



# UNIVERSIDAD DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **Análisis comparativo del uso de cal y cemento como agentes estabilizadores en la subrasante de una vía terciaria en el distrito de Marcavelica - Sullana**

Tesis para optar por el Título de  
Ingeniero Civil

**Jesús Alonso Moscol Navarro  
Nelson Miguel Portilla Berru**

**Asesor:  
Mgtr. Ing. Jorge Alberto Timaná Rojas**

**Piura, junio de 2025**



### Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Jesús Alonso Moscol Navarro, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 71961668, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

**“Análisis comparativo del uso de cal y cemento como agentes estabilizadores en la subrasante de una vía terciaria en el distrito de Marcavelica - Sullana”**

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Nelson Miguel Portilla Berru, identificado con DNI: 72563655

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Jorge Alberto Timaná Rojas, identificado con DNI: 02779955

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 16/06/2025.

.....  
Firma del autor<sup>1</sup>

.....  
Firma del asesor<sup>1</sup>

.....  
Firma del co-asesor<sup>1</sup>

.....  
Firma del co-asesor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

## Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Nelson Miguel Portilla Berru, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 72563655, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

**“Análisis comparativo del uso de cal y cemento como agentes estabilizadores en la subrasante de una vía terciaria en el distrito de Marcavelica - Sullana”**

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Jesús Alonso Moscol Navarro, identificado con DNI: 71961668

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Jorge Alberto Timaná Rojas, identificado con DNI: 02779955

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 16/06/2025.

.....  
Firma del autor<sup>1</sup>

.....  
Firma del asesor<sup>1</sup>

.....  
Firma del co-asesor<sup>1</sup>

.....  
Firma del co-asesor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

A Dios, