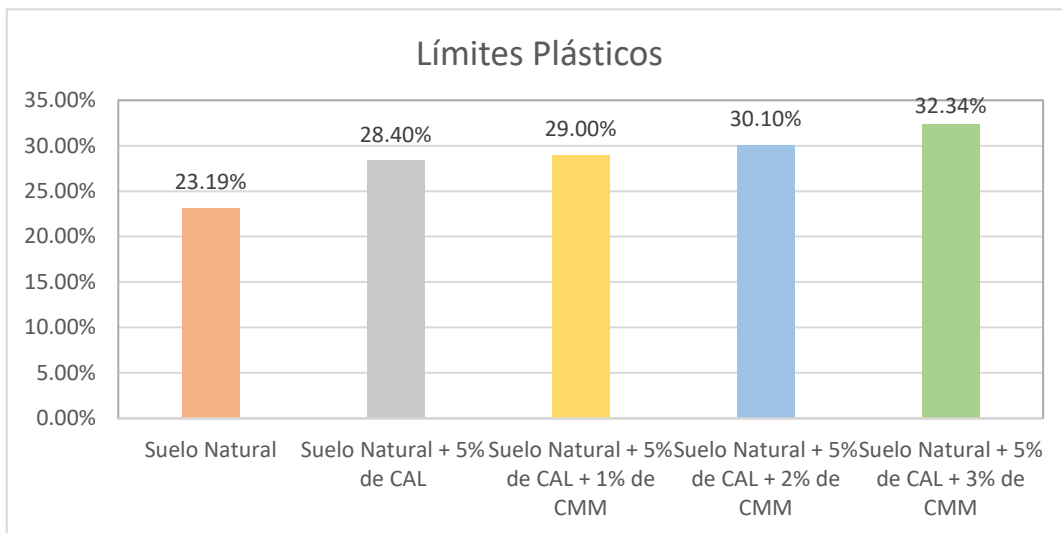


Fuente: Elaboración Propia.

### 3.6.5.3. Análisis del Ensayo

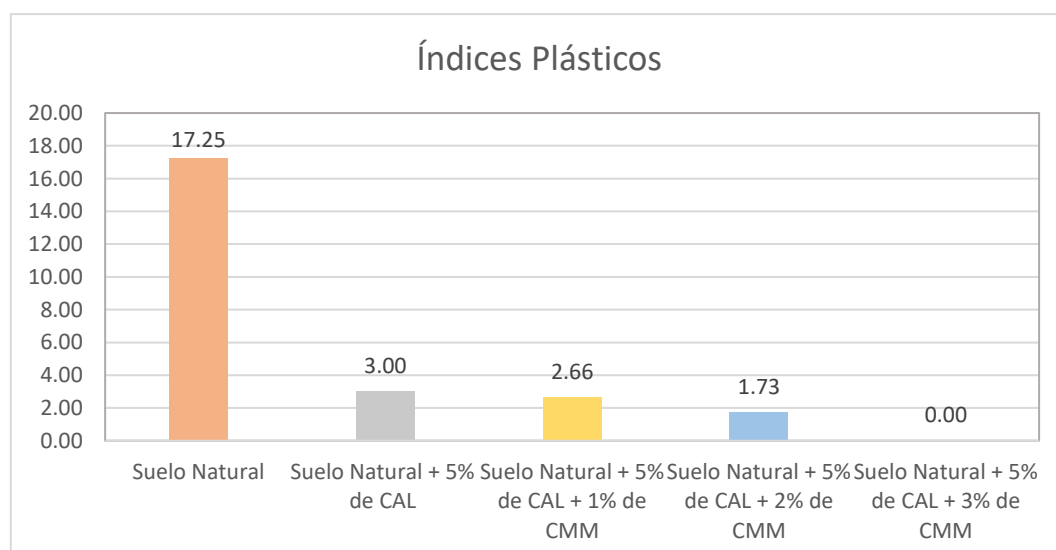
Se puede observar según los resultados de los ensayos, que, la ceniza de mazorca de maíz incrementa la plasticidad del suelo natural, lo cual podemos traducir como una mejora a la comprensibilidad del suelo, además el límite plástico influye de manera directa con el índice de plasticidad, por lo que se notó la mejora en la dosificación de suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM donde, su índice plástico es nulo.

**Figura 82. Gráfico de Resultados de Ensayo de Límites Plásticos.**



Nota. Podemos observar la tendencia del límite plástico a incrementar a medida que se aumenta los aditivos estabilizantes. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

**Figura 83. Gráfico de resultados de Índices Plásticos.**



Nota. El índice de plasticidad mejora a medida que se aumentan los aditivos estabilizantes. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.





### 3.6.6. Clasificación de suelos

#### 3.6.6.1. Procesamiento del Ensayo

Para determinar el tipo de suelo que se encontró en las calicatas que se realizó, se utilizó dos metodologías que son: AASHTO y SUCS; para ambos casos se necesita del ensayo de granulometría, límites líquido, límite plástico e índice de plasticidad, pero para en el caso de la metodología AASHTO se recomienda que se especifique el índice de grupo (IG), esto en caso el ensayo sea para subrasante.

El índice de grupo se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

$F$  = Porcentaje pasado por el tamiz núm. 200

$LL$  = Límite líquido

$PI$  = Índice de plasticidad.

Esta ecuación presenta algunas reglas que a continuación se presentan:

- Si la ecuación anterior da un valor negativo para IG, se considera como 0.
- El índice de grupo calculado se redondea al entero más próximo.
- No hay límite superior para el índice de grupo.
- El índice de grupo de los suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 siempre es 0.
- Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, se utiliza el índice de grupo parcial para PI, o

$$IG = 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

(Das, 2015)

#### A) Clasificación por el Método AASHTO

Tabla 61. Toma de datos necesarios para la Clasificación por el Método AASHTO

DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN	
Granulometría	Límites de consistencia
% que pasa el tamiz N° 10 = 97.72%	LL = 40.44%
% que pasa el tamiz N° 40 = 95.06%	LP = 23.19%
% que pasa el tamiz N° 200 = 80.42	IP = 17.25%

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tabla 62. Toma de datos necesarios para la Clasificación por el Método AASHTO para las distintas combinaciones de cal y ceniza de mazorca de maíz (CMM)



LIMITES DE ATTERBERG	DATOS PARA LA CLASIFICACION			
	SN+5% CAL	SN+5% CAL+1%CMM	SN+5% CAL+2%CMM	SN+5% CAL+3%CMM
LL	31.40%	31.66%	31.83%	31.42%
LP	28.40%	29.00%	30.10%	32.34%
IP	3.00%	2.66%	1.73%	NP

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 84. Clasificación de suelos Método AASHTO (A-1, A-2, A-3).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Nota. Los materiales que se clasifican dentro del rango A-1, A-2, A-3, tienen los valores determinados en la presente tabla. Tomado de *Clasificación de los suelos mediante la metodología AASHTO* [Imagen], DAS, 2015.

Figura 85. Clasificación de suelos Método AASHTO (A-4, A-5, A-6 y A-7)

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de clasificación				A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$				
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$				



Nota. Los materiales que se clasifican dentro del rango A-4, A-5, A-6, A-7 tienen los valores determinados en la presente tabla. Tomado de *Clasificación de los suelos mediante la metodología AASHTO* [Imagen], DAS, 2015.

### B) Clasificación por el Método SUCS

Tabla 63. Datos para clasificación de suelos para suelo natural.

DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN SUELO NATURAL	
Granulometría	Límites de consistencia
% porcentaje el tamiz N° 200 = 80.42%	LL = 40.44%
	LP = 23.19%
	IP = 17.25%

Fuente: Propia.

Tabla 64. Datos para clasificación de suelos para las diferentes combinaciones de cal y ceniza de mazorca de maíz (CMM).

LÍMITES DE ATTERBERG	DATOS PARA LA CLASIFICACION			
	SN+5% CAL	SN+5% CAL+1%CMM	SN+5% CAL+2%CMM	SN+5% CAL+3%CMM
LL	31.40%	31.66%	31.83%	31.42%
LP	28.40%	29.00%	30.10%	32.34%
IP	3.00%	2.66%	1.73%	NP

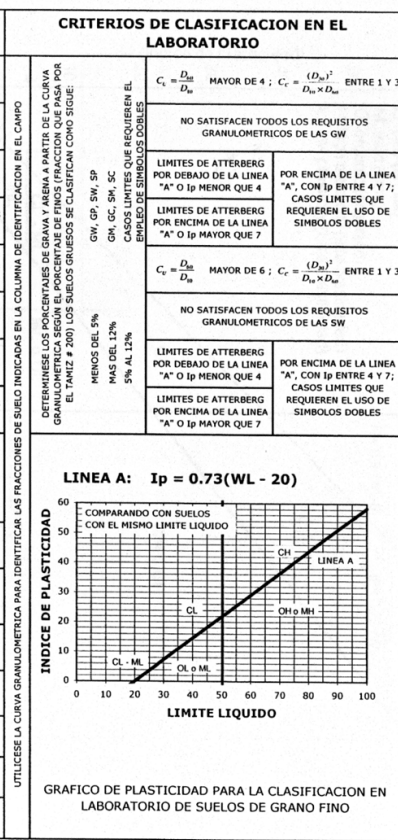
Fuente: Propia



Figura 86. Clasificación de suelos por el Método S.U.C.S.

Sistema USCS de Clasificación de Suelos

IDENTIFICACION EN EL CAMPO		SIMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIOS DE CLASIFICACION EN EL LABORATORIO			
SUELOS DE GRANO GRUESO - MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL ES RETENIDO POR EL TAMIZ # 200	GRAVAS - MAS DE LA MITAD DE LA FRACCION GRUESA ES RETENIDA POR EL TAMIZ # 4	AMPLIA GAMA DE TAMAÑOS Y CANTIDADES APRECIABLES DE TODOS LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	<b>GW</b>	GRAVA BIEN GRADUADA, MEZCLA DE GRAVA Y ARENA CON POCOS FINOS O SIN ELLOS	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ MAYOR DE 4 ; $C_r = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{30}}$ ENTRE 1 Y 3  NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS GRANULOMETRICOS DE LAS GW  LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA "A" O $I_p$ MENOR QUE 4  POR ENCIMA DE LA LINEA "A", CON $I_p$ ENTRE 4 Y 7; CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL USO DE SIMBOLOS DOBLES  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ MAYOR DE 6 ; $C_r = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{30}}$ ENTRE 1 Y 3  NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS GRANULOMETRICOS DE LAS SW  LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA "A" O $I_p$ MENOR QUE 4  POR ENCIMA DE LA LINEA "A", CON $I_p$ ENTRE 4 Y 7; CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL USO DE SIMBOLOS DOBLES  LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA "A" O $I_p$ MAYOR QUE 7  POR ENCIMA DE LA LINEA "A" O $I_p$ MAYOR QUE 7		
			<b>GP</b>	GRAVAS MAL GRADUADAS, MEZCLAS DE ARENA Y GRAVA CON POCOS FINOS O SIN ELLOS			
	GRAVAS CON FINOS (CON POCOS FINOS O SIN ELLOS)	FRACCION FINA NO PLASTICA (PARA LA IDENTIFICACION VER EL GRUPO ML MAS ABAJO)	<b>GM</b>	GRAVAS LIMOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE GRAVA, ARENA Y LIMO			
			<b>GC</b>	GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE GRAVA, ARENA Y ARCILLA			
	ARENAS - MAS DE LA MITAD DE LA FRACCION GRUESA PASA POR EL TAMIZ # 4	AMPLIA GAMA DE TAMAÑOS Y CANTIDADES APRECIABLES DE TODOS LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	<b>SW</b>	ARENAS BIEN GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN ELLOS			
			<b>SP</b>	ARENAS MAL GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN ELLOS			
ARENAS CON FINO (CON POCOS FINOS O SIN ELLOS)	FINOS NO PLASTICOS (PARA IDENTIFICACION VER EL GRUPO ML MAS ABAJO)	<b>SM</b>	ARENAS LIMOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y LIMO MAL GRADUADAS				
		<b>SC</b>	ARENAS ARCILLOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE ARENAS O ARCILLAS				
MÉTODOS DE IDENTIFICACION PARA LA FRACCION QUE PASA POR EL TAMIZ # 40							
SUELOS DE GRANO FINO - MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL PASA POR EL TAMIZ # 200	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MENOR DE 50	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (A LA DISGREGACION)	DILATANCIA (REACCION A LA AGITACION)	TENACIDAD (CONSISTENCIA CERCA DEL LIMITE PLASTICO)	<b>ML</b>	LIMOS INORGANICOS Y ARENAS MUY FINAS, POLVO DE ROCA, ARENAS FINAS LIMOSAS O ARCILLAS CON LIGERA PLASTICIDAD	
		NULA A LIGERA	RAPIDA A LENTA	NULA		<b>CL</b>	ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD BAJA A MEDIA, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS MAGRAS
		MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	MEDIA		<b>OL</b>	LIMOS ORGANICOS Y ARCILLAS LIMOSAS ORGANICAS DE BAJA PLASTICIDAD
	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MAYOR DE 50	LIGERA A MEDIA	LENTA A NULA	LIGERA A MEDIA	<b>MH</b>	LIMOS INORGANICOS, SUELOS LIMOSOS O ARENOSOS FINOS MICACEOS O CON DIATOMEAS, LIMOS ELASTICOS	
		ALTA A MUY ALTA	NULA	ALTA	<b>CH</b>	ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD ELEVADA, ARCILLAS GRASAS	
		MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	LIGERA A MEDIA	<b>OH</b>	ARCILLAS ORGANICAS DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA	
SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS	FACILMENTE IDENTIFICABLES POR SU COLOR, OLORES, SENSACION ESPONJOSA Y FRECUENTEMENTE POR SU TEXTURA FIBROSA			<b>Pt</b>	TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS		



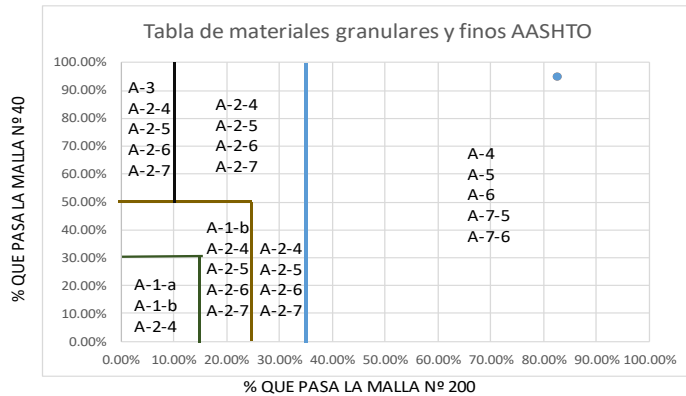
Nota. Los materiales que tengan la nomenclatura mediante SUCS, estarán definidos por las siglas del material predominante como primer prefijo y para determinar sus propiedades más específicas se usa el sufijo, donde se pone el segundo material predominante, o en caso de materiales finos, se usará como sufijo las propiedades plásticas que este posea. Tomado de *Sistema de Clasificación por el sistema SUCS* [Imagen], MONTEJO, 2002.



3.6.6.2. Diagrama del Ensayo

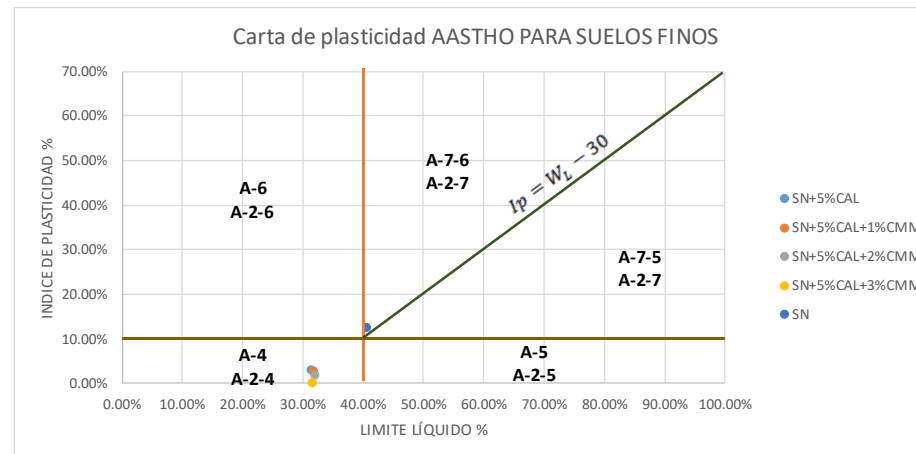
Véase las tablas 65 y 66.

Tabla 65. Clasificación de suelos por el método AASHTO – procesamiento de datos.



DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN	
Granulometría	Límites de consistencia
% que pasa el tamiz N° 10 = 97.72%	LL = 40.44%
% que pasa el tamiz N° 40 = 95.06%	LP = 23.19%
% que pasa el tamiz N° 200 = 80.42	IP = 17.25%

LÍMITES DE ATTERBERG	DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN			
	SN+5% CAL	SN+5% CAL+1% CMM	SN+5% CAL+2% CMM	SN+5% CAL+3% CMM
LL	31.40%	31.66%	31.83%	31.42%
LP	28.40%	29.00%	30.10%	32.34%
IP	3.00%	2.66%	1.73%	NP



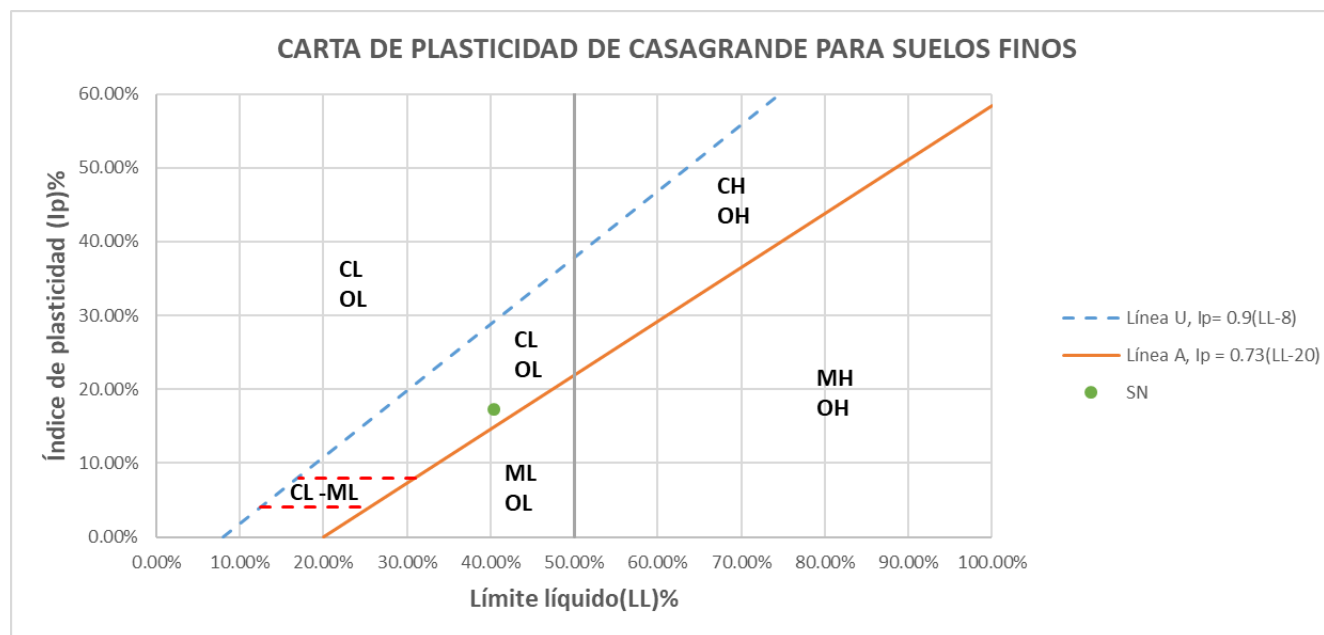
MUESTRA	SN	SN+5% CAL	SN+5% CAL	SN+5% CAL+1% CMM	SN+5% CAL+2% CMM	SN+5% CAL+2% CMM
CLASIFICACIÓN	A-7-6(14)	A-4(9)	A-4(9)	A-4(9)	A-4(9)	A-4(9)

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 66. Clasificación de suelos por el método SUCS – procesamiento de datos.

DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN DEL SUELO NATURAL	
Granulometría	Limites de consistencia
% que queda retenido en el tamiz N°200 =80.42%, por lo que se considera como un suelo fino	LL=40.44%
	LP=23.19%
	IP=17.25%



CLASIFICACIÓN DEL SUELO NATURAL
Arcilla de baja plasticidad (CL)

Fuente: Elaboración Propia.



### 3.6.6.3. Análisis del Ensayo

El suelo extraído de la Vía Expresa de los kilómetros indicados, según la clasificación de suelos por el método AASHTO, paso de ser un suelo arcilloso con límite líquido alto “A-7-6” con un  $IG = 14$  a un suelo arcilloso con un límite líquido alto “A-4” con un  $IG = 9$ .

Este mismo suelo según la clasificación por el método SUCS, está en el grupo de limos de baja compresibilidad “ML” respecto al suelo natural y a todas sus variantes.

### 3.6.7. Compactación de Suelos usando Energía Modificada (Proctor Modificado)

#### 3.6.7.1. Procesamiento del Ensayo

- Contenido de Humedad: Se determinará el contenido de humedad, para cada porcentaje de agua propuesto en los ensayos, a partir de la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso de Suelo Seco}} \times 100 = \frac{PMH - PMS}{PMS - PR} \times 100$$

Donde:

$W$  = Contenido de Humedad (%).

$PMH$  = Peso de muestra húmeda más recipiente (gr).

$PMS$  = Peso de muestra secada en horno más recipiente (gr).

$PR$  = Peso de recipiente (gr).

- Densidad Húmeda: servirá para determinar la densidad de los especímenes antes de ser secados, en estado húmedo, usando la siguiente fórmula:

$$\rho_m = \left( \frac{1}{VM} \right) \times PMH$$

Donde:

$\rho_m$  = Densidad Húmeda (gr/cm<sup>3</sup>).

$VM$  = Volumen de Molde (cm<sup>3</sup>).

$PMH$  = Peso de Muestra Húmeda (gr).

- Densidad Seca:

$$\rho_d = \left( \frac{100 \times \rho_m}{100 + W} \right)$$

Donde:

$\rho_d$  = Densidad Seca (gr/cm<sup>3</sup>).

$\rho_m$  = Densidad Húmeda (gr/cm<sup>3</sup>).

$W$  = Contenido de humedad (%).

Las densidades secas serán graficadas como ordenadas y el contenido de humedad de cada una, como abscisas, para permitirnos tener una curva de tendencia polinómica de grado 6, con la



cual podremos determinar la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo.

Los ensayos fueron realizados en base al “Manual de Ensayos de Materiales” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2016 (MTC E 115).



#### 3.6.7.2. Diagrama del Ensayo

Véase las tablas 67, 68, 69, 70 y 71, y figuras 87, 88, 89, 89 y 91.





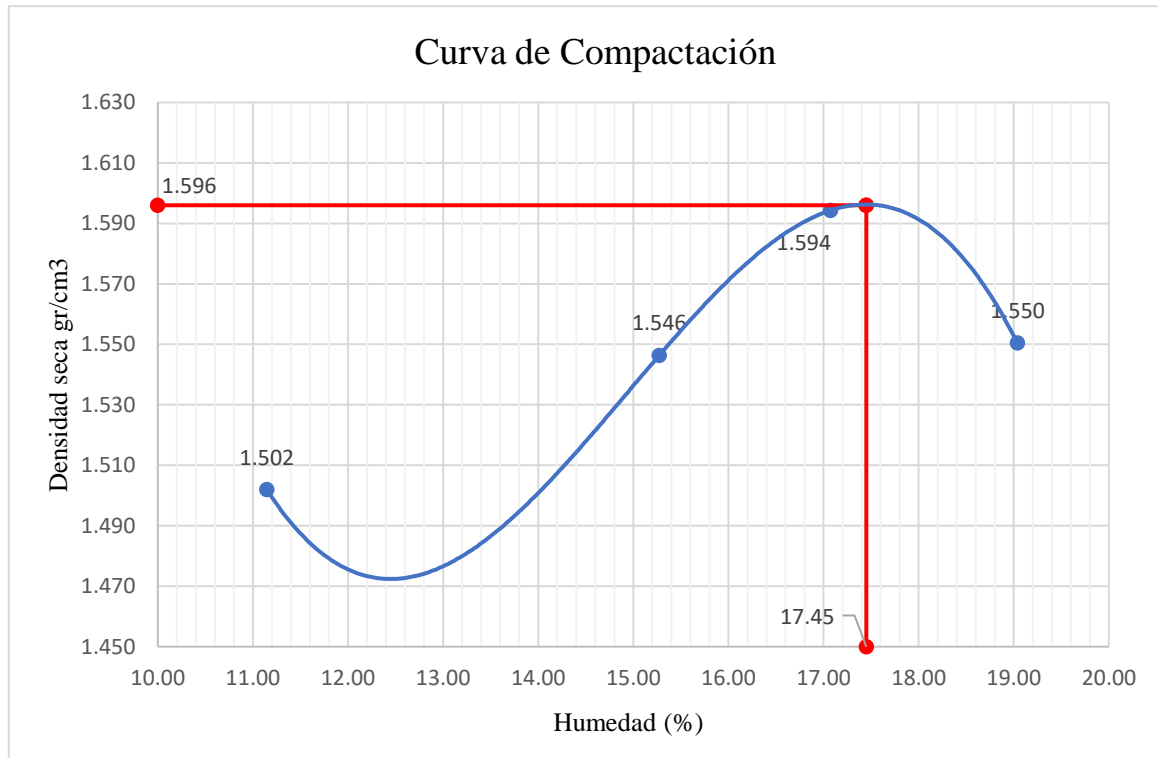
Tabla 67. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco.							
Fecha de ensayo:	04/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9970.000	9834.00	9590.00	10015.00				
Peso del Molde (gr)	5991.000	5991.00	5991.00	5991.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)	3979.000	3843.000	3599.000	4024.000				
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.846	1.783	1.669	1.866				
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	66.860	67.060	63.83	59.24	58.74	58.48	67.34	73.73
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	58.710	58.930	57.45	53.50	53.94	54.80	59.51	65.53
Peso del Agua (gr)	8.150	8.130	6.380	5.740	4.800	3.680	7.830	8.200
Peso de Tara	15.820	16.310	15.89	15.72	15.94	16.71	15.46	15.44
Peso de Muestra Seca (gr)	42.890	42.620	41.560	37.780	38.000	38.090	44.050	50.090
Contenido de Humedad (%)	19.00%	19.08%	15.35%	15.19%	12.63%	9.66%	17.78%	16.37%
Contenido de Humedad Promedio (%)	19.039		15.272		11.146		17.073	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.550		1.546		1.502		1.594	
Humedad Óptima (%)	17.45							
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.596							

Fuente: Elaboración Propia.





Figura 87. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural.



Nota. La curva de compactación es una línea logarítmica de tendencia que se realiza en base a datos obtenidos de la máxima densidad seca a la que llega el suelo natural añadido con distintos porcentajes de agua, por lo que podremos determinar un porcentaje óptimo mediante la proyección de la línea de tendencia. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

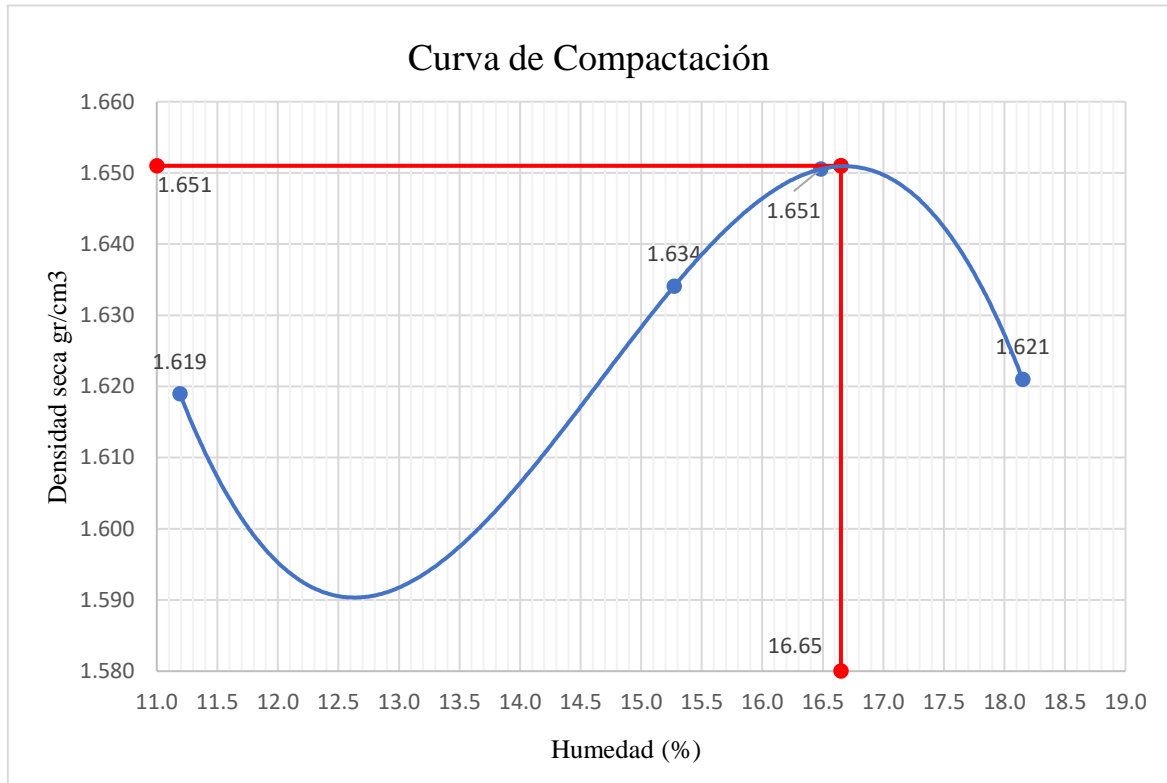
Tabla 68. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL.

 <p style="text-align: center;">Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL.							
Fecha de ensayo:	04/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9924.000	9940.00	9676.00	9856.00				
Peso del Molde (gr)	5795.000	5795.00	5795.00	5795.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)	4129.000	4145.000	3881.000	4061.000				
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.915	1.923	1.800	1.884				
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	82.580	75.780	60.58	72.14	62.44	66.21	69.76	77.49
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	71.990	66.910	53.88	64.36	57.66	61.22	62.57	69.42
Peso del Agua (gr)	10.590	8.870	6.700	7.780	4.780	4.990	7.190	8.070
Peso de Tara	16.480	15.410	14.32	15.83	14.97	16.60	15.80	16.23
Peso de Muestra Seca (gr)	55.510	51.500	39.560	48.530	42.690	44.620	46.770	53.190
Contenido de Humedad (%)	19.08%	17.22%	16.94%	16.03%	11.20%	11.18%	15.37%	15.17%
Contenido de Humedad Promedio (%)	18.150	16.484	11.190	15.273				
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.621	1.651	1.619	1.634				
Humedad Óptima (%)	16.65							
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.651							

Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 88. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL.**



Nota. La curva de compactación es una línea logarítmica de tendencia que se realiza en base a datos obtenidos de la máxima densidad seca a la que llega el suelo natural + 5% de CAL, añadido con distintos porcentajes de agua, por lo que podremos determinar un porcentaje óptimo mediante la proyección de la línea de tendencia. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



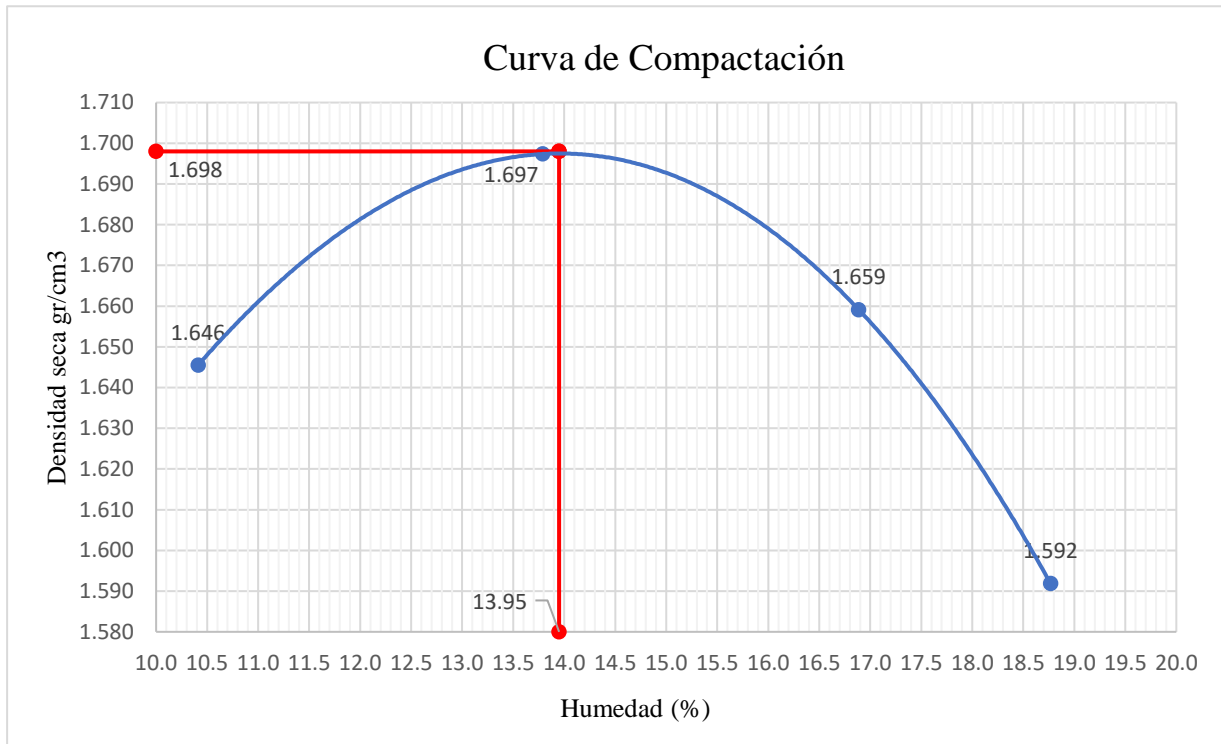
Tabla 69. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

 <p style="text-align: center;">Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL + 1% de CMM							
Fecha de ensayo:	05/03/2021							
<u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9908.000	10155.00	10172.00	10067.00				
Peso del Molde (gr)	5991.000	5991.00	5991.00	5991.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)	3917.000	4164.000	4181.000	4076.000				
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.817	1.931	1.939	1.891				
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	65.540	64.350	58.29	52.63	66.98	69.53	74.46	81.64
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	60.510	60.240	53.29	48.08	59.59	61.89	65.50	71.20
Peso del Agua (gr)	5.030	4.110	5.000	4.550	7.390	7.640	8.960	10.440
Peso de Tara	16.370	16.650	16.61	15.46	15.73	16.75	16.60	16.86
Peso de Muestra Seca (gr)	44.140	43.590	36.680	32.620	43.860	45.140	48.900	54.340
Contenido de Humedad (%)	11.40%	9.43%	13.63%	13.95%	16.85%	16.93%	18.32%	19.21%
Contenido de Humedad Promedio (%)	10.412	13.790	16.887	18.768				
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.646	1.697	1.659	1.592				
Humedad Óptima (%)	13.95							
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.698							

Fuente: Elaboración Propia.




**Figura 89. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.**



Nota. La curva de compactación es una línea logarítmica de tendencia que se realiza en base a datos obtenidos de la máxima densidad seca a la que llega el suelo natural + 5% de CAL + 1% de CMM, añadido con distintos porcentajes de agua, por lo que podremos determinar un porcentaje óptimo mediante la proyección de la línea de tendencia. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



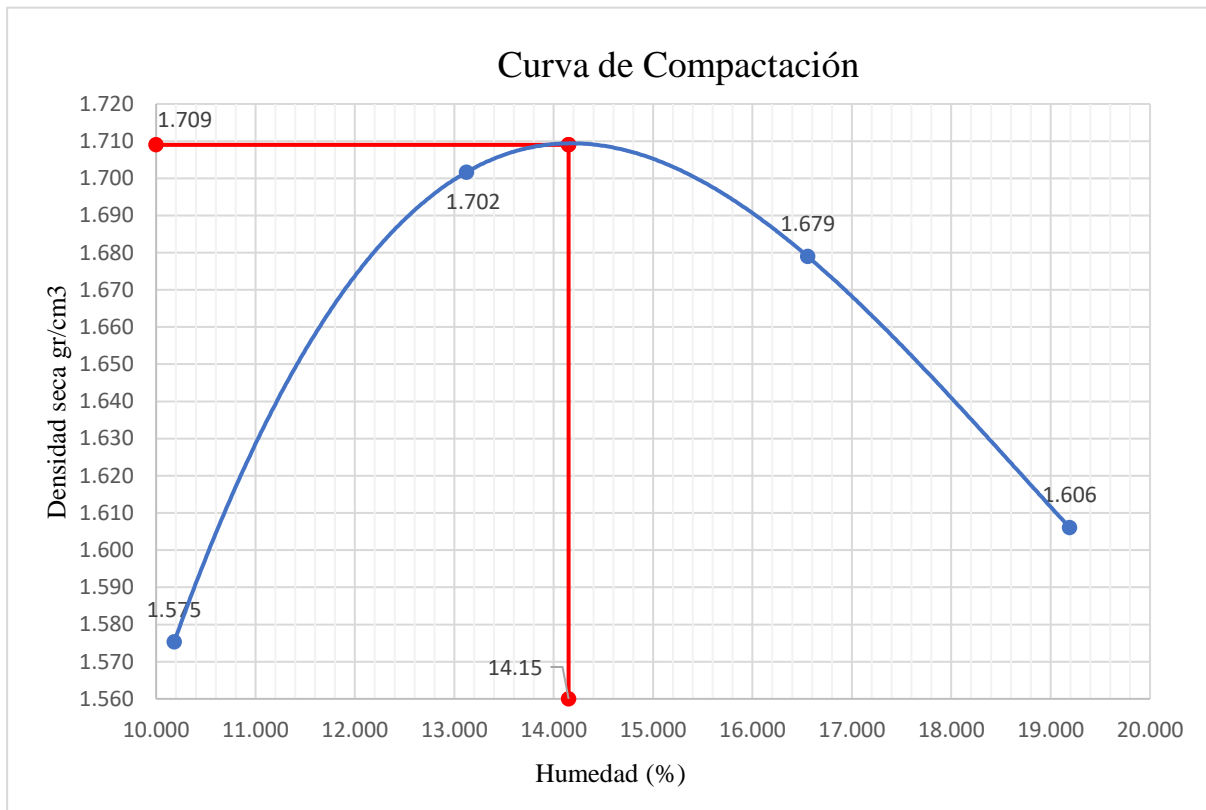
Tabla 70. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.

 Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL + 2% de CMM							
Fecha de ensayo:	05/03/2021							
<p><u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO</u>  <u>UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9537.000	9945.00	10014.00	9922.00				
Peso del Molde (gr)	5795.000	5795.00	5795.00	5795.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)	3742.000	4150.000	4219.000	4127.000				
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.736	1.925	1.957	1.914				
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	77.040	50.260	67.89	66.88	72.12	59.83	61.91	57.82
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	71.360	47.110	62.21	60.64	64.06	53.76	54.57	51.09
Peso del Agua (gr)	5.680	3.150	5.680	6.240	8.060	6.070	7.340	6.730
Peso de Tara	16.550	15.610	16.81	15.20	16.84	15.93	15.35	16.87
Peso de Muestra Seca (gr)	54.810	31.500	45.400	45.440	47.220	37.830	39.220	34.220
Contenido de Humedad (%)	10.36%	10.00%	12.51%	13.73%	17.07%	16.05%	18.71%	19.67%
Contenido de Humedad Promedio (%)	10.182	13.122	16.557	19.191				
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.575	1.702	1.679	1.606				
Humedad Óptima (%)	14.15							
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.709							

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 90. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.**





Nota. La curva de compactación es una línea logarítmica de tendencia que se realiza en base a datos obtenidos de la máxima densidad seca a la que llega el suelo natural + 5% de CAL + 2% de CMM, añadido con distintos porcentajes de agua, por lo que podremos determinar un porcentaje óptimo mediante la proyección de la línea de tendencia. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.





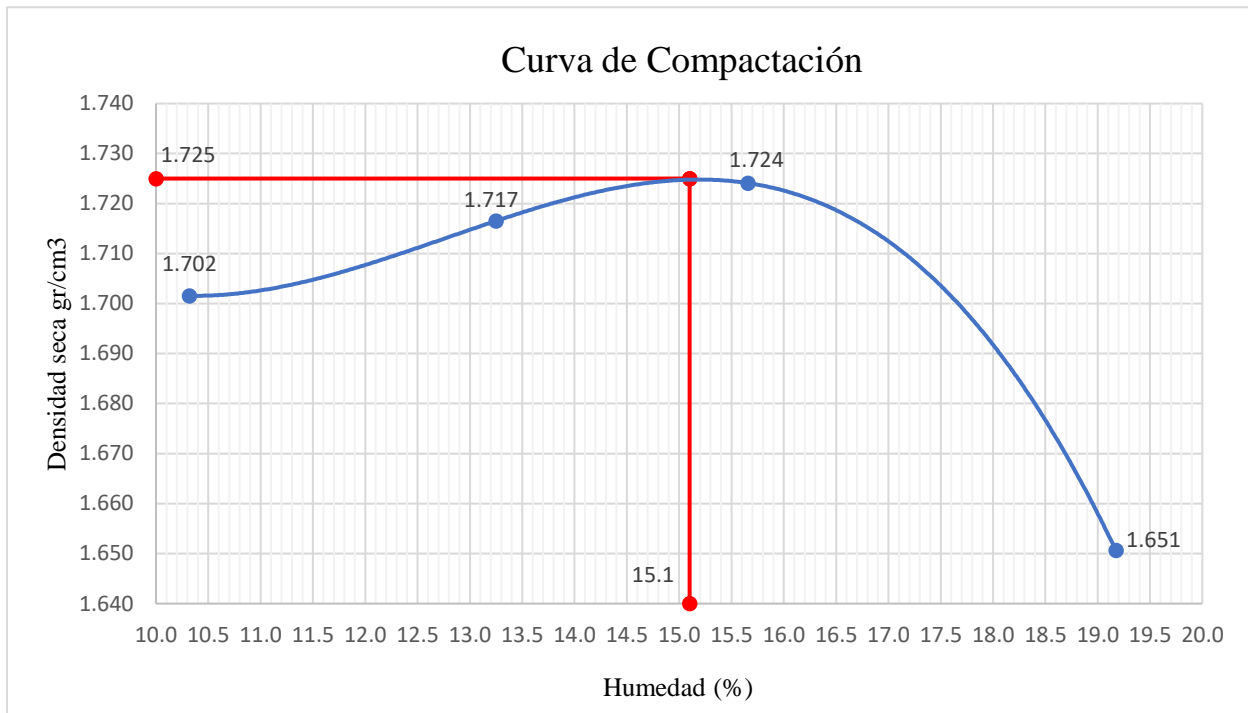
Tabla 71. Procesamiento de Datos – Ensayo de Proctor Modificado para Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p style="text-align: center;">Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 								
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Ensayo:	Compactación de Suelos usando Próctor Modificado							
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500							
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Víctor Daniel Mormontoy Peñalba							
Descripción de Muestra:	Se usó suelo arcilloso tomado de la Vía Expresa Cusco + 5% de CAL + 3% de CMM							
Fecha de ensayo:	05/03/2021							
<u>MTC E 115 - COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u>								
Diametro de Molde:	15.35	cm.						
Altura de Molde:	11.65	cm.						
Volumen del Molde:	2155.92	cm <sup>3</sup> .						
Metodo:	C (6")							
Capas:	5	unid.						
Golpes por capa:	56	unid.						
<b>Ensayo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>				
Peso de Muestra Húmeda + Molde (gr)	9842.000	9986.00	10094.00	10036.00				
Peso del Molde (gr)	5795.000	5795.00	5795.00	5795.00				
Peso de Muestra Húmeda (gr)	4047.000	4191.000	4299.000	4241.000				
Volumen de Molde (gr)	2155.920	2155.92	2155.92	2155.92				
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.877	1.944	1.994	1.967				
Nro. de Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso de Muestra Húmeda + Tara	64.480	67.870	76.05	69.38	66.49	74.46	76.24	79.90
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	59.940	63.070	69.30	63.07	59.48	66.62	66.46	69.80
Peso del Agua (gr)	4.540	4.800	6.750	6.310	7.010	7.840	9.780	10.100
Peso de Tara	15.960	16.540	16.55	17.02	15.65	15.45	15.93	16.62
Peso de Muestra Seca (gr)	43.980	46.530	52.750	46.050	43.830	51.170	50.530	53.180
Contenido de Humedad (%)	10.32%	10.32%	12.80%	13.70%	15.99%	15.32%	19.35%	18.99%
Contenido de Humedad Promedio (%)	10.319		13.249		15.658		19.173	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.702		1.717		1.724		1.651	
Humedad Óptima (%)	15.1							
Densidad seca Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.725							

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 91. Curva de Compactación de Proctor Modificado en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.**



Nota. La curva de compactación es una línea logarítmica de tendencia que se realiza en base a datos obtenidos de la máxima densidad seca a la que llega el suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM, añadido con distintos porcentajes de agua, por lo que podremos determinar un porcentaje óptimo mediante la proyección de la línea de tendencia. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

### 3.6.7.3. Análisis del Ensayo

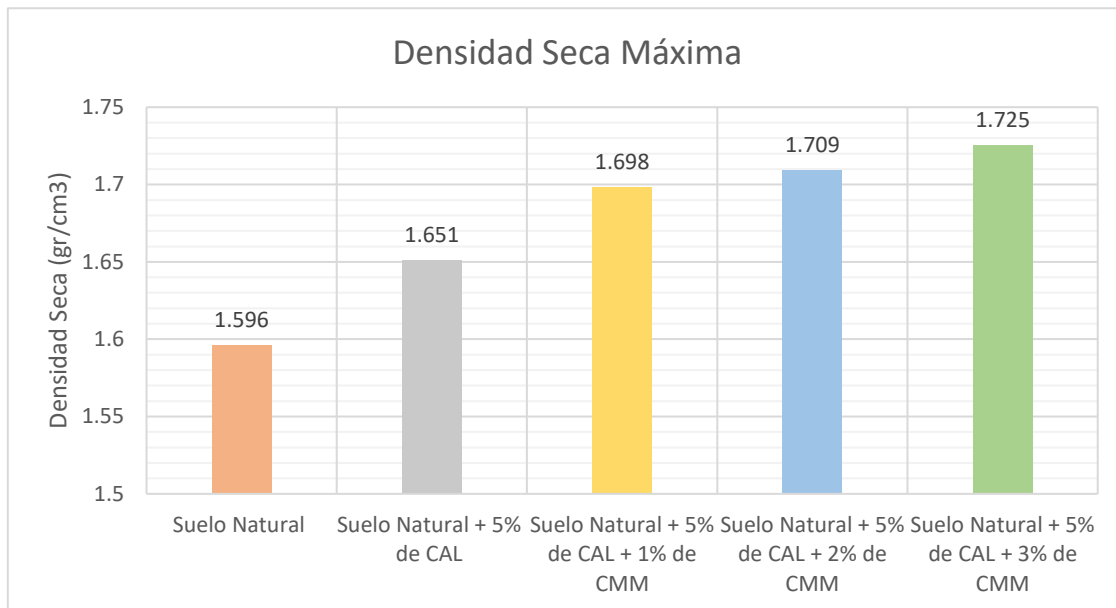
Se hizo el método A del Proctor Modificado, ya que, al ser un material tan fino, menos del 20% del peso del material fue retenido en la malla N° 4, con las características del Método C (5 capas, 56 golpes, 6 pulgadas de diámetro), dado que, según el MTC Manual de Ensayos: “Si el método no es especificado; los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método B o C” (2016, pág. 105).

El suelo Natural tiene una densidad seca máxima de 1.596 gr/cm<sup>3</sup> y con un contenido de humedad óptimo de 17.45%.

Se obtuvo la densidad seca máxima en el ensayo de “Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM”, siendo esta de 1.725 gr/cm<sup>3</sup> y con un contenido de humedad óptimo de 15.10%; se puede apreciar que la densidad seca máxima se pudo incrementar progresivamente con la

Ceniza de Mazorca de Maíz.

**Figura 92. Gráfico de Densidad Seca Máxima de los ensayos de Proctor Modificado.**



Nota. El gráfico nos evidencia un claro incremento de la densidad máxima seca del material a medida que se le agregan los aditivos estabilizantes propuestos en la investigación. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

### 3.6.8. Determinación de Capacidad de Soporte CBR

#### 3.6.8.1. Procesamiento del Ensayo

- Contenido de Humedad:

$$W = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso de Suelo Seco}} \times 100 = \frac{PMH - PMS}{PMS - PR} \times 100$$

Donde:

$W$  = Contenido de Humedad (%).

$PMH$  = Peso de muestra húmeda más recipiente (gr).

$PMS$  = Peso de muestra secada en horno más recipiente (gr).

$PR$  = Peso de recipiente (gr).

- Densidad Húmeda:

$$\rho_m = \left(\frac{1}{VM}\right) \times PMH$$

Donde:

$\rho_m$  = Densidad Húmeda (gr/cm<sup>3</sup>).

$VM$  = Volumen de Molde (cm<sup>3</sup>).



$PMH$  = Peso de Muestra Húmeda (gr).

- Densidad Seca:

$$\rho_d = \left( \frac{100 \times \rho_m}{100 + W} \right)$$

Donde:

$\rho_d$  = Densidad Seca (gr/cm<sup>3</sup>).

$\rho_m$  = Densidad Húmeda (gr/cm<sup>3</sup>).

$W$  = Contenido de humedad (%).

- Valor de la Relación de Soporte: indicador de CBR en porcentaje (índice resistente)

$$CBR = \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria del Patrón}} \times 100$$

Determinaremos los porcentajes de CBR en 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración de acuerdo al siguiente cuadro del Manual de Ensayos MTC (2016):

Tabla 72. Características de muestra patrón para los ensayos de CBR en laboratorio.

Penetración		Presión		
Mm	Pulgadas	MN/m <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/plg <sup>2</sup>
2,54	0,1	6,90	70,31	1,000
5,08	0,2	10,35	105,46	1,500

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Usando las siguientes ecuaciones:

$$CBR_{0.1} = \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{1000} \times 100$$

$$CBR_{0.2} = \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{1500} \times 100$$

Al determinar los resultados, se grafica la Curva de Densidad CBR, con los puntos de ambas ecuaciones para 12, 25 y 56 golpes como abscisas, y las densidades secas como ordenadas respectivamente. Se determinará el valor de CBR al 100% con la Densidad Seca Máxima obtenida en el ensayo respectivo de Proctor para 0.1 y 0.2 pulgadas.

- Ecuación de Ensayo de Penetración: la ecuación utilizada, propuesta por el proveedor del equipo de Penetración, para determinar la carga (kgf) con las lecturas del dial, es la siguiente:

$$F = (A_0 + (A_1 \times X) + (A_2 \times X^2) + (A_3 \times X^3)) \times 101.97$$

Donde:



$F$  = Carga de Penetración (kgf).

$X$  = lectura del dial.

$A_0$  = -0.32433.

$A_1$  = 0.05875.

$A_2$  = -5.69324, E-06.

$A_3$  = 2.26861, E-09.

\* las cargas resultantes negativas serán reemplazadas por 0 kgf.

- Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

$s$  = Esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>).

$F$  = Carga de Penetración (kgf).

$A$  = Área de Pisón (cm<sup>2</sup>)

- Porcentaje de Expansión: la expansión del suelo se determina usando la siguiente fórmula:

$$\%Exp = \frac{L_2 - L_1}{\text{Altura de Molde} - \text{Altura de Disco Espaciador}} \times 100$$

Donde:

$\% Exp$  = Porcentaje de Expansión (%).

$L_1$  = Lectura Inicial (mm).

$L_2$  = Lectura Final (mm).



Los ensayos fueron realizados en base al “Manual de Ensayos de Materiales” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2016 (MTC E 132).

### 3.6.8.2. Diagrama del Ensayo

Véase las tablas 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86 y 87, y figuras 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101 y 102.



Tabla 73. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500.					
Fecha de ensayo:	04/03/2010					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.286		15.286		15.242	
Altura de Molde (cm)	17.811		17.735		17.784	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>	2144.040		2130.09		2126.78	
Peso Molde + Base (gr)	7371.000		7342.00		7381.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	10934.000		11040.00		11338.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>	3563.000		3698.000		3957.000	
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.662		1.736		1.861	
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	84.320	87.930	77.32	73.83	80.35	74.69
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	78.170	81.920	71.53	68.64	74.86	69.22
Peso del Agua (gr)	6.150	6.010	5.790	5.190	5.490	5.470
Peso del Recipiente (gr)	16.400	16.410	16.24	16.43	16.53	15.57
Peso de Muestra Seca (gr)	61.770	65.510	55.290	52.210	58.330	53.650
Contenido de Humedad Final (%)	9.96%	9.17%	10.47%	9.94%	9.41%	10.20%
Contenido de Humedad Promedio Final (%)	9.57%		10.21%		9.80%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.517		1.575		1.694	

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 74. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural.

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	123	3.124	0.000	235	5.969	0.000	191	4.851	0.000
24	1	187	4.750	1.390	287	7.290	1.138	230	5.842	0.850
48	2	215	5.461	1.998	338	8.585	2.254	287	7.290	2.092
72	3	258	6.553	2.931	362	9.195	2.779	324	8.230	2.898
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>267</b>	<b>6.782</b>	<b>3.127</b>	<b>380</b>	<b>9.652</b>	<b>3.173</b>	<b>338</b>	<b>8.585</b>	<b>3.203</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 75. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural.

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0.00	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000
0.64	0.025	3	0.000	0.000	5	0.000	0.000	5	0.000	0.000
1.27	0.050	5	0.000	0.000	9	20.798	1.080	9	20.798	1.080
1.91	0.075	9	20.798	1.080	11	32.756	1.701	13	44.710	2.321
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>11</b>	<b>32.756</b>	<b>1.701</b>	<b>14</b>	<b>50.685</b>	<b>2.632</b>	<b>17</b>	<b>68.604</b>	<b>3.562</b>
3.18	0.125	13	44.710	2.321	16	62.632	3.252	20	86.512	4.492
3.81	0.150	15	56.659	2.942	18	74.575	3.872	22	98.446	5.111
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>21</b>	<b>92.480</b>	<b>4.802</b>	<b>23</b>	<b>104.411</b>	<b>5.421</b>	<b>26</b>	<b>122.299</b>	<b>6.350</b>
6.35	0.250	24	110.375	5.731	25	116.337	6.040	30	146.134	7.587
7.62	0.300	28	134.219	6.969	27	128.259	6.659	34	169.951	8.824
10.16	0.400	30	146.134	7.587	31	152.090	7.897	37	187.802	9.751
12.70	0.500	34	169.951	8.824	37	187.802	9.751	43	223.475	11.603

Área de pisón:	19.26	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

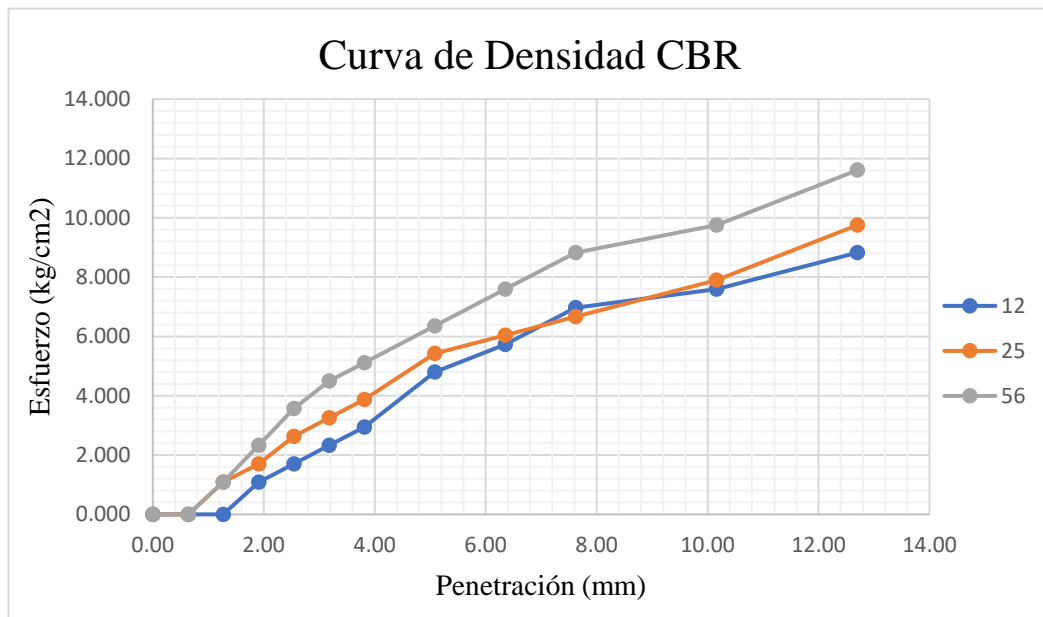
Pulg	%CBR		
	M1	M2	M3
0.1	2.42	3.74	5.07
0.2	4.55	5.14	6.02
D.S.M. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.517	1.575	1.694

C.B.R. 0.1" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	4.02%
C.B.R. 0.2" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	5.31%

Fuente: Elaboración Propia.

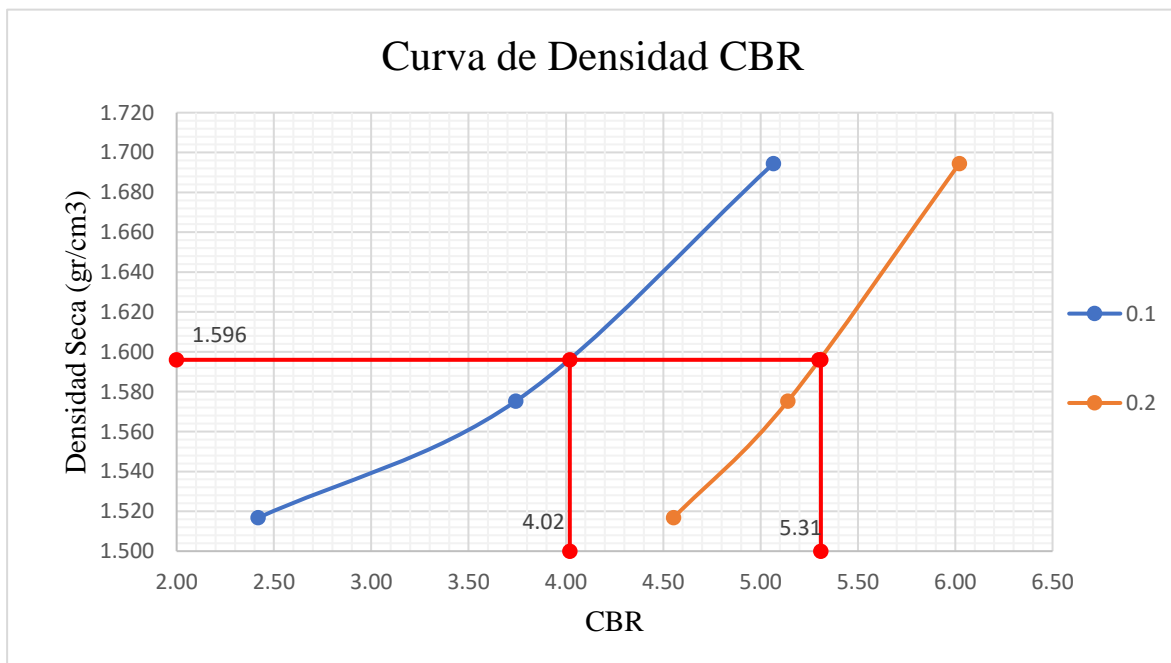


Figura 93. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural.



Nota. En el gráfico se puede observar en las abscisas a la penetración que tiene el suelo en mm y como ordenadas al esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>), cada línea representa los golpes de compactación que tuvo la muestra antes de ser sometida a la penetración. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Figura 94. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural.





Nota. El gráfico muestra la determinación del CBR al 100%, la línea azul y naranja indican 0.1" y 0.2" de penetración respectivamente, siendo la primera intersección con la línea roja (DMS), la que indicará el resultado de CBR. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.





Tabla 76. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural + 5% de CAL.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Vía Expresa km 04+500 + 5% de CAL.					
Fecha de ensayo:	08/03/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.261		15.237		15.193	
Altura de Molde (cm)	17.786		17.802		17.758	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>	2132.460		2126.67		2108.42	
Peso Molde + Base (gr)	7348.000		7433.00		6956.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	10930.000		11149.00		10880.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>	3582.000		3716.000		3924.000	
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.680		1.747		1.861	
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	58.870	60.270	80.60	91.15	80.19	87.11
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	54.520	56.680	74.19	83.57	73.44	79.75
Peso del Agua (gr)	4.350	3.590	6.410	7.580	6.750	7.360
Peso del Recipiente (gr)	16.160	16.430	15.83	16.60	15.45	16.26
Peso de Muestra Seca (gr)	38.360	40.250	58.360	66.970	57.990	63.490
Contenido de Humedad Final (%)	11.34%	8.92%	10.98%	11.32%	11.64%	11.59%
Contenido de Humedad Promedio Final (%)	10.13%		11.15%		11.62%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.525		1.572		1.667	

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 77. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL.

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
Horas	Días	Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
		*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	190	4.826	0.000	266	6.756	0.000	598	15.189	0.000
24	1	234	5.944	0.959	301	7.645	0.762	663	16.840	1.420
48	2	264	6.706	1.613	340	8.636	1.610	685	17.399	1.900
72	3	285	7.239	2.070	365	9.271	2.154	702	17.831	2.272
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>293</b>	<b>7.442</b>	<b>2.244</b>	<b>373</b>	<b>9.474</b>	<b>2.328</b>	<b>713</b>	<b>18.110</b>	<b>2.512</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 78. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL.

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0.00	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.00
0.64	0.025	3	0.000	0.000	3	0.000	0.000	6	2.852	0.15
1.27	0.050	6	2.852	0.148	6	2.852	0.148	8	14.817	0.77
1.91	0.075	8	14.817	0.769	8	14.817	0.769	15	56.659	2.94
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>9</b>	<b>20.798</b>	<b>1.080</b>	<b>11</b>	<b>32.756</b>	<b>1.701</b>	<b>17</b>	<b>68.604</b>	<b>3.56</b>
3.18	0.125	11	32.756	1.701	13	44.710	2.321	24	110.375	5.73
3.81	0.150	12	38.734	2.011	16	62.632	3.252	27	128.259	6.66
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>14</b>	<b>50.685</b>	<b>2.632</b>	<b>19</b>	<b>80.544</b>	<b>4.182</b>	<b>31</b>	<b>152.090</b>	<b>7.90</b>
6.35	0.250	16	62.632	3.252	24	110.375	5.731	35	175.903	9.13
7.62	0.300	18	74.575	3.872	26	122.299	6.350	40	205.644	10.68
10.16	0.400	20	86.512	4.492	29	140.177	7.278	46	241.296	12.53
12.70	0.500	22	98.446	5.111	34	169.951	8.824	50	265.043	13.76

Área de pisón:	19.26	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

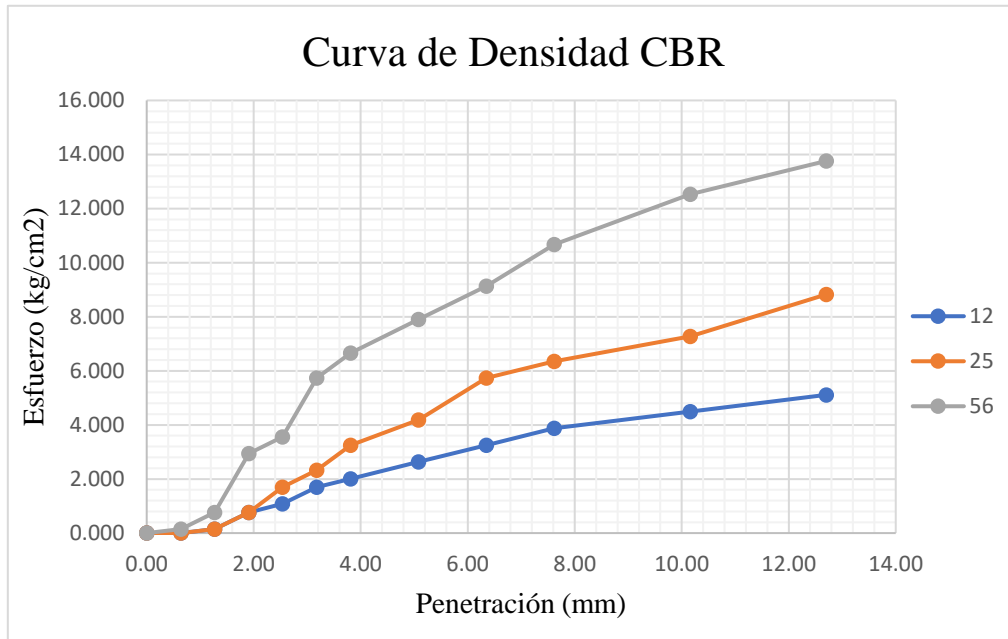
Pulg	%CBR		
	M1	M2	M3
0.1	1.54	2.42	5.07
0.2	2.50	3.97	7.49
D.S.M. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.525	1.572	1.667

C.B.R. 0.1" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	4.61%
C.B.R. 0.2" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	6.88%

Fuente: Elaboración Propia.

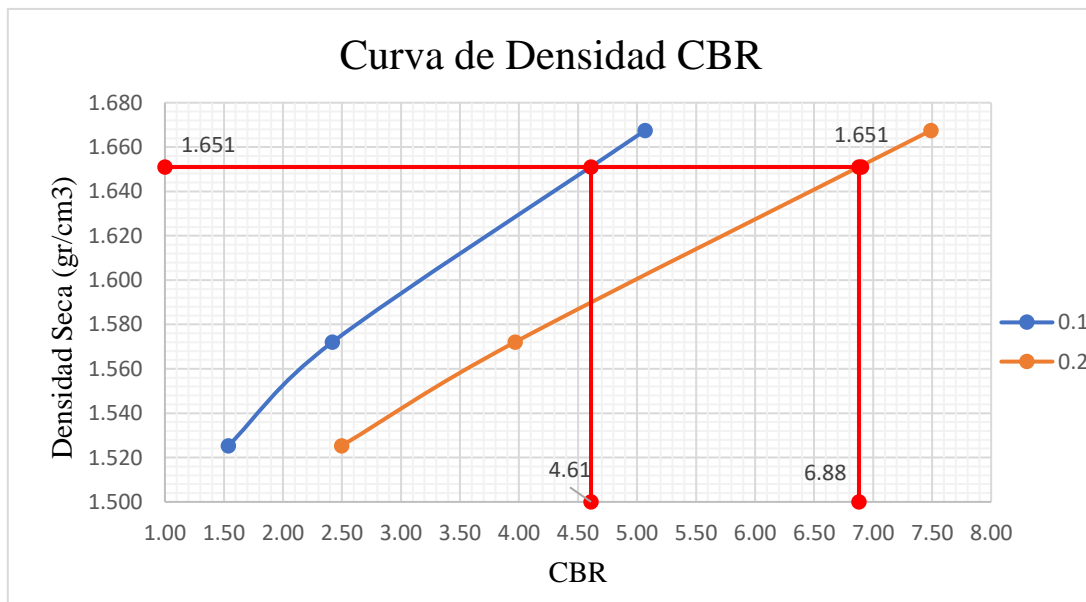


Figura 95. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL.



Nota. En el gráfico se puede observar en las abscisas a la penetración que tiene el suelo en mm y como ordenadas al esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>), cada línea representa los golpes de compactación que tuvo la muestra antes de ser sometida a la penetración. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



Figura 96. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL.



Nota. El gráfico muestra la determinación del CBR al 100%, la línea azul y naranja indican 0.1” y 0.2” de penetración respectivamente, siendo la primera intersección con la línea roja (DMS), la que indicará el resultado de CBR. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



Tabla 79. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada en Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL + 1% de CMM					
Fecha de ensayo:	08/03/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.261		15.237		15.193	
Altura de Molde (cm)	17.786		17.802		17.758	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>	2132.460		2128.67		2108.42	
Peso Molde + Base (gr)	7350.000		7434.00		6956.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	11207.000		11432.00		11242.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>	3857.000		3998.000		4286.000	
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.809		1.878		2.033	
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	56.880	55.730	59.63	57.96	55.75	54.94
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	51.490	50.860	54.32	52.26	50.07	49.97
Peso del Agua (gr)	5.390	4.870	5.310	5.700	5.680	4.970
Peso del Recipiente (gr)	16.370	16.640	16.60	15.46	15.74	16.74
Peso de Muestra Seca (gr)	35.120	34.220	37.720	36.800	34.330	33.230
Contenido de Humedad Final (%)	15.35%	14.23%	14.08%	15.49%	16.55%	14.96%
Contenido de Humedad Promedio Final (%)	14.79%		14.78%		15.75%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.576		1.636		1.756	

Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 80. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	145	3.683	0.000	261	6.629	0.000	525	13.335	0.000
24	1	189	4.801	0.959	301	7.645	0.870	558	14.173	0.721
48	2	215	5.461	1.525	325	8.255	1.393	595	15.113	1.529
72	3	250	6.350	2.288	375	9.525	2.481	628	15.951	2.250
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>255</b>	<b>6.477</b>	<b>2.397</b>	<b>377</b>	<b>9.576</b>	<b>2.524</b>	<b>644</b>	<b>16.358</b>	<b>2.599</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 81. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0.00	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000
0.64	0.025	6	2.852	0.148	6	2.852	0.148	6	2.852	0.148
1.27	0.050	8	14.817	0.769	8	14.817	0.769	8	14.817	0.769
1.91	0.075	9	20.798	1.080	11	32.756	1.701	12	38.734	2.011
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>10</b>	<b>26.778</b>	<b>1.390</b>	<b>14</b>	<b>50.685</b>	<b>2.632</b>	<b>20</b>	<b>86.512</b>	<b>4.492</b>
3.18	0.125	12	38.734	2.011	16	62.632	3.252	24	110.375	5.731
3.81	0.150	13	44.710	2.321	18	74.575	3.872	30	146.134	7.587
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>18</b>	<b>74.575</b>	<b>3.872</b>	<b>26</b>	<b>122.299</b>	<b>6.350</b>	<b>42</b>	<b>217.532</b>	<b>11.295</b>
6.35	0.250	20	86.512	4.492	30	146.134	7.587	47	247.234	12.837
7.62	0.300	21	92.480	4.802	33	163.999	8.515	53	282.841	14.685
10.16	0.400	23	104.411	5.421	36	181.853	9.442	60	324.332	16.840
12.70	0.500	29	140.177	7.278	43	223.475	11.603	69	377.601	19.605

Área de pisón: 19.26 cm<sup>2</sup>

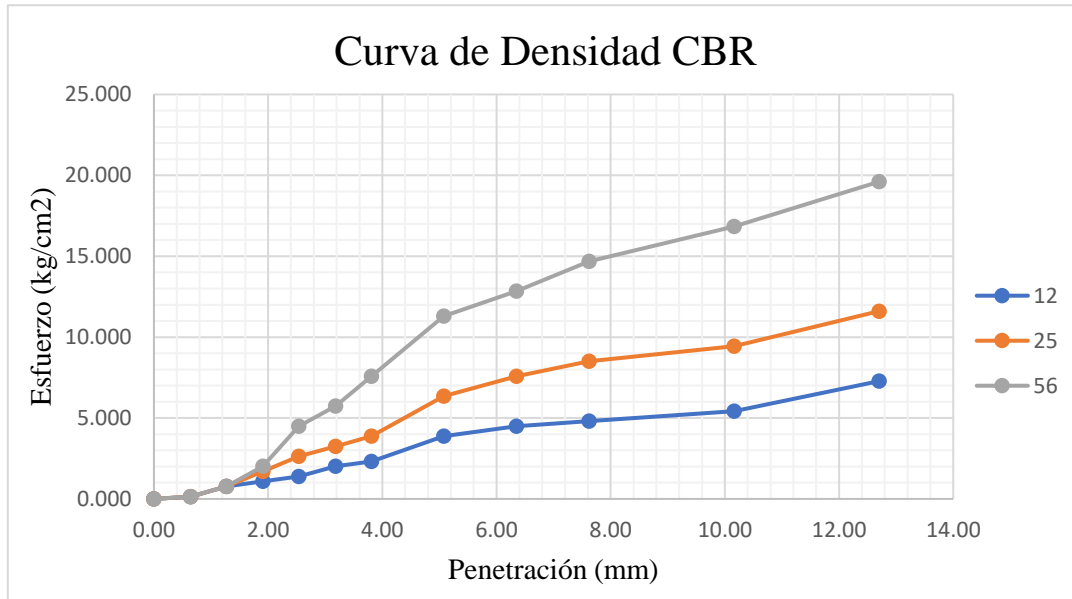
Pulg	%CBR		
	M1	M2	M3
0.1	1.98	3.74	6.39
0.2	3.67	6.02	10.71
D.S.M. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.576	1.636	1.756

C.B.R. 0.1" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	5.13%
C.B.R. 0.2" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	8.45%

Fuente: Elaboración Propia.

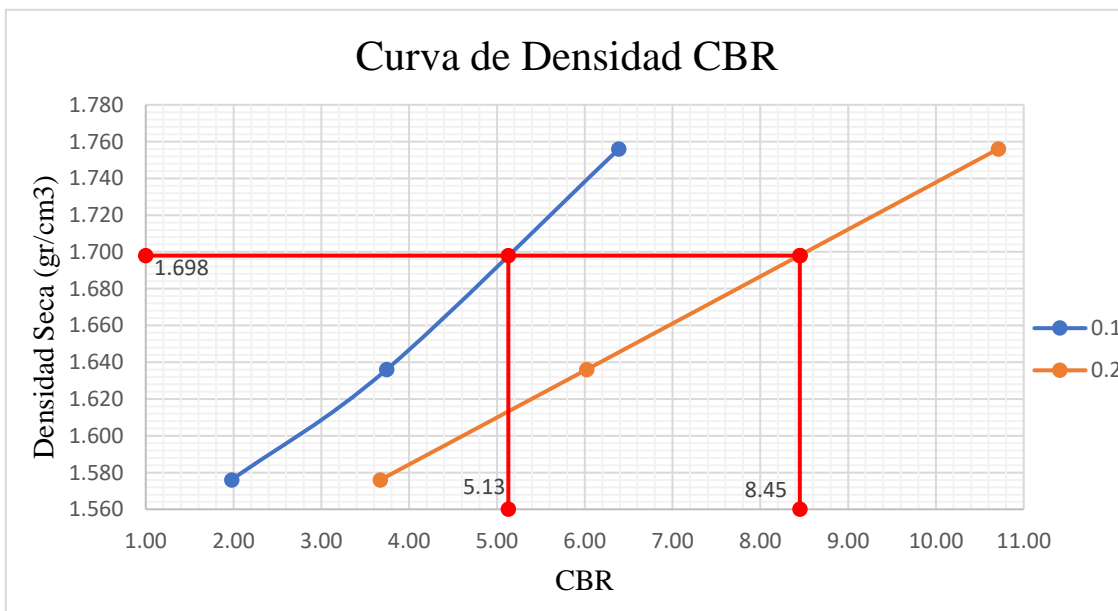


Figura 97. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.



Nota. En el gráfico se puede observar en las abscisas a la penetración que tiene el suelo en mm y como ordenadas al esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>), cada línea representa los golpes de compactación que tuvo la muestra antes de ser sometida a la penetración. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Figura 98. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 1% de CMM.



Nota. El gráfico muestra la determinación del CBR al 100%, la línea azul y naranja indican 0.1" y 0.2" de penetración respectivamente, siendo la primera intersección con la línea roja (DMS), la que indicará el resultado de CBR. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Tabla 82. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada



en Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.



Universidad Andina del Cusco  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL + 2% de CMM
Fecha de ensayo:	05/03/2021

MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)

Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.193		15.237		15.261	
Altura de Molde (cm)	17.758		17.802		17.786	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>	2108.420		2128.68		2132.46	
Peso Molde + Base (gr)	6956.000		7433.00		7348.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	10625.000		11282.00		11429.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>	3669.000		3849.000		4081.000	
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.740		1.808		1.914	
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	53.460	58.650	57.36	57.16	50.63	64.07
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	50.110	54.590	52.90	52.81	46.85	59.48
Peso del Agua (gr)	3.350	4.060	4.460	4.350	3.780	4.590
Peso del Recipiente (gr)	15.730	16.750	16.60	15.46	16.37	16.65
Peso de Muestra Seca (gr)	34.380	37.840	36.300	37.350	30.480	42.830
Contenido de Humedad Final (%)	9.74%	10.73%	12.29%	11.65%	12.40%	10.72%
Contenido de Humedad Promedio Final (%)	10.24%		11.97%		11.56%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.579		1.615		1.715	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 83. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL +



2% de CMM.

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	185	4.699	0.000	274	6.960	0.000	194	4.928	0.000
24	1	210	5.334	0.546	290	7.366	0.348	228	5.791	0.740
48	2	253	6.426	1.485	318	8.077	0.957	266	6.756	1.568
72	3	280	7.112	2.075	359	9.119	1.849	295	7.493	2.200
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>287</b>	<b>7.290</b>	<b>2.228</b>	<b>362</b>	<b>9.195</b>	<b>1.915</b>	<b>300</b>	<b>7.620</b>	<b>2.309</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 84. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0.00	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000
0.64	0.025	3	0.000	0.000	6	2.852	0.148	5	0.000	0.000
1.27	0.050	6	2.852	0.148	12	38.734	2.011	11	32.756	1.701
1.91	0.075	8	14.817	0.769	18	74.575	3.872	20	86.512	4.492
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>11</b>	<b>32.756</b>	<b>1.701</b>	<b>22</b>	<b>98.446</b>	<b>5.111</b>	<b>27</b>	<b>128.259</b>	<b>6.659</b>
3.18	0.125	15	56.659	2.942	26	122.299	6.350	34	169.951	8.824
3.81	0.150	18	74.575	3.872	30	146.134	7.587	40	205.644	10.677
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>20</b>	<b>86.512</b>	<b>4.492</b>	<b>36</b>	<b>181.853</b>	<b>9.442</b>	<b>47</b>	<b>247.234</b>	<b>12.837</b>
6.35	0.250	22	98.446	5.111	42	217.532	11.295	54	288.771	14.993
7.62	0.300	25	116.337	6.040	45	235.357	12.220	60	324.332	16.840
10.16	0.400	29	140.177	7.278	51	270.976	14.069	70	383.514	19.912
12.70	0.500	33	163.999	8.515	58	312.483	16.224	77	424.878	22.060

Área de pisón:	19.26	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Pulg	%CBR		
	M1	M2	M3
0.1	2.42	7.27	9.47
0.2	4.26	8.95	12.17
D.S.M. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.579	1.615	1.715

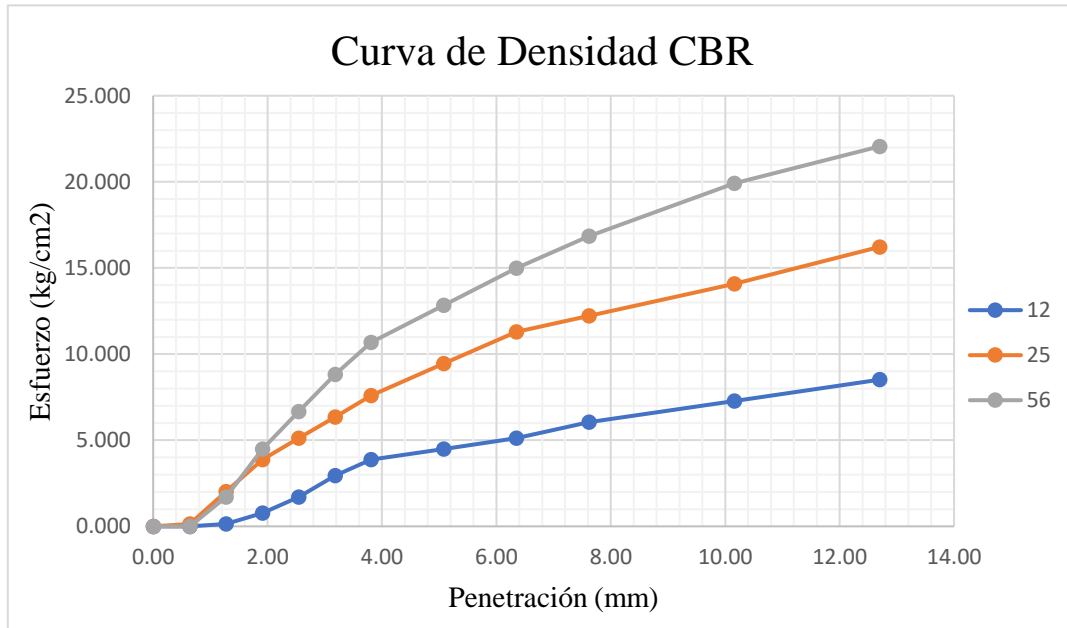
C.B.R. 0.1" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	9.35%
C.B.R. 0.2" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	11.98%

Fuente: Elaboración Propia.



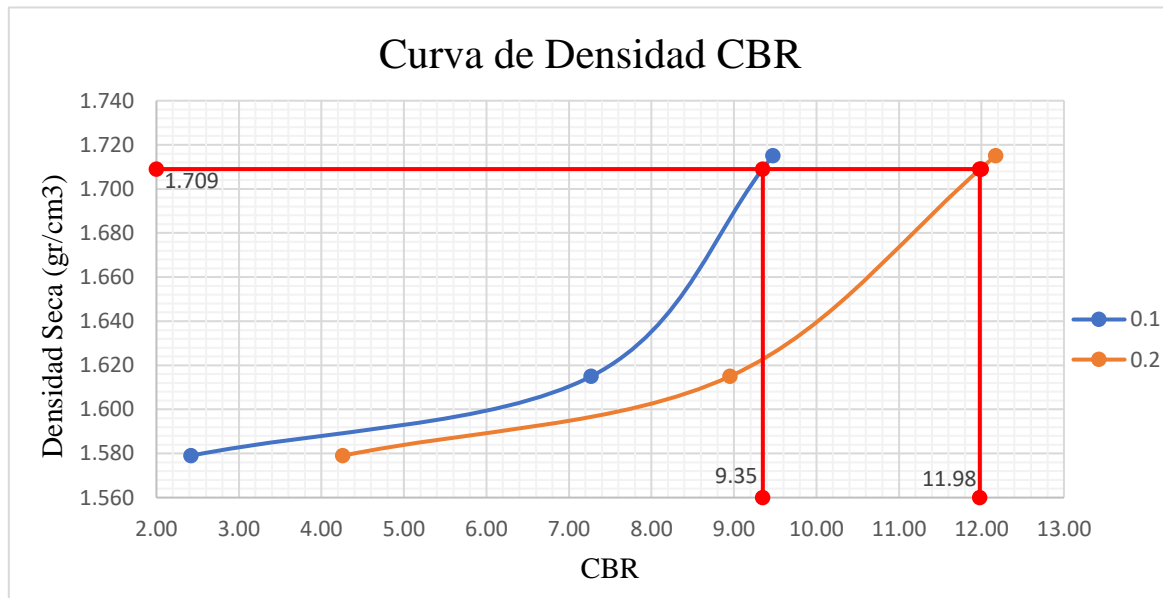


Figura 99. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.



Nota. En el gráfico se puede observar en las abscisas a la penetración que tiene el suelo en mm y como ordenadas al esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>), cada línea representa los golpes de compactación que tuvo la muestra antes de ser sometida a la penetración. Adaptación Propia [Gráfico], 2021.

Figura 100. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 2% de CMM.





Nota. El gráfico muestra la determinación del CBR al 100%, la línea azul y naranja indican 0.1” y 0.2” de penetración respectivamente, siendo la primera intersección con la línea roja (DMS), la que indicará el resultado de CBR. Adaptación Propia [Gráfico], 2021.

Tabla 85. Procesamiento de Datos – Ensayo de Compactación CBR usando energía modificada



en Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

 <p>Universidad Andina del Cusco Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil</p> 						
Título de Tesis:	"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"					
Ensayo:	Ensayo de CBR usando Próctor Modificado					
Ubicación:	Vía Expresa Cusco km 4+500					
Responsables:	Christian Alexander Delgado Rivera Victor Daniel Mormontoy Peñalba					
Descripción de Muestra:	Se usó Suelo Natural Arcillosos tomado de la Via Expresa km 04+500 + 5% de CAL + 3% de CMM					
Fecha de ensayo:	15/08/2021					
<p><u>MTC E 132 –CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</u></p>						
Datos						
Número de Golpes	12		25		56	
Diametro (cm)	15.286		15.286		15.242	
Altura de Molde (cm)	17.811		17.735		17.784	
Altura de Disco Espaciador (cm)	6.128		6.128		6.128	
<b>Volumen de Muestra Húmeda Compactada (cm<sup>3</sup>)</b>	2144.040		2130.09		2126.78	
Peso Molde + Base (gr)	7372.000		7342.00		7385.00	
Peso Molde + Base + Muestra con COH (gr)	11219.000		11392.00		11623.00	
<b>Peso Muestra Húmeda (gr)</b>	3847.000		4050.000		4238.000	
Densidad Húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.794		1.901		1.993	
Nombre del Recipiente	1	2	3	4	5	6
Peso de Muestra Húmeda + Tara (gr)	60.100	51.030	57.65	50.55	52.62	55.58
Peso de Muestra Seca + Tara (gr)	54.700	47.090	53.13	46.56	48.19	51.25
Peso del Agua (gr)	5.400	3.940	4.520	3.990	4.430	4.330
Peso del Recipiente (gr)	15.960	16.540	16.55	17.01	15.65	15.43
Peso de Muestra Seca (gr)	38.740	30.550	36.580	29.550	32.540	35.820
Contenido de Humedad Final (%)	13.94%	12.90%	12.36%	13.50%	13.61%	12.09%
Contenido de Humedad Promedio Final (%)	13.42%		12.93%		12.85%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.582		1.684		1.766	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 86. Procesamiento de Datos – Expansión para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL +



3% de CMM.

Tiempo Acumulado		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento		Dial	Hinchamiento	
Horas	Días	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%	*0.001"	mm	%
0	0	107	2.718	0.000	223	5.664	0.000	175	4.445	0.000
24	1	137	3.480	0.652	237	6.020	0.306	199	5.055	0.523
48	2	166	4.216	1.283	258	6.553	0.766	225	5.715	1.090
72	3	189	4.801	1.783	292	7.417	1.510	253	6.426	1.700
<b>96</b>	<b>4</b>	<b>191</b>	<b>4.851</b>	<b>1.826</b>	<b>301</b>	<b>7.645</b>	<b>1.707</b>	<b>254</b>	<b>6.452</b>	<b>1.722</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 87. Procesamiento de Datos – Penetración para CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

Penetración		Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3		
mm	pulg	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Dial	Carga (Kgf)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0.00	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000	0	0.000	0.000
0.64	0.025	6	2.852	0.148	6	2.852	0.148	5	0.000	0.000
1.27	0.050	11	32.756	1.701	12	38.734	2.011	15	56.659	2.942
1.91	0.075	15	56.659	2.942	20	86.512	4.492	27	128.259	6.659
<b>2.54</b>	<b>0.100</b>	<b>18</b>	<b>74.575</b>	<b>3.872</b>	<b>27</b>	<b>128.259</b>	<b>6.659</b>	<b>44</b>	<b>229.416</b>	<b>11.912</b>
3.18	0.125	20	86.512	4.492	34	169.951	8.824	52	276.909	14.377
3.81	0.150	23	104.411	5.421	40	205.644	10.677	60	324.332	16.840
<b>5.08</b>	<b>0.200</b>	<b>29</b>	<b>140.177</b>	<b>7.278</b>	<b>49</b>	<b>259.108</b>	<b>13.453</b>	<b>70</b>	<b>383.514</b>	<b>19.912</b>
6.35	0.250	32	158.045	8.206	56	300.629	15.609	78	430.783	22.367
7.62	0.300	35	175.903	9.133	62	336.177	17.455	85	472.088	24.511
10.16	0.400	39	199.698	10.369	72	395.338	20.526	101	566.309	29.403
12.70	0.500	46	241.296	12.528	83	460.292	23.899	110	619.193	32.149

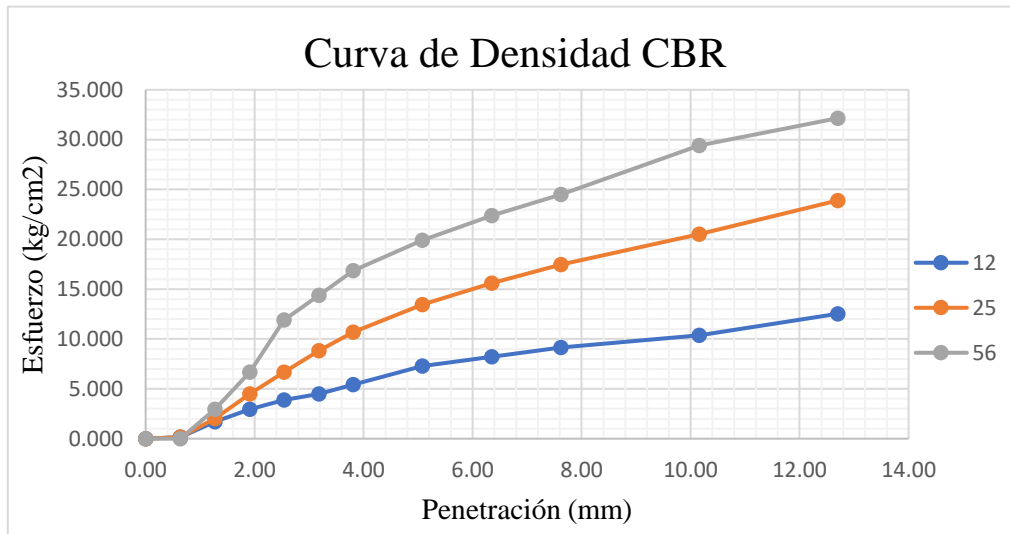
Área de pisón:	19.26 cm <sup>2</sup>
----------------	-----------------------

Pulg	%CBR		
	M1	M2	M3
0.1	5.51	9.47	16.94
0.2	6.90	12.76	18.88
D.S.M. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.582	1.684	1.766

C.B.R. 0.1" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	12.84%
C.B.R. 0.2" Para el 100% de Densidad Máxima Seca	15.75%

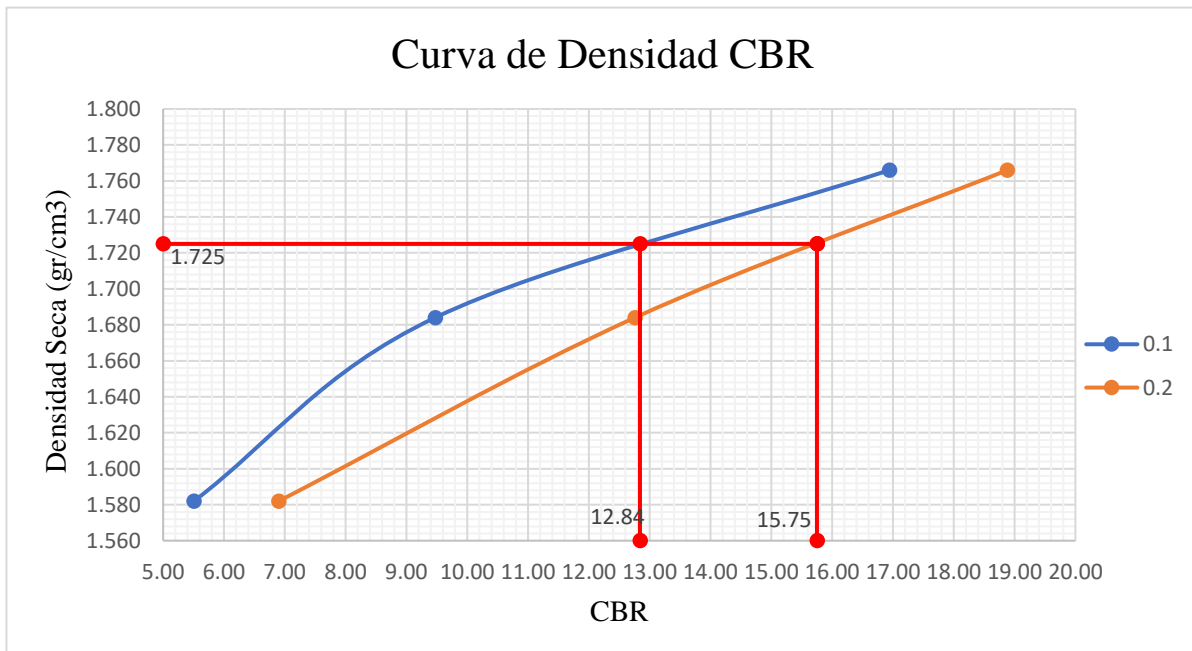
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 101. Gráfico de Curva de Esfuerzo vs Penetración de CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.**



Nota. En el gráfico se puede observar en las abscisas a la penetración que tiene el suelo en mm y como ordenadas al esfuerzo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), cada línea representa los golpes de compactación que tuvo la muestra antes de ser sometida a la penetración. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

**Figura 102. Gráfico de Curva de Densidad Seca vs CBR de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.**



Nota. El gráfico muestra la determinación del CBR al 100%, la línea azul y naranja indican 0.1" y 0.2" de penetración respectivamente, siendo la primera intersección con la línea roja (DMS), la que indicará el resultado de CBR. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



### 3.6.8.3. Análisis del Ensayo

Se obtuvo una mejora significativa en el CBR, al agregar los aditivos estabilizantes al suelo natural tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco. Pasando de categoría según el MTC (2016) de “Subrasante Pobre” a “Subrasante Buena” al agregarse 5% de CAL + 3% de CMM.

Tabla 88. Categorías de Subrasante según el MTC.

Categorías de Subrasante	CBR
S <sub>0</sub> : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones)

En la siguiente tabla (tabla 89) se puede apreciar un resumen de los resultados de CBR y Expansión, con los aditivos estabilizadores en diferentes porcentajes.

Tabla 89. Resumen de resultados de Ensayo de CBR y Expansión.

Ensayos	CBR (%)		Expansión		
	0.1"	0.2"	12 golpes (4 días)	25 golpes (4 días)	56 golpes (4 días)
Muestras					
Suelo Natural	4.02	5.31	3.127%	3.173%	3.203%
SN + 5% CAL	4.61	6.88	2.244%	2.328%	2.512%
SN + 5% CAL + 1% CMM	5.13	8.45	2.397%	2.524%	2.599%
SN + 5% CAL + 2% CMM	9.35	11.98	2.228%	1.915%	2.309%
SN + 5% CAL + 3% CMM	12.84	15.75	1.826%	1.707%	1.722%

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la tabla 86 el CBR del suelo natural se incrementó en un promedio de 300% respecto al CBR del suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM; también se puede apreciar que el suelo aumenta su CBR a medida que el porcentaje de CMM se incrementa como aditivo secundario.



Por otro lado, podemos observar que, el potencial de expansión del suelo natural se redujo respecto al suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM considerablemente, sin embargo, el suelo natural estabilizado con 5% de CAL + 1% aumentó ligeramente el potencial de expansión del suelo arcilloso respecto a la estabilización con cal.



## CAPITULO IV

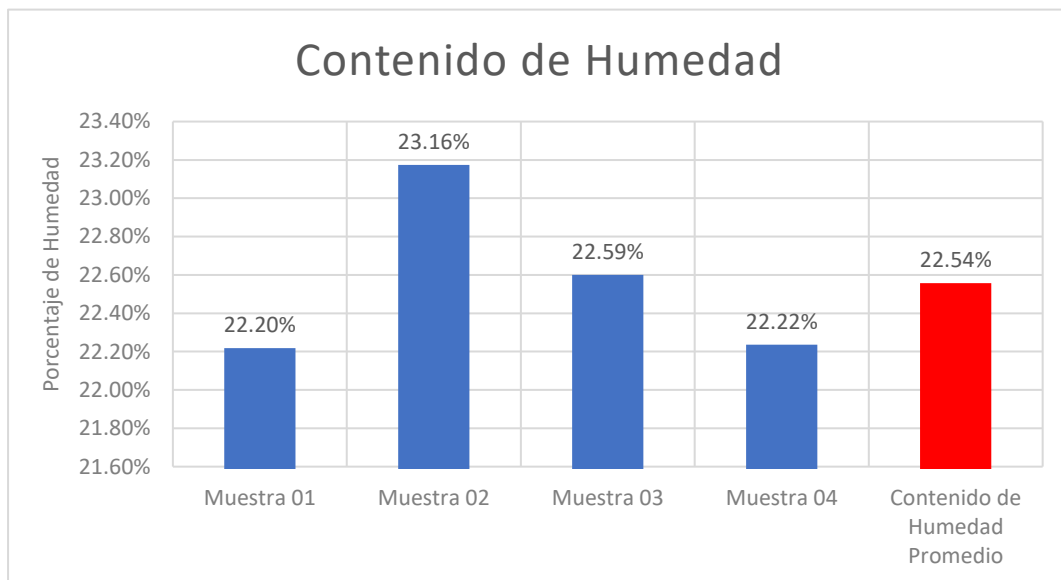
### 4. Resultados

#### 4.1. Resultado de los ensayos.

##### 4.1.1. Ensayo de Contenido de Humedad

De acuerdo a los ensayos realizados para determinar el contenido de humedad natural del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, se pudo determinar que el contenido de humedad es de 22.54%, siendo este un porcentaje promedio de cuatro muestras ensayadas.

**Figura 103. Contenido de Humedad Promedio del Suelo.**



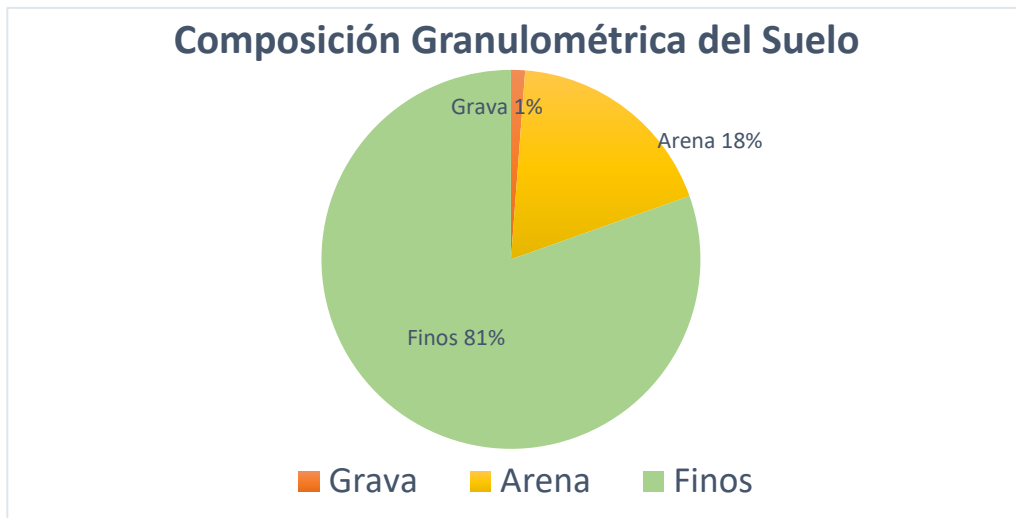
Nota. El contenido de humedad resultante es el promedio de 4 muestras ensayadas, siendo representado gráficamente como el rectángulo rojo. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

##### 4.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado y mediante Hidrómetro.

El suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, mediante el ensayo de “Análisis Granulométrico por Tamizado”, presenta en su gran mayoría contenido de finos y muy poco contenido de gravas, los cuales son característicos de los suelos arcillosos, los porcentajes se detallan a continuación:

- Gravas: 1%
- Arenas: 18%
- Finos: 81%

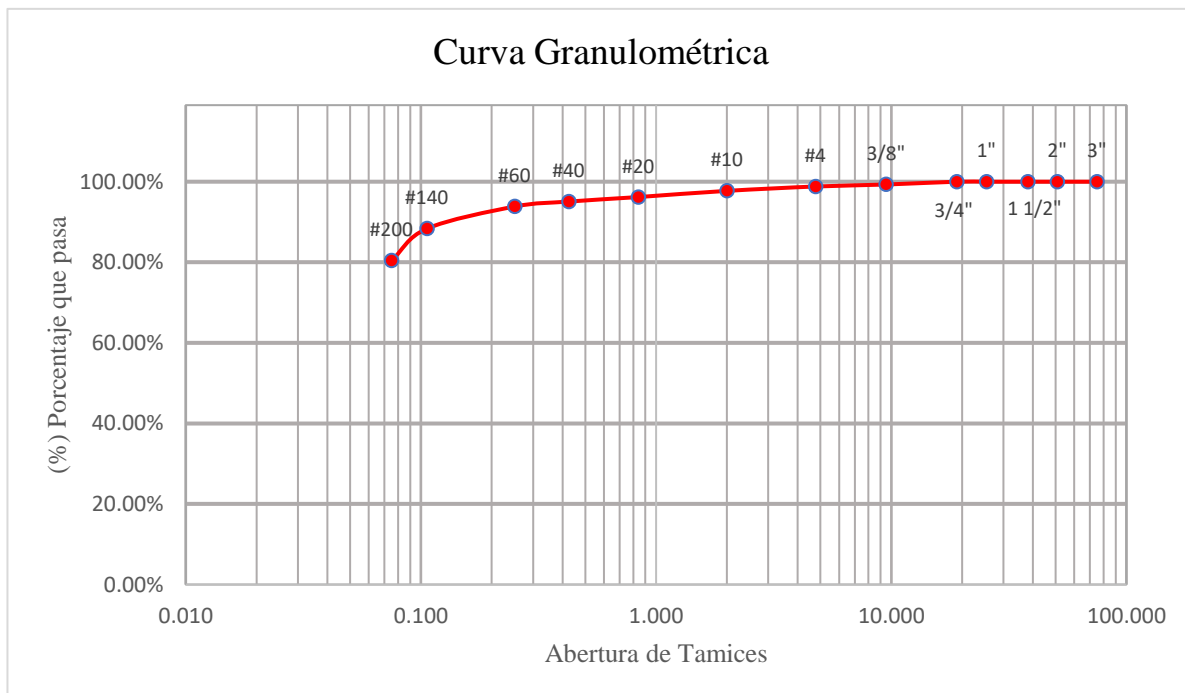
**Figura 104. Composición Granulométrica del suelo.**



Nota. El resultado de la granulometría por tamizado nos indica que, con alto contenido de finos, los cuales son característicos de los suelos arcillosos. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Por otro lado, al graficar la curva granulométrica, se pudo observar que al ser suelo con gran cantidad de material fino no presentará  $D_{60}$ ,  $D_{30}$ , y  $D_{10}$ , por lo que no se podrá determinar el Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Concavidad del Suelo. También se determinó que el Tamaño Máximo Nominal (TMN) es  $3/8''$  y el Tamaño Máximo Absoluto (TMA) es de  $3/4''$ .

**Figura 105. Curva Granulométrica del Suelo.**



Nota. La línea roja nos indica la curva granulométrica que tiene el material ensayado, en el gráfico tenemos en las abscisas a la abertura de los tamices, y como ordenadas tenemos el





porcentaje de material que pasa por cada tamiz, podemos evidenciar la gran cantidad de material fino que se posee. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Respecto al análisis granulométrico del material fino (material que paso la malla #200 en la granulometría por tamizado), determinamos que el suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, tiene un 56% de partículas arcillosas y un 44% de partículas limosas.

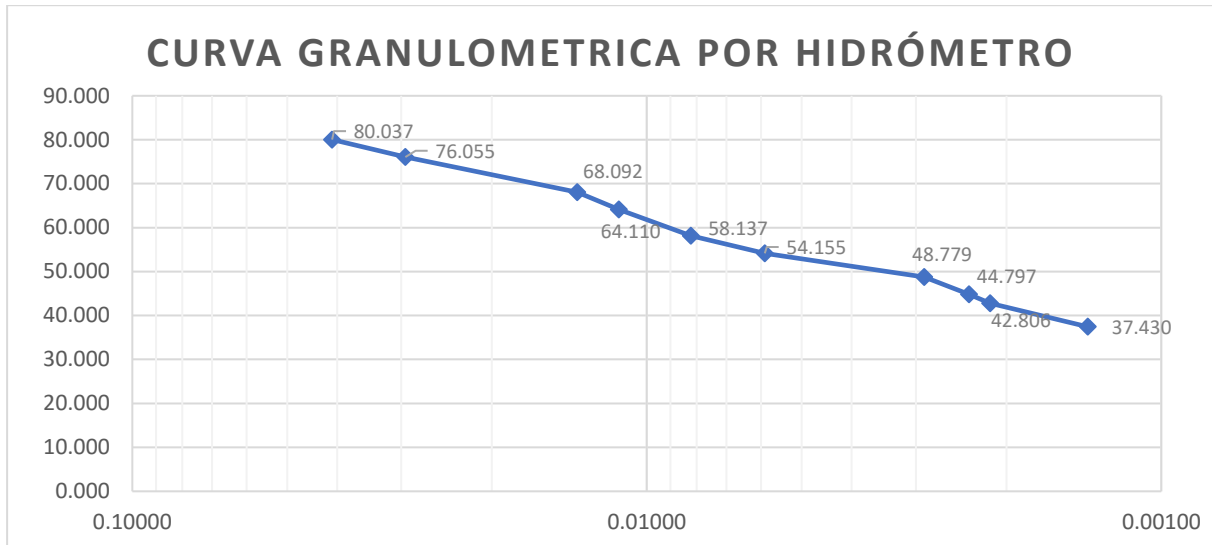
**Figura 106. Resultados del ensayo de granulometría por hidrómetro.**



Nota. Se representa el 100% del material fino que pasó la malla #200 del ensayo de granulometría por tamizado, teniendo como resultado 56% de arcillas y 44% de limos. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



Figura 107. Curva granulométrica de granulometría por hidrómetro.



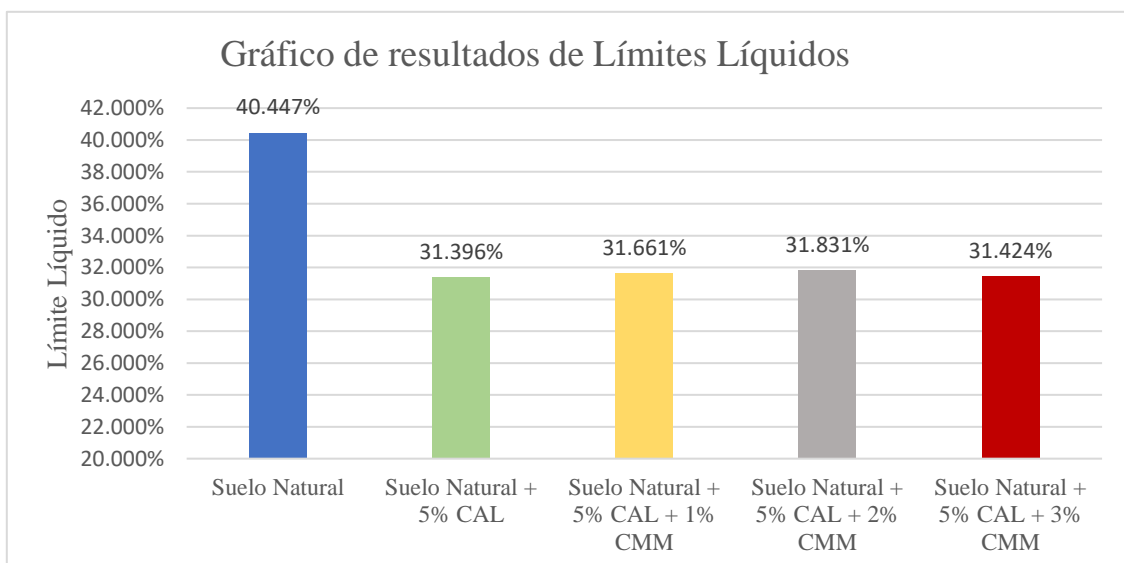
Nota. Se califica como arcillas al material con diámetro menor a 0.002 mm. Adaptación Propia [Gráfico], 2021.

#### 4.1.3. Determinación del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP), e Índice de Plasticidad (IP)

##### 4.1.3.1. Límite Líquido

Mediante los ensayos realizados se pudo determinar que el Límite Líquido del suelo natural es de 40.44%, el cual se ve reducido al agregar los aditivos estabilizantes como se puede observar en el siguiente gráfico (Figura 108):

Figura 108. Resultados del ensayo de Límite Líquido.



Nota. Al agregar los aditivos estabilizantes, el límite líquido se ve reducido respecto al suelo natural, sin embargo, este porcentaje se mantiene similar con todas las dosificaciones



propuestas en la investigación. Un límite líquido bajo, nos ayudará a tener un mejor índice plástico. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

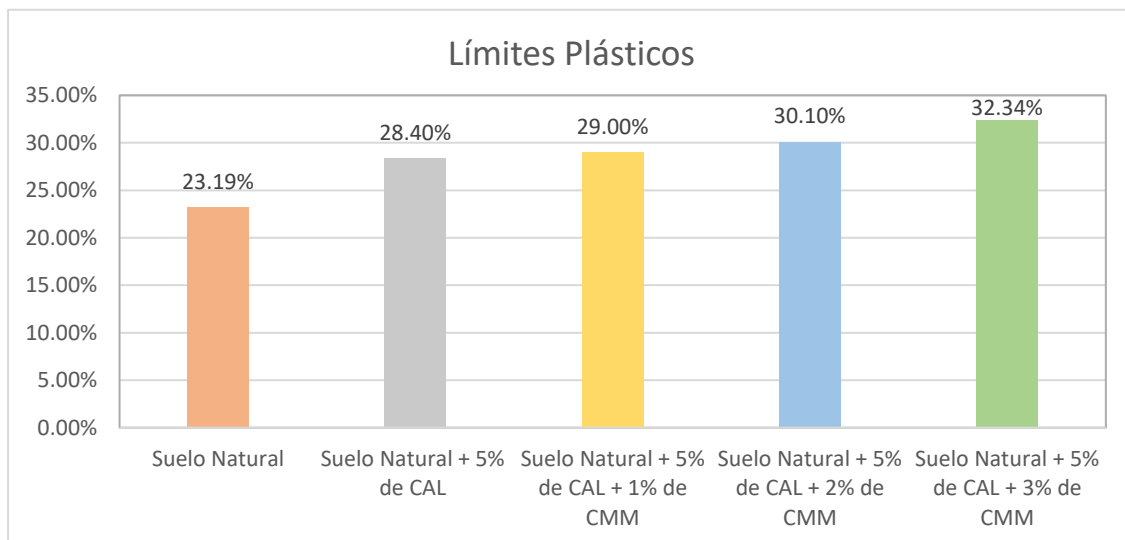
El suelo que presenta el menor límite líquido es el Suelo Natural + 5% de Cal, sin embargo, al agregar CMM a la estabilización, los límites líquidos se mantienen en un promedio de 31.64%. Un límite líquido alto tendrá influencia negativa al determinar las características del suelo para una subrasante adecuada, por lo que, del presente ensayo se asume que las mejores condiciones del respecto al Límite Líquido son el suelo natural + 5% de CAL y el suelo natural +5% de Cal + 3% de CMM.

#### 4.1.3.2. Límite Plástico

El límite plástico del suelo natural es de 27.81%, la alta plasticidad es una de sus características principales en un suelo arcilloso, y esta propiedad plástica se ve mejorada al agregar los aditivos estabilizadores, especialmente al agregar 5% de CAL + 3% de CMM al suelo natural, teniendo un límite plástico de 32.34%, aumentando en 4.53% respecto al suelo natural y en 3.94% respecto al suelo estabilizado únicamente con 5% de CAL.

En el siguiente gráfico (Figura 109) se pudo observar los resultados de los ensayos de Límite Plástico que se hicieron en la presente investigación:

**Figura 109. Resultados de los ensayos de límite Plástico.**

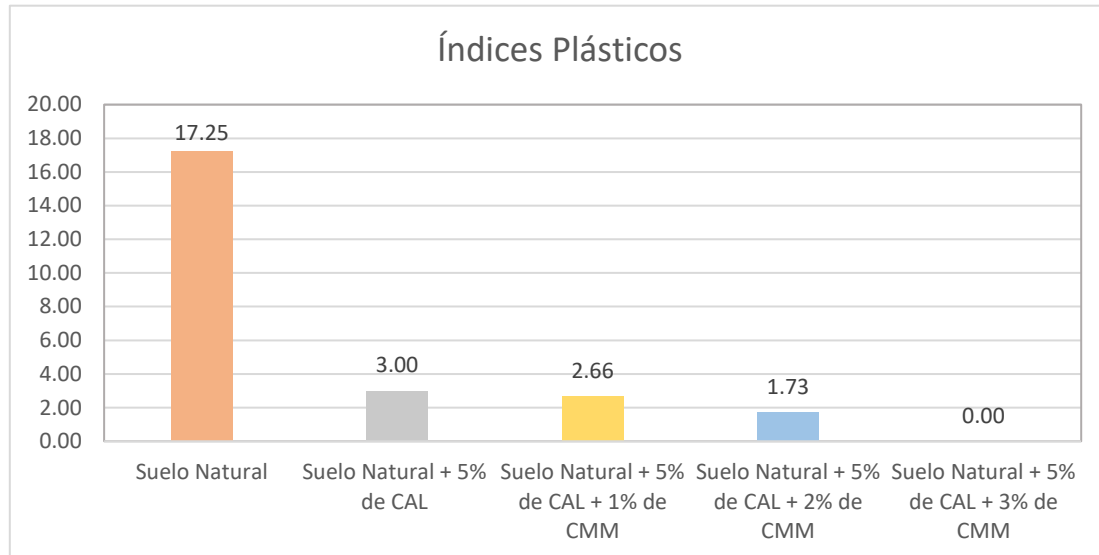


Nota. Como se observa en la figura, el límite plástico tiene una mejoría progresiva respecto al suelo natural, el cual tendrá una incidencia positiva al determinar el Índice de Plasticidad. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

#### 4.1.3.3. Índice de Plasticidad

Los índices de plasticidad según los resultados obtenidos se redujeron significativamente respecto al suelo natural, como se aprecia en el siguiente gráfico:

**Figura 110. Resultados de Índices de Plasticidad.**



Nota. Se puede apreciar que el índice de plasticidad se ve reducido progresivamente, el cual es un indicativo de mejora de capacidad portante. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Como se puede observar en la figura 110 el suelo natural posee un Índice de Plasticidad elevado, siendo 17.25, el cual es característico de los suelos arcillosos, y clasificándolo como un suelo de media plasticidad, según la tabla 6; así mismo, el suelo en condiciones más óptimas, al no presentar índice de plasticidad es el suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM.

Tabla 90. Resultados de Límite Líquido, Límite Plástico, e Índice de Plasticidad.

Ensayos			
Muestras	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Suelo Natural	40.44%	23.19%	17.25%
SN + 5% CAL	31.40%	28.40%	3.00%
SN + 5% CAL + 1% CMM	31.66%	29.00%	2.66%
SN + 5% CAL + 2% CMM	31.83%	30.10%	1.73%
SN + 5% CAL + 3% CMM	31.42%	32.34%	NP

Fuente: *Elaboración Propia*.

Al observar la tabla 90, se determina que las mejores condiciones que presenta la muestra ensayada, están en con la dosificación de Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM.



#### 4.1.4. Clasificación de Suelos

Tabla 91. Resumen de la clasificación del suelo según metodologías AASHTO y SUCS

CLASIFICACIÓN DEL SUELO NATURAL	
Metodología AASHTO	Metodología SUCS
A-7-6(14)	CL
El índice de grupo sugiere que es un suelo arcilloso.	Arcilla de baja plasticidad

Fuente: *Elaboración propia*

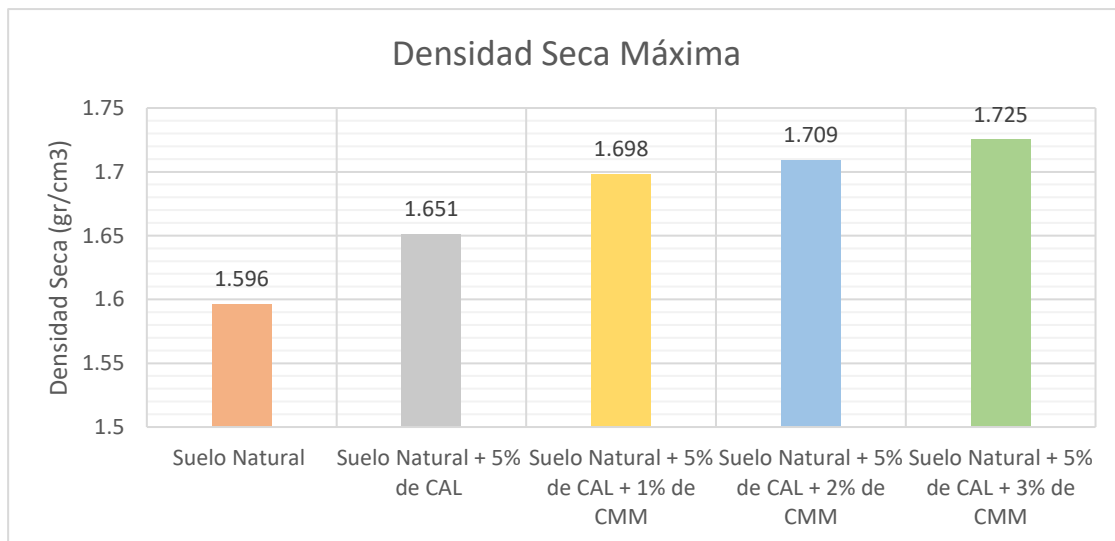
Según la metodología AASHTO, el suelo analizado de las diferentes calicatas procedentes de la Vía Expresa- San Sebastián, se considera como un suelo regular a malo, según el grupo en el que se encuentra (A-4, A-5, A-6, A-7).

#### 4.1.5. Compactación de Suelos en Laboratorio (Proctor Modificado)

Con los ensayos realizados se pudo determinar que, el comportamiento del suelo natural respecto a la densidad seca, es muy favorable al estabilizarlo con cal y ceniza de mazorca de maíz, siendo la densidad máxima seca del suelo natural  $1.596 \text{ gr/cm}^3$  y un contenido de humedad óptimo de 17.45%.

La densidad máxima seca del suelo natural agregado con 5% de CAL tiene un valor de  $1.651 \text{ gr/cm}^3$ , la cual comienza a subir, ser más consistente, a medida que se agrega la ceniza de mazorca de maíz llegando a un valor máximo de  $1.725 \text{ gr/cm}^3$ , con suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM y un contenido de humedad óptimo de 15.10%.

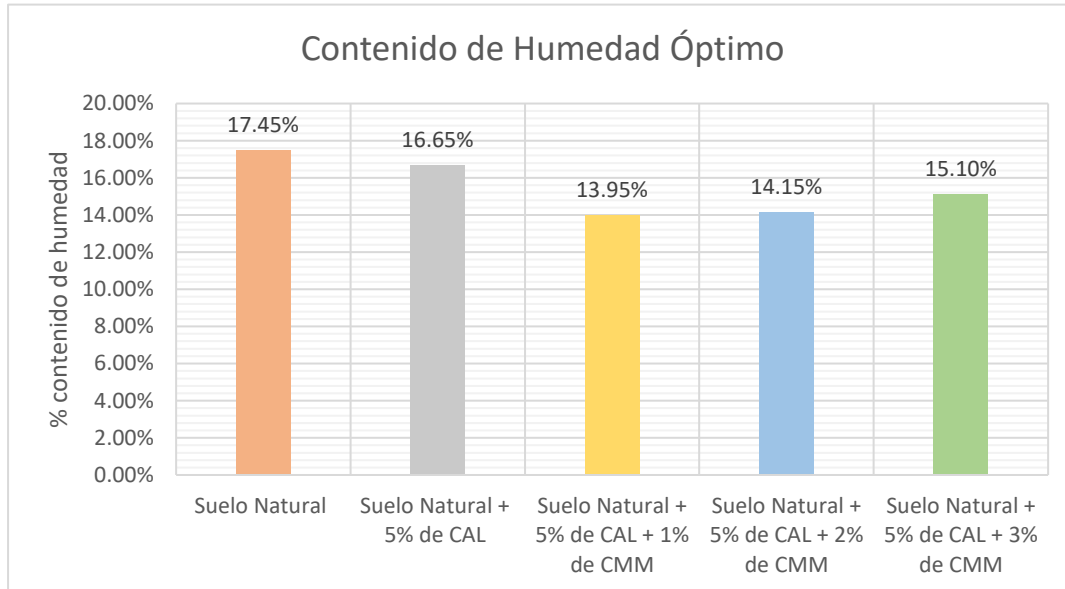
Figura 111. Densidades Secas Máximas del ensayo de Proctor Modificado.



Nota. Se puede apreciar en la figura la mejora de densidad seca que tiene el suelo natural con

los diferentes porcentajes de aditivos estabilizadores, llegando a tener condiciones más óptimas. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

**Figura 112. Contenidos de humedad Óptimos del ensayo de Proctor Modificado.**



Nota. Los suelos arcillosos alcanzan la máxima densidad seca con un contenido de humedad alto. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Respecto a los contenidos de humedad óptimos, como se aprecia en la figura 112, estos varían entre 13% y 18%, dado que al usar un suelo arcilloso estos requieren un contenido de humedad mayor. Al agregar CMM, el contenido de humedad óptimo se reduce respecto a los porcentajes de del suelo natural y del suelo natural + 5% de CAL.

A continuación, se muestra un resumen de los resultados de los ensayos hechos de Compactación de Suelos en Laboratorio (Proctor Modificado) en la presente investigación:

Tabla 92. Resumen de los resultados de los ensayos Proctor Modificado.

Ensayos	Proctor	
	Densidad Seca Máxima	Humedad Óptima (%)
Muestras		
Suelo Natural	1.596	17.45%
SN + 5% CAL	1.651	16.65%
SN + 5% CAL + 1% CMM	1.698	13.95%
SN + 5% CAL + 2% CMM	1.709	14.15%
SN + 5% CAL + 3% CMM	1.725	15.10%

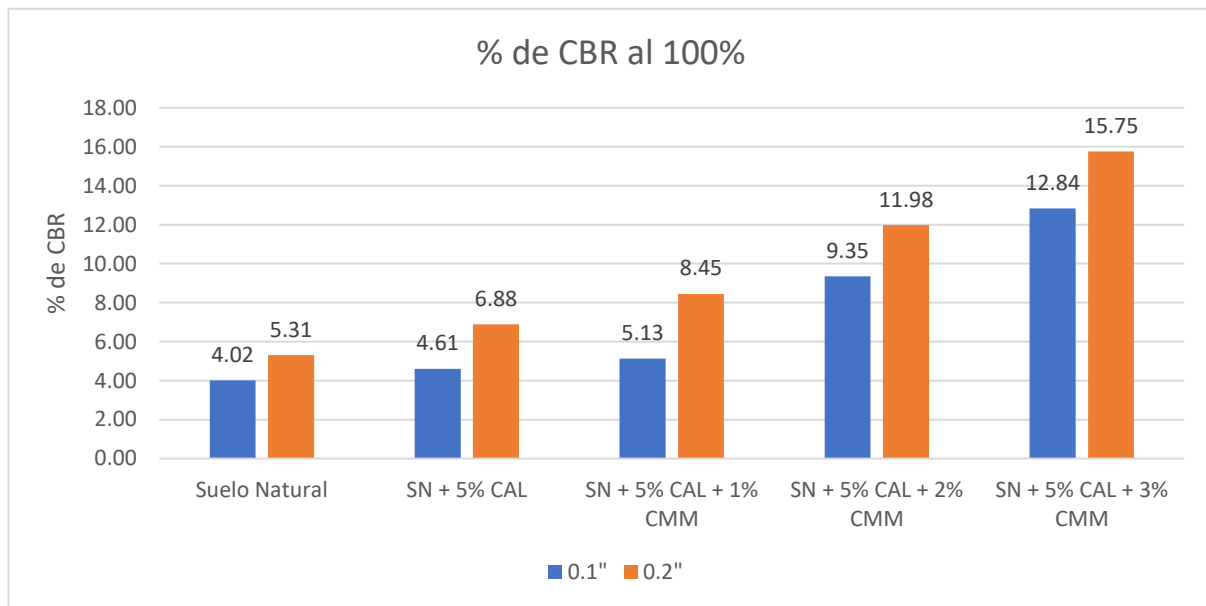
Fuente: *Elaboración Propia*.



#### 4.1.6. Ensayo de CBR en Laboratorio

Al determinar la capacidad de soporte CBR, en la presente investigación, se pudo apreciar un patrón de mejora significativo al agregar los aditivos estabilizadores. Los porcentajes de CBR al 100%, fueron medidos al 0.1” y 0.2” de penetración. Según ASTM se reporta como resultado a 0.1” de penetración siempre y cuando este valor sea menor al resultado de 0.2” de penetración, sin embargo, para fines de la presente investigación representaremos ambos resultados en el siguiente gráfico para tener un mejor contraste de resultados.

**Figura 113. Diagrama de porcentajes de CBR al 100%.**



Nota. Mediante el ensayo de CBR podemos determinar la capacidad resistente del suelo a nivel de subrasante y así poder categorizarlo, en el gráfico podemos ver el CBR al 0.1” y 0.2” de penetración para cada dosificación de suelo. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.

Como se puede ver en la Figura 113, el porcentaje de CBR del suelo natural es de 4.02% y el porcentaje de CBR del Suelo Natural + 5% de CAL es de 4.61%, lo cual, según la tabla de categorías de subrasante, nos indica que son subrasantes pobres. También el suelo natural + 5% de CAL + 2% de CMM presente un CBR de 9.35%, por lo cual, se categoriza como una subrasante regular, al no llegar a 10% para ser una subrasante buena; sin embargo, en la muestra de suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM, se tiene un CBR de 12.84%, con el cual la podemos categorizar como subrasante buena, evidenciando una clara mejoría.



Tabla 93. Resumen de ensayo de CBR.

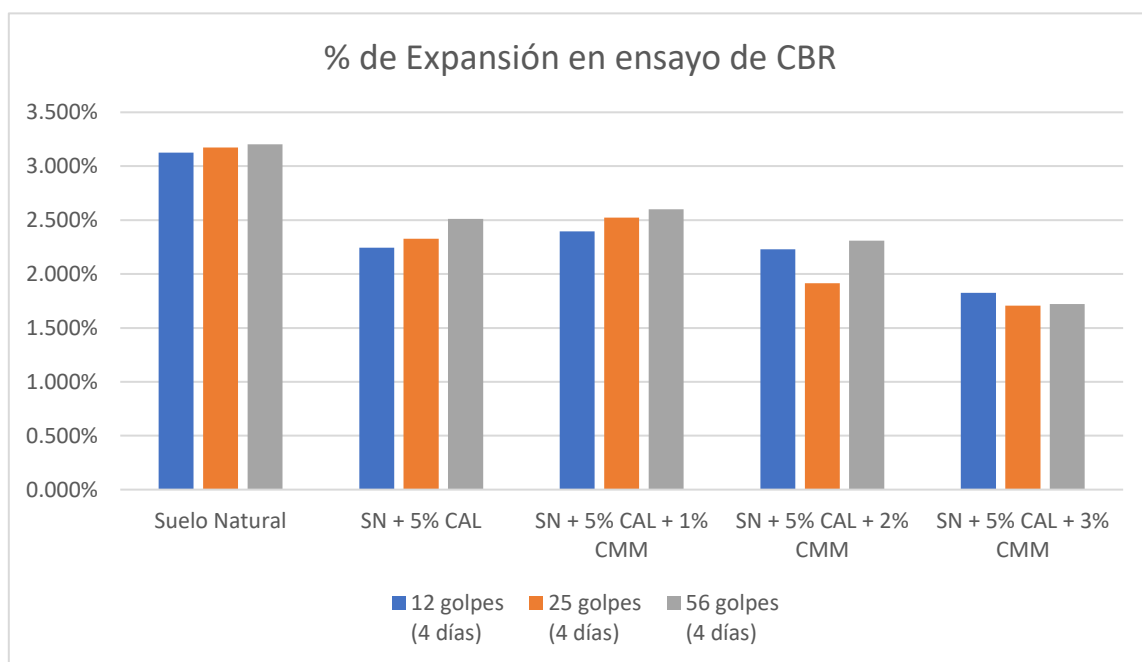
Ensayos	CBR (%) al 100%	Densidad Máxima Seca (gr/cm <sup>3</sup> )
Muestras	0.1"	
Suelo Natural	4.02	1.596
SN + 5% CAL	4.61	1.651
SN + 5% CAL + 1% CMM	5.13	1.698
SN + 5% CAL + 2% CMM	9.35	1.709
SN + 5% CAL + 3% CMM	12.84	1.725

Fuente: Elaboración Propia.

Respecto a la expansión, los valores fueron analizados a los 4 días (96 horas), donde se puede apreciar una reducción de la expansibilidad en la muestra de suelo natural estabilizado con 5% de CAL + 3% de CMM con un valor de 1.722%, respecto a la expansibilidad suelo natural que es de 3.203%, teniendo una evidente mejora, sin embargo, la mejora no es tan significativa al estabilizar el suelo natural con 5% de CAL + 2% de CMM, ya que el porcentaje de expansión fue de 2.309%.

Por otro lado, no se ven mejoras en la expansibilidad del suelo natural en las dosificaciones de: suelo natural + 5% de CAL y suelo natural + 5% de CAL + 1% de CMM, ya que el porcentaje de expansión al añadir CMM se incrementa ligeramente.

Figura 114. Porcentajes de expansión en CBR a los 4 días.







Nota. Los suelos arcillosos tienen una gran capacidad de expansión en contacto con el agua, por lo que se busca reducir el hinchamiento de estos suelos al estabilizarlos; en el gráfico podemos apreciar que la expansión de estos suelos se ve reducida considerablemente respecto al suelo natural. Adaptación *Propia* [Gráfico], 2021.



## CAPITULO V

### 5. Discusión

a) Contraste de resultados con referentes al marco teórico.

**¿El suelo natural arcilloso encontrado en la Vía Expresa de Cusco, es un material que necesita una estabilización para mejorar sus propiedades físico – mecánicas a nivel de subrasante?**

Si, debido a que el suelo natural de la Vía Expresa, es un suelo arcilloso con propiedades físico – mecánicas muy pobres, las cuales quedan evidenciadas en los ensayos de suelo natural de la presente investigación. Por otro lado, al analizar la categoría de la subrasante según el “Manual de Ensayos” del MTC (2016), se categoriza como una subrasante pobre, que, según la “NTP C.E.010 Pavimentos Urbanos” y “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” al no llegar como mínimo al 6% de CBR y ser considerada como subrasante pobre necesitará un mejoramiento (estabilización).

**¿El suelo natural arcilloso de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con 5% de CAL, tiene las propiedades físico – mecánicas suficientes para ser usado a nivel de subrasante?**

No, ya que tiene un CBR que es considerado como subrasante pobre al ser inferior al 6%, por lo que, queda evidenciado en la presente investigación que, no necesariamente estabilizar un suelo arcilloso con Cal, mejorará lo suficiente las propiedades físico – mecánicas del suelo para ser apto en el uso de la subrasante. Por otro lado, agregar más porcentaje de cal no influenciará en las propiedades físico – mecánicas de manera positiva, ya que, el suelo arcilloso de la Vía Expresa llega a un equilibrio catiónico con 5% de Cal, por lo que, todo porcentaje de cal agregado por encima de 5%, mantendrá las mismas propiedades.

**¿De qué manera influye la adición de Cal y Ceniza de Mazorca de maíz a las propiedades físico -mecánicas del suelo?**

La cal es un aditivo estabilizador de uso frecuente y uno de los más eficaces para suelos arcillosos y limosos debido a los compuestos químicos que contiene; la ceniza de mazorca de maíz, es un derivado de las cenizas volantes, al poseer gran cantidad de Calcio, Sílice, Aluminio y Magnesio, las cuales, son materiales potenciales para la mejora de suelos arcillosos, debido a las reacciones individuales de los componentes químicos con las



partículas de las arcillas. Ambos aditivos, actúan de manera complementaria entre sí, generando una mejora más significativa de las propiedades del suelo.

### **¿Cómo se determinó los porcentajes de Cal y Ceniza de Mazorca de Maíz?**

Primero, se determinó el porcentaje de cal mediante un ensayo preliminar en base al intercambio catiónico, medido a partir del pH, siendo 5% el porcentaje óptimo para el suelo arcilloso de la Vía Expresa. Segundo, los porcentajes de ceniza de mazorca de maíz se determinaron, en base a la NTP C.E.020 “Estabilización de Suelos y Taludes”, donde nos indica que, el máximo porcentaje de aditivo, para una estabilización con Cal debe ser 8%, y la ceniza de mazorca de maíz al ser un aditivo estabilizador secundario no debe exceder porcentaje del primario (5% de cal), por lo que para motivos de la investigación se optó por 1%, 2% y 3% de Ceniza de Mazorca de Maíz.

### **¿La clasificación de suelo cambia, al ser estabilizada con cal y ceniza de mazorca de maíz, respecto al suelo natural?**

Al añadir ceniza de mazorca de maíz y cal en diferentes porcentajes, la granulometría del suelo no se ve afectada ya que los estabilizantes utilizados pasan por el tamiz N°200; solo se verá afectada los límites de consistencia que las mezclas pueden presentar.

Según la metodología SUCS pasa de ser una arcilla de baja compresibilidad (CL) a un limo de baja compresibilidad (ML); según la metodología AASHTO el suelo natural se clasifica con un suelo A-7-6 con un índice de grupo 14, mientras que las diferentes combinaciones del suelo natural con cal y CMM tienen características de un suelo A-4 con un índice de grupo 9 y esto sugiere que es un suelo limoso.

### **¿Cuáles son los principales componentes químicos de la ceniza de mazorca de maíz obtenida de Pillpinto, y cuáles son los más beneficiosos para la estabilización del suelo arcilloso tomado del a Vía Expresa de Cusco?**

Para determinar la composición química de la ceniza de mazorca de maíz, se hizo un estudio químico preliminar, que dio los siguientes resultados.



Figura 115. Ensayo de composición química de la CMM de Pillpinto.



Nota. Composición mineralógica de la ceniza de mazorca de maíz usada en la presente investigación. Adaptación *Propia* [Imagen], 2021. Unidad de prestaciones deservicio de análisis químico- departamento académico de química -UNSAAC.

### ¿Qué costo representó la obtención de ceniza de mazorca de maíz para la presente investigación?

Partida	01.01.01	Empaquetado de mazorca de maíz en costal de polipropileno					
Rendimiento	m3/día	EQ.	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Codigo	Descripcion Recurso						
	Materiales						
0001	COSTAL DE POLIPROPILENO		und		8.000	1.00	8.00
Partida	01.01.01	Traslado de mazorca de maíz y equipo tecnico (cusco - pillpinto - cusco)					
Rendimiento	m3/día	EQ.	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Codigo	Descripcion Recurso						
	Equipos						
0002	CAMIONETA 4x4		hm		12.000	8.56	102.74
						<b>Total S/.</b>	<b>110.74</b>

La obtención de la ceniza de mazorca de maíz para fines de la presente investigación tuvo un costo de S/. 110.74 soles, teniendo como resultado 10 kg de CMM. En ese sentido, podemos asumir que, el mayor costo se ve reflejado en el alquiler de camioneta para el traslado del material.



**¿Qué costo representa la estabilización de suelos arcillosos para 1m<sup>2</sup> usando 5% de Cal y 3% de Ceniza de Mazorca de Maíz?**

Es importante definir que los costos que representan la realización de CMM para fines de investigación y para fines de una posible estabilización aplicada en una obra vial, tienen características diferentes, ya que son escenarios completamente distintos, por tanto, a continuación, podemos observar un Análisis de Costos Unitarios para la realización de CMM.

Consideramos en este análisis, el costo jornal de un peón, así mismo, los insumos necesarios para la realización de esta partida, el costo de los residuos de Maíz (al ser un material reciclado) es de cero soles, el costo de los costales que almacenan 10 kg es de 1 sol, y consideramos un 3% del costo de mano de obra para las herramientas necesarias.

ANALISIS DE COSTO UNITARIO							
Tesis: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Especificaciones: Fabricación de Ceniza de Mazorca de Maíz							
Cuadrilla: 1 peón							
Rendimiento: 10 kg/día							
Fecha: 31/12/2021				Unidad: kg		Costo Unitario:	<b>6.88</b>
Descripción	Und	Cuad.	Cant.	P.U.	P.P.	P.T.	%
<b>MANO DE OBRA</b>							
Peón	HH	1	0.8	8.23	6.584		
Costo de mano de obra						6.584	0.957
<b>MATERIALES</b>							
Residuos de Maíz (marlo)	Kg		10	0.00	0.00		
Costal	Und		0.1	1.00	0.10		
Costo de Materiales						0.10	0.015
<b>MAQUINARIA HERRAMIENTA Y/O EQUIPOS</b>							
Herramientas	% MO		3	6.584	0.198		
Costo de Maquinaria y/o Equipos						0.198	0.029
<b>TOTAL</b>						<b>6.88</b>	

Después de realizar el análisis de costo unitario para la realización de CMM en una estabilización de suelos, podemos determinar que cada kg tiene un costo de 6.88 soles.

Ahora procedemos a realizar un análisis comparativo de costos, para una estabilización de suelos arcillosos, usando la dosificación de suelo natural + 5% de Cal, y una estabilización de suelo natural + 5% de Cal +3% de CMM, ya que esta última dosificación obtuvo los resultados más favorables según la investigación.



- Suelo natural + 5% de Cal.

ANALISIS DE COSTO UNITARIO							
Tesis: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Especificaciones: Estabilización de Suelo con Cal al 5% e= 0.30 m							
Fecha: 31/12/2021		Unidad: m2		Costo Unitario:		<b>19.95</b>	
Descripción	Und	Cuad.	Cant.	P.U.	P.P.	P.T.	%
<b>MATERIALES</b>							
Cal hidráulica Martell	Kg		23.94	0.83	19.95		
Costo de Materiales						19.95	
TOTAL						19.95	100%

- Suelo natural + 5% de Cal + 3% de CMM.

ANALISIS DE COSTO UNITARIO							
Tesis: "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON ADICIÓN DE CENIZA DE MAZORCA DE MAÍZ Y CAL"							
Especificaciones: Estabilización de Suelo con Cal al 5% + 3% CMM e= 0.30 m							
Fecha: 31/12/2021		Unidad: m2		Costo Unitario:		<b>111.78</b>	
Descripción	Und	Cuad.	Cant.	P.U.	P.P.	P.T.	%
<b>MATERIALES</b>							
Cal hidráulica Martell	Kg		22.53	0.83	18.78		
Ceniza de Mazoca de Maiz 3%	kg		13.52	6.88	93.00		
Costo de Materiales						111.78	
TOTAL						111.78	100%

Se puede observar que el agregar CMM a la estabilización aumenta significativamente el costo, sin embargo, es imperativo recalcar que las cenizas volantes obtenidas de la mazorca de maíz, no son un material de construcción industrializado, por ende, su adquisición es considerablemente más alta que la cal hidratada. En ese sentido, las cenizas volantes al ser un material relativamente nuevo en el mercado de materiales de construcción en el Perú, y al mismo tiempo tener un gran potencial como aditivo estabilizador, se podría considerar eventualmente su fabricación a escala industrial, lo que reduciría el costo de fabricación en gran medida.

b) Interpretación de los resultados encontrados en la investigación.

**¿Cuál es la dosificación óptima de Cal y Ceniza de Mazorca de Maíz, en la que, se ven las mejoras de las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso?**

Según los ensayos realizados en la presente investigación, se observa los mejores resultados en general, con Suelo Natural + 5% de CAL + 3% de CMM, especialmente por



el CBR, dado que es 319% más que el CBR del Suelo Natural, por lo que se recategoriza como una subrasante buena al estar entre 10% y 20%.

- c) Comentario de la demostración de la hipótesis.

**¿La hipótesis fue modificada a lo largo de la investigación?**

A lo largo de la presente investigación se pudo demostrar satisfactoriamente, lo solicitado en la hipótesis, ya que cumple con las mejoras propuestas en todos los ensayos realizados, por lo que no fue modificada. Se cumplió con una mejora progresiva, a medida que se aumentó la ceniza de mazorca de maíz en los ensayos.

**¿La densidad del suelo disminuye al aplicar la ceniza de mazorca de maíz?**

Si bien es cierto, la ceniza de mazorca de maíz, al igual que cualquier tipo de ceniza volante, presenta un volumen considerablemente mayor a su peso, esto no generará que el suelo estabilizado pierda densidad, ya que, al ser mezclado con cal y agua en cantidades óptimas, reaccionará de manera que tendrá una atracción de partículas mayor (debido a los compuestos químicos positivos que posee,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ ) con las partículas del suelo, por ende, tendrá menor índice de vacíos.

**¿Es posible aplicar ambos aditivos estabilizantes propuestos en la presente investigación (cal y ceniza de mazorca de maíz), en cualquier tipo de suelo arcilloso?**

La presente investigación fue realizada netamente con un material arcilloso de muy baja calidad, por lo que aplicarlo a otros suelos arcillosos es factible, al ver el potencial de mejora que tienen. Sin embargo, es imperativo determinar el porcentaje correcto de cal para poder complementarlo con la ceniza de mazorca de maíz y tener un impacto positivo.

- d) Aporte de la investigación.

**¿Qué aporte brinda la investigación a la Ingeniería Civil?**

La investigación tiene lugar en la rama Geotecnia (mecánica de suelos), al ser un mejoramiento de propiedades físico – mecánicas de suelos arcillosos a nivel de subrasante, dichos suelos son muy comunes de encontrar en cualquier obra vial, por lo que en la presente investigación podemos ver un patrón de comportamiento del suelo arcilloso en su estado natural, y estabilizado con dos aditivos. Así mismo podemos apreciar el potencial de mejora, que tienen las cenizas volantes como un aditivo estabilizador, y dejar en evidencia una posible alternativa de solución a suelos arcillosos de baja calidad a nivel de



subrasante sin necesidad de usar material de préstamo.

**¿Qué antecedentes deja la presente investigación respecto a los materiales de construcción?**

Las cenizas volantes, es un material de construcción que se usa como aditivo para mejorar las propiedades mecánicas y físicas de: concreto, suelos, asfalto, cemento, etc., en países pioneros del tema como Estados Unidos, Rusia y Francia, sin embargo, estas cenizas son fabricadas principalmente a partir de residuos cálcicos de fábricas, por lo que, elaborar cenizas volantes a partir de materiales que podemos encontrar fácilmente en nuestra región, como las mazorcas de maíz, es un antecedente importante, el cual puede ser tema estudio para futuras investigaciones.

- e) Incorporación de temas nuevos que se han presentado durante el proceso de la investigación que no estaba considerando dentro de los objetivos de la investigación.

**¿El uso del aditivo estabilizante secundario, ceniza de mazorca de maíz, puede aplicarse en otros ámbitos de la construcción?**

Si, aunque principalmente su uso es el mejoramiento de suelos, también se usa como aditivo junto al cemento para mejorar la resistencia del concreto, en general, por la composición química que posee, resulta muy beneficioso como complemento para los materiales de construcción.





## GLOSARIO

**AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte.

**ADITIVO:** Sustancia o elemento que modifica las características de un cuerpo, para mejorar sus propiedades intrínsecas.

**ASTM:** American Society for Testing and Materials o Sociedad Americana para ensayos de Materiales.

**CAL:** Oxido de Calcio, sustancia alcalina de color blanco o blanco grisáceo, producto del cambio brusco de temperatura de la piedra caliza.

**CHO:** Contenido de Humedad Optimo.

**CMM:** Ceniza de Mazorca de Maíz.

**COHESIÓN:** La resistencia al corte de un suelo, a una tensión normal

**COMPACTACIÓN:** Densificación de un suelo por medio de una manipulación mecánica.

**COMPACTACIÓN:** Densificación de un suelo por medio de una manipulación mecánica.

**DENSIDAD:** Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.

**DMS:** Densidad Máxima Seca del Suelo.

**ENERGÍA MODIFICADA:** Energía de compactación equivalente a la del ensayo de Proctor Modificado

**HUMEDAD RELATIVA:** Porcentaje de agua presente en el aire a una determinada temperatura.

**MATERIAL FINO:** Porción del Suelo que pasa por el tamiz N° 04.

**MATERIAL TRATADO:** Definición de material estabilizado con alguna adición que cumplirá una finalidad estructural.

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

**MTC:** Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

**NTP:** Norma Técnica Peruana.



**SUB RASANTE:** Superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno) sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

**SUCS:** Unified Soil Classification System (USCS) o Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

**SUELOS ESTABILIZADOS:** Son suelos pobres o inadecuados de baja estabilidad a los cuales es necesario adicionarle u estabilizador como cal, cemento o aditivo químico, iónico o no convencional.

**TAMIZ:** Aparato en un laboratorio usado para separar tamaños de material y donde las aberturas son cuadradas.



## CONCLUSIONES

### Conclusión N° 01

La hipótesis general se cumplió satisfactoriamente, que indica lo siguiente:

**La adición de cal como agente estabilizador principal y ceniza de mazorca de maíz como agente estabilizador secundario, influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco mejorando las propiedades físico-mecánicas del suelo natural.**

El mejoramiento del suelo a nivel de subrasante, usando como aditivo estabilizador principal la Cal y como aditivo estabilizador secundario la ceniza de mazorca de maíz (CMM), tuvo una mejora significativa progresiva, respecto a las propiedades físico – mecánicas del suelo natural, siendo la dosificación que mejores resultados presenta **suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM**, con la que se tiene un CBR 319% mayor al CBR del suelo natural, teniendo a su vez la mayor densidad seca máxima (DSM) y las mejores características de límites de consistencia.

Tabla 94. Resumen de resultados de la investigación.

Ensayos	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Proctor		CBR (%)		Expansión
				Densidad Seca Máxima	Humedad Óptima (%)	0.1"	0.2"	56 golpes (4 días)
Suelo Natural	40.44%	23.19%	17.25%	1.596	17.45%	4.02	5.31	3.203%
SN + 5% CAL	31.40%	28.40%	3.00%	1.651	16.65%	4.61	6.88	2.512%
SN + 5% CAL + 1% CMM	31.66%	29.00%	2.66%	1.698	13.95%	5.13	8.45	2.599%
SN + 5% CAL + 2% CMM	31.83%	30.10%	1.73%	1.709	14.15%	9.35	11.98	2.309%
SN + 5% CAL + 3% CMM	31.42%	32.34%	NP	1.725	15.10%	12.84	15.75	1.722%

*Fuente: Elaboración Propia.*

### Conclusión N° 02

Se cumple satisfactoriamente la sub - hipótesis N° 1, que indica:

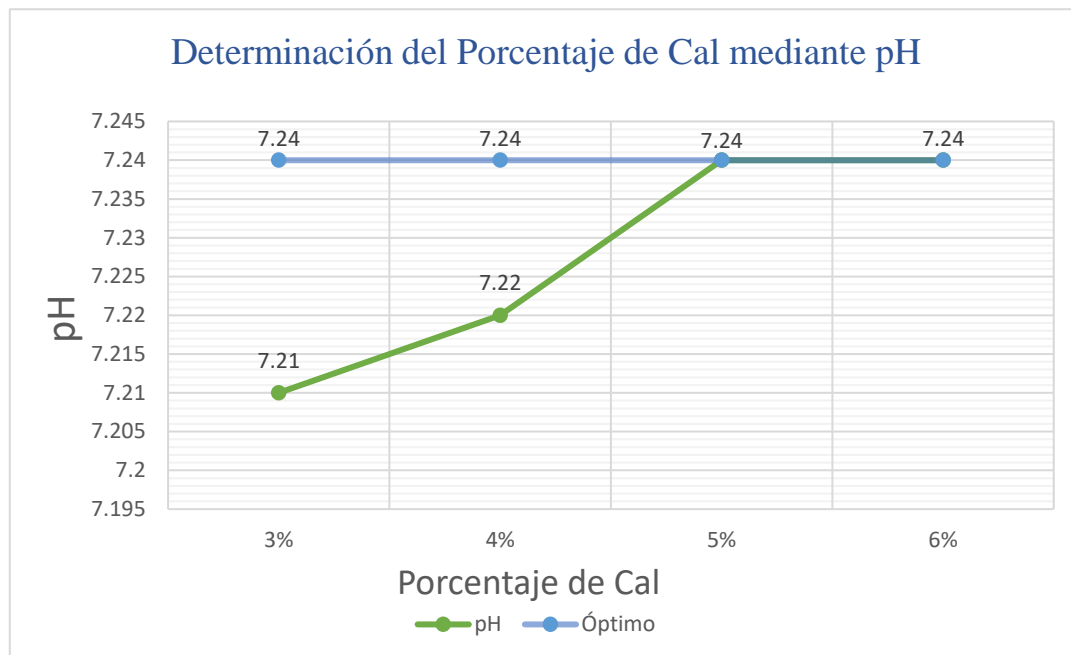
**El porcentaje óptimo de cal estará en el rango de 2% y 8% como indica la norma CE.020 Estabilización de suelos y taludes.**

Efectivamente, la reacción entre suelos arcillosos y cal, mantiene una relación en la que, el aditivo estabilizador (CAL), presentará las condiciones más óptimas dentro del rango de 2% y 8%, en la que mantiene un equilibrio catiónico con el suelo, siendo 5% de CAL el óptimo para el suelo arcillosos tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco. Se pudo confirmar también, que al determinar el porcentaje óptimo de cal mediante el pH según ASTM D6276 – 19 que, los porcentajes mayores al óptimo representarán una reacción igual, por lo que se toma



el menor porcentaje en llegar al pH guía, que será el más eficiente.

Gráfico de determinación del porcentaje de Cal mediante pH (Figura 75).



### Conclusión N° 03

Se cumple satisfactoriamente la sub - hipótesis N° 2, que indica:

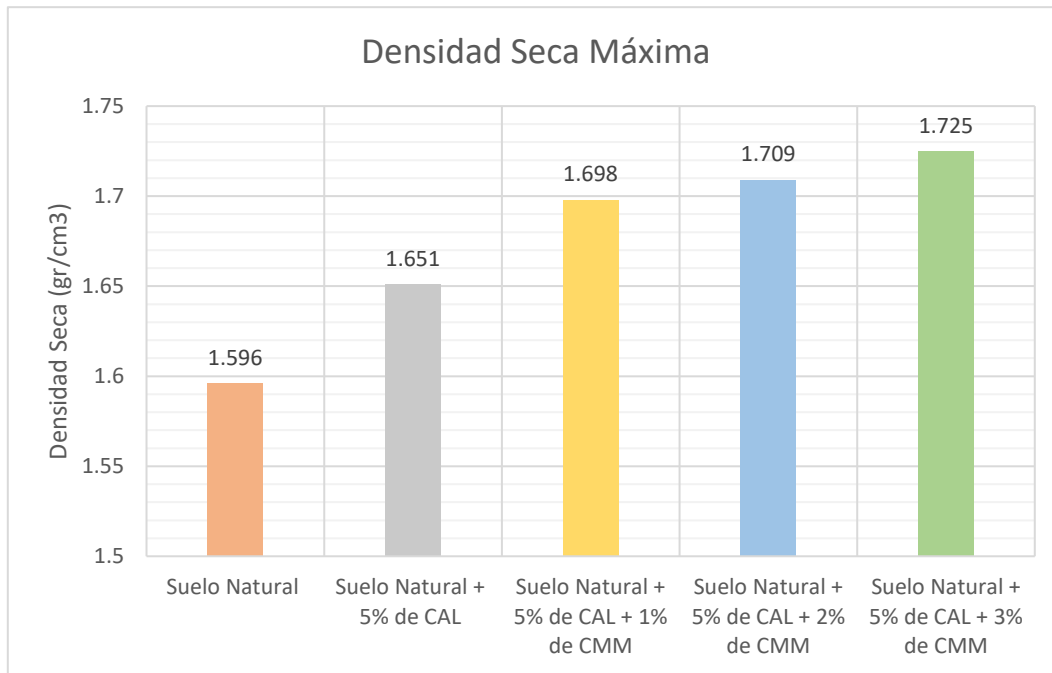
**La densidad máxima del suelo arcilloso aumentará y el contenido de humedad óptimo se disminuirá respecto a una estabilización únicamente con cal.**

La densidad del suelo en estado natural fue incrementándose progresivamente a medida que se aumentaron los aditivos estabilizadores, y en efecto, la estabilización del suelo únicamente con cal tiene una densidad máxima seca (DMS) inferior a las estabilizaciones añadidas con ceniza de mazorca de maíz (CMM), siendo la dosificación de suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM, la cual obtuvo la mayor densidad máxima seca (DMS).

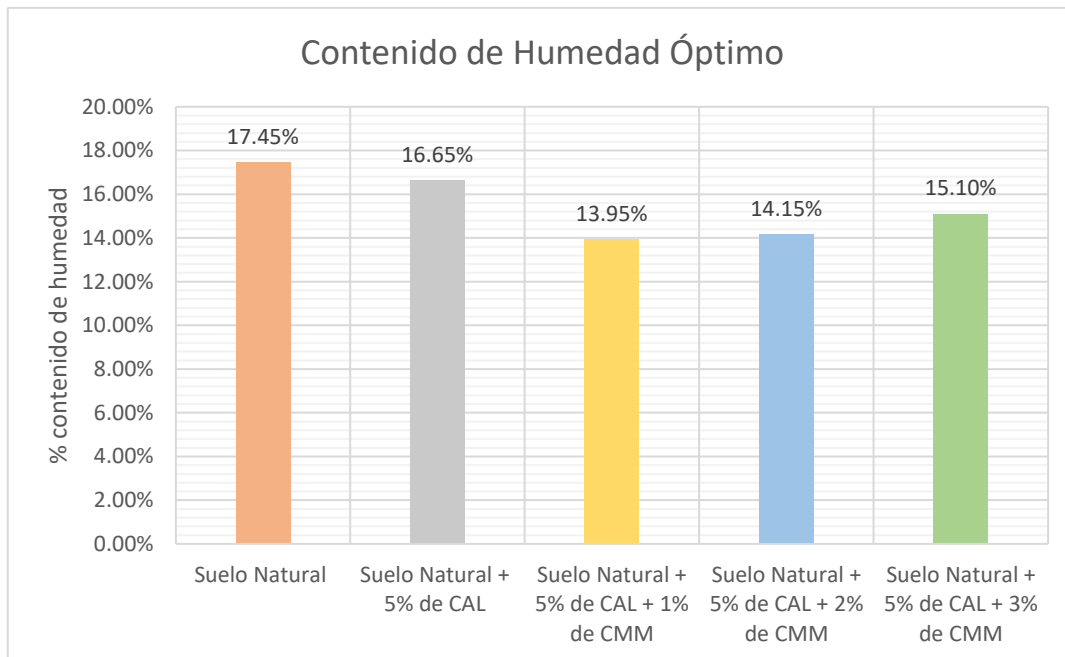
Por otro lado, podemos observar que, al añadir ceniza de mazorca de maíz, el contenido de humedad óptimo (CHO) se reduce respecto al CHO del suelo natural y del suelo natural + 5% de CAL, confirmando que la hipótesis es correcta, sin embargo, también podemos analizar que mientras mayor sea el porcentaje de CMM, este requerirá mayor contenido de humedad para tener una DMS más favorable.



Densidades Máximas Secas (DMS) de los ensayos de Proctor Modificado (Figura 111)



Contenidos de Humedad Óptimos (CHO) del ensayo de Proctor Modificado (Figura 112)



#### Conclusión N° 04

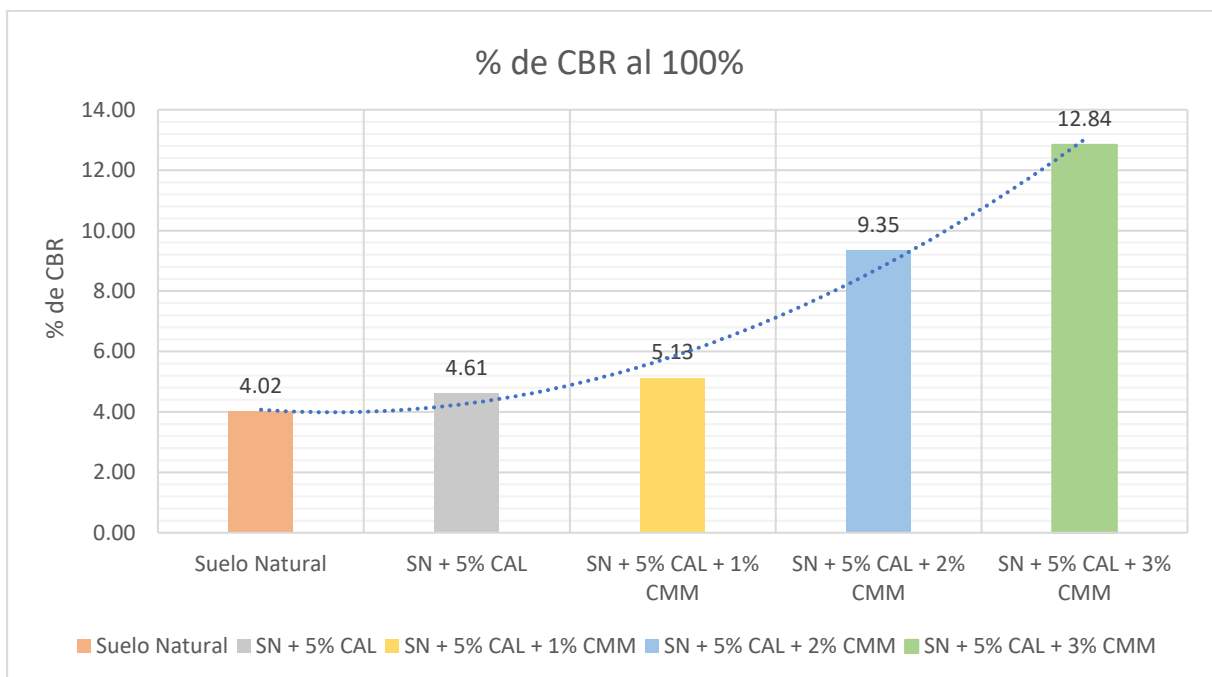
Se cumple satisfactoriamente la sub - hipótesis N° 3, que indica:

**La estabilización con cal y ceniza de mazorca de maíz tiene un mejor porcentaje de CBR (capacidad de soporte) que una estabilización únicamente con cal.**



Mediante los ensayos realizados en la presente investigación, pudimos comprobar que la estabilización únicamente con cal, del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco, no es lo suficientemente buena a nivel de subrasante, siendo categorizada como una subrasante pobre, por lo que al añadir un aditivo estabilizador complementario, la ceniza de mazorca de maíz (CMM), se comprobó la hipótesis al tener una significativa mejora de las propiedades físico – mecánicas, especialmente del CBR la cual mejoró progresivamente con la CMM, siendo recategorizada a una subrasante buena en la dosificación de suelo arcilloso + 5% de CAL + 3% CMM.

Resultados comparativos del CBR al 100%.



Fuente: Elaboración Propia.

### Conclusión N° 05

Se cumple satisfactoriamente la sub - hipótesis N° 4, que indica:

**El índice de plasticidad del suelo adicionado con cal y ceniza de mazorca de maíz mejorará respecto a un suelo estabilizado únicamente con cal.**

Al determinar los límites de consistencia en las distintas dosificaciones de aditivos, se observó que la ceniza de mazorca de maíz (CMM) reduce el índice de plasticidad, especialmente en la dosificación de suelo natural + 5% de CAL + 3% de CMM, donde suelo se vuelve no plástico (NP). Esto nos indica que la comprensibilidad del suelo se reduce de manera significativa en comparación al suelo natural estabilizado con 5% de CAL y especialmente al suelo natural, se



evidencia que el suelo en un estado no plástico, para fines de una subrasante, es un suelo ideal y con muy buenas características físico – mecánicas, debido a su baja comprensibilidad soportará las cargas mínimas que se requieren en una subrasante y a su vez, dará un soporte continuo sin asentamientos significativos evitando flujos plásticos y/o deslizamientos laterales. Por consiguiente, queda claro que la ceniza de mazorca de maíz (CMM), es un aditivo complementario excelente para la cal y mejora su índice de plasticidad.

### Conclusión N° 06

Se cumple parcialmente la sub – hipótesis N° 5, que indica:

**La adición de los distintos porcentajes de cal y ceniza de mazorca de maíz al suelo arcilloso disminuyen progresivamente el potencial de expansión respecto a una estabilización únicamente con cal.**

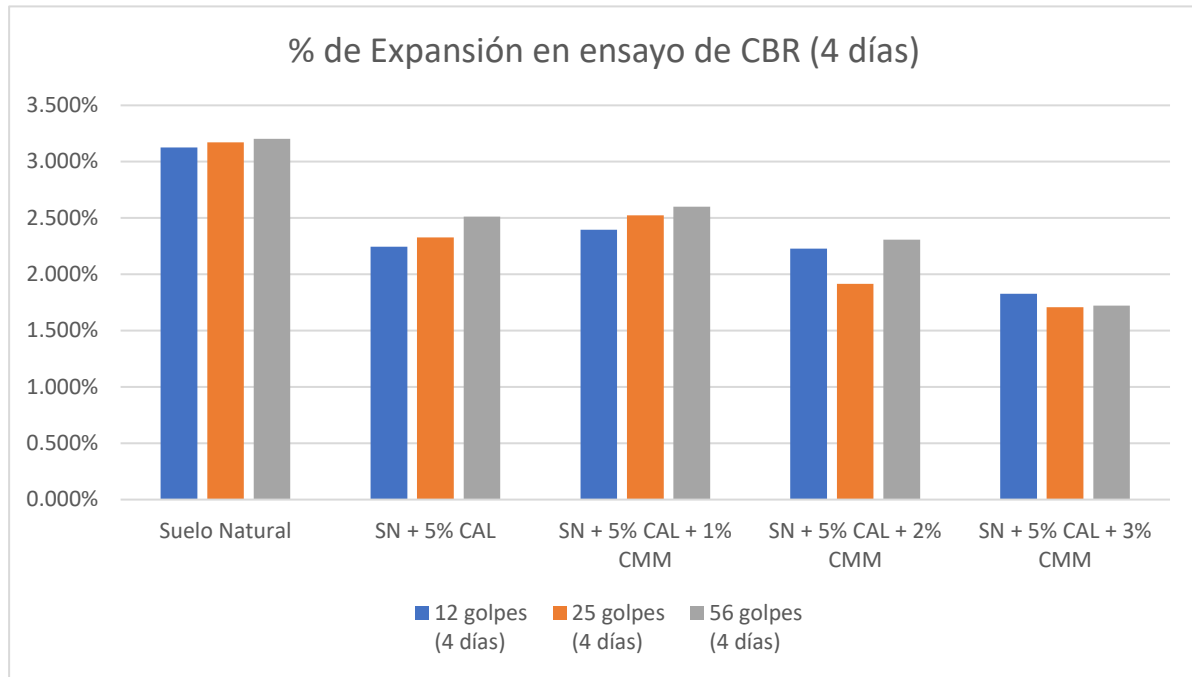
El potencial de expansión se logró disminuir significativamente en la dosificación de suelo natural + 5% de CAL + 3% de ceniza de mazorca de maíz (CMM), sin embargo, esta reducción de la expansibilidad del suelo no aumentó de forma progresiva como se esperaba, dado que, en la dosificación de suelo natural +5% de CAL + 1% de CMM el porcentaje de expansibilidad aumentó ligeramente respecto a la estabilización únicamente con cal. Por tanto, se asume que, la ceniza de mazorca de maíz (CMM) puede reducir el potencial de expansión como aditivo secundario a la cal, agregándose en dosificaciones correctas.

Resumen de porcentajes de expansión de las muestras.

Ensayos	Expansión		
	12 golpes (4 días)	25 golpes (4 días)	56 golpes (4 días)
Muestras			
Suelo Natural	3.127%	3.173%	3.203%
SN + 5% CAL	2.244%	2.328%	2.512%
SN + 5% CAL + 1% CMM	2.397%	2.524%	2.599%
SN + 5% CAL + 2% CMM	2.228%	1.915%	2.309%
SN + 5% CAL + 3% CMM	1.826%	1.707%	1.722%



Gráfico de los porcentajes de expansión de las muestras en CBR. (Figura 113)







## RECOMENDACIONES

### **Recomendación N° 01**

Para la adecuada elaboración de cada ensayo en laboratorio se recomienda realizar una previa inspección de los equipos y materiales a usar; para que los resultados obtenidos tengan mayor credibilidad.

### **Recomendación N° 02**

Al ser la ceniza de mazorca de maíz un aditivo con buenas propiedades estabilizantes se recomienda hacer un estudio comparativo con diferentes porcentajes como principal agente estabilizante (sin cal).

### **Recomendación N° 03**

La ceniza de mazorca de maíz se realizó de forma controlada, el variar esta temperatura podría alterar la composición química de la ceniza por tal motivo se recomienda tener mucho cuidado con las variaciones bruscas de calor. Por otro lado, se recomienda tener cuidado con el método de enfriado de la ceniza puesto que el material demora bastante tiempo en enfriar.

### **Recomendación N° 04**

El estudio se hizo con mazorca de maíz de un solo tipo y de una sola zona, por lo que se recomienda hacer estudios con diferentes clases de maíz y obtenidos de distintas zonas puesto que estos materiales podrían variar su composición química.

### **Recomendación N° 05**

Se recomienda estabilizar suelos arcillosos con ceniza de mazorca de maíz puesto que es una propuesta económica y ambientalmente viable, y con resultados favorables.

### **Recomendación N° 06**

Se recomienda estabilizar las zonas arcillosas que se puedan encontrar en la Vía Expresa que no cumplan con el CBR adecuado para subrasante con Cal al 5% y ceniza de mazorca de maíz al 3% puesto que los ensayos presentados en este proyecto de investigación muestran resultados favorables.

### **Recomendación N° 07**

En vista que la presente investigación concluyó con resultados significativamente positivos, recomendamos seguir con los estudios de cenizas volantes para los suelos arcillosos, utilizando



distintos porcentajes de CMM (porcentajes mayores a 3%), y usando distintos agentes estabilizadores principales, como el cemento.



## BIBLIOGRAFÍA

- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de Arcillas de Suelos*. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Borja, M. (2016). *Metodología de la Investigación Científica para ingenieros*. Chiclayo.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Ciudad de México: Libros McGraw-Hill.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., & Carlier, G. (2011). *Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1:50,000*. Lima: NGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional.
- Colomé, D. (2018). *Metodología de Investigación para Cursos de Posgrado en Ingeniería*. San Juan: UNSJ - CONICET.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (Quinta ed.). Ciudad de México: Editorial Limusa.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Cuarta ed.). México DF: Cengage Learning.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2013). *Manual de Carreteras*. Lima: MTC.
- Duque-Escobar, G., & Escobar, C. E. (2002). *Mecánica de los Suelos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Faber, J., & Capp, J. (1967). *Fly Ash Utilization*. Nueva York: United States Department of Interior.
- Graux, D. (1975). *Fundamento de Mecánica de Suelos Proyecto de Muros y Cimentaciones* (Segunda ed.). Barcelona: Editores Técnicos y Asociados.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (Cuarta ed.). México DF: McGraw-Hill.
- Instituto de la Construcción y Gerencia. (2013). *Manual de la Construcción*. Lima.
- Juárez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de Suelos* (Vol. I). México DF: LIMUSA.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Manual de diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito*.




- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima: El Peruano.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima.
- Montejo, A. (2002). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS*.
- Montejo, A., Montejo, A., & Montejo, A. (2018). *Estabilización de Suelos*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Pérez Alamá, V. (2006). *Materiales y Procedimientos de Construcción - Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México DF: Trillas.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2012). *CE.020 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y TALUDES*. Lima: Diario El Peruano.
- Reunion de Ingenieros. (1975). *Mecánica de Suelos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Rodríguez, A., & Pérez, A. (2017). *Métodos Científicos de Indagación y de Construcción del Conocimiento*. Artemisa: Revista EAN. Obtenido de <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Seco, A., Miqueleiz, E., Marcelino, S., & Garcia, B. (2017). *Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders*. Lejona. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.033>
- Wikipedia. (3 de Octubre de 2009). *Wikipedia* . Obtenido de [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Soil\\_Gradations.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Soil_Gradations.JPG)




**ANEXOS**

**ANEXO 01: ANALISIS DE ELEMENTOS MINERALES**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAAD DEL CUSCO  
DECANATO

UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

**INFORME DE ANÁLISIS**

Nº0515-19-LAQ

SOLICITANTE: DANIEL MORMONTOY PEÑALBA  
CHRISTIAN DELGADO RIVERA

MUESTRA : GENIZA ( MARLO DE MAIZ)


FECHA : C/02/09/2019

RESULTADO ANALISIS:

=====	
Silice % (SiO <sub>2</sub> )	41.40
Calcio % (CaO)	10.20
Magnesio % (MgO)	29.30
Aluminio % (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.17
Hierro % (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.60
=====	


\* ANALISIS DE ELEMENTOS MINERALES, J. Fries

Cusco, 06 de Setiembre 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAAD DEL CUSCO  
LABORATORIO DE ANALISIS QUÍMICO

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco  
Unidad de Prestación de Servicios Químicos



**Elizaveth Herrera Arias**  
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUÍMICO



## ANEXO 02: Certificado de Elaboración de los Ensayos y Calibración de los Equipos.

**GEO SOIL**  
Soil Testing Lab

LABORATORIO DE MECÁNICA  
DE SUELOS PARA CARRETERAS

CARTA N° 008 - 2021 – GEO SOIL - STL - CUSCO

*Cusco, 24 de Marzo del 2021*

**SEÑORES: CHRISTIAN A. DELGADO RIVERA Y V. DANIEL MORMONTOY PEÑALBA**

**ASUNTO: CERTIFICADOS DE ELABORACIÓN DE ENSAYOS Y CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS.**

De nuestra mayor consideración es grato dirigirnos a usted para saludarle e informarle que nuestro laboratorio fue el encargado de realizar los controles de calidad de material del servicio de: **“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL Y CENIZA DE MAZORCA DE MAIZ”**.

Todos los ensayos se realizaron según la normativa internacional ASTM y normativa nacional MTC.

La ejecución de todos los ensayos se encuentra testificados a través de paneles fotográficos, así como en formatos llenados por los técnicos en laboratorio.

Por último, se adjunta en el presente documento todos los certificados de calibración de nuestros equipos.

Quedando a su entera disposición, me despido de usted con un saludo cordial.

Atentamente.

**GEO SOIL**  
Soil Testing Lab  
  
Ing. Dante Quispe Vilca  
CIP. 245571

---

Av. Vía Expresa s/n San Jerónimo – Cusco  
Teléfono: 952425117  
E-mail: geosoilcusco@gmail.com



**ANEXO 03: Croquis de la ubicación de las calicatas.**



 Vía Expresa.

C1: Calicata 01

C2: Calicata 02

C3: Calicata 03

*Fuente: Google Earth*



**ANEXO 04: MATRIZ DE CONSISTENCIA**

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	SISTEMA DE HIPÓTESIS	DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO	VARIABLES DE ESTUDIO	METODOLOGÍA
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿En qué medida influye la adición de cal y ceniza de mazorca de maíz, en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar en qué medida influye la adición de cal y ceniza de mazorca de maíz, en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>La adición de cal como agente estabilizador principal y ceniza de mazorca de maíz como agente estabilizador secundario, influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco mejorando las propiedades físico mecánicas del suelo natural.</p>	<p><b>Delimitación espacial</b></p> <p>La presente investigación se realizará en el suelo arcilloso obtenidos de la Vía Expresa Km 04+500</p>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <p>SUELO ARCILLOSO</p> <p>% CENIZA DE MAZORCA DE MAIZ</p> <p>% CAL</p>	<p><b>ALCANCE DE ESTUDIO</b></p> <p>Su propósito es analizar cómo reacciona el suelo al usar agentes estabilizantes (cal-ceniza de mazorca en diferentes porcentajes) y determinar de qué manera repercute en las propiedades físico mecánicas del suelo.</p> <p>El diseño a utilizar es:</p> <p><math>Z = f(X_1, X_2 \rightarrow Y)</math></p> <p>Donde:</p> <p>Z= Variable predicha.</p> <p>F = Función.</p> <p>X1= Variable Inicial: Suelo arcilloso</p> <p>X2= Variable Causa: % cal, % CMM.</p> <p>Y= Variable Efecto: Mejores propiedades físico mecánicas del suelo arcilloso obtenido de la de la Vía Expresa Km 04+500</p>
<p><b>Problema Específicos:</b></p> <p>¿Cuál es el porcentaje óptimo de cal, mediante el pH para estabilizar el suelo arcilloso obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco?</p>	<p><b>Objetivo Específicos:</b></p> <p>Determinar un porcentaje óptimo de cal basados en el pH de la arcilla para estabilizar el suelo arcilloso obtenido del Km 04+500 de la Vía Expresa Cusco</p>	<p><b>Hipótesis Específicas:</b></p> <p>El porcentaje óptimo de cal estará en el rango de 2% y 8% como indica la norma CE.020 Estabilización de suelos y taludes</p>	<p><b>Delimitación temporal</b></p> <p>El estudio tendrá una duración de 6 meses, a partir de 1 de noviembre del 2020.</p>	<p><b>Variable Dependiente.</b></p> <p>Propiedades físico mecánicas del suelo arcilloso:</p> <p>pH del Suelo</p> <p>Límite Líquido</p> <p>Límite Plástico</p> <p>Humedad Óptima</p> <p>CBR (California Bearing Ratio)</p> <p>Hinchamiento y absorción</p>	
<p>¿Cómo varía la densidad máxima y la humedad óptima de suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?</p>	<p>Determinar la variación de la densidad máxima seca y la humedad óptima de suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes, 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante</p>	<p>La densidad máxima del suelo arcilloso aumentará y el contenido de humedad óptimo se disminuirá respecto a una estabilización únicamente con cal.</p>			
<p>¿Cuál es el porcentaje de CBR máximo que puede llegar el suelo</p>	<p>Cuál es el porcentaje de CBR máximo que puede llegar el suelo arcilloso</p>	<p>La estabilización con cal y ceniza de mazorca de maíz tiene un mejor</p>			





arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?	tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante	porcentaje de CBR (capacidad de soporte) que una estabilización únicamente con cal.			
¿Cuáles serán los límites de consistencia del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?	Determinar los límites de consistencia del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante	El índice de plasticidad del suelo adicionado con cal y ceniza de mazorca de maíz mejorará respecto a un suelo estabilizado únicamente con cal.			
¿Cuál será el porcentaje de hinchamiento del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante?	Determinar el porcentaje de hinchamiento del suelo arcilloso tomado del km 04+500 de la Vía Expresa de Cusco estabilizado con Cal y CMM con porcentajes 5% - 0%, 5% - 1%, 5% - 2%, 5% - 3% respectivamente, a nivel de subrasante	La adición de los distintos porcentajes de cal y ceniza de mazorca de maíz al suelo arcilloso disminuyen progresivamente el potencial de expansión respecto a una estabilización únicamente con cal.			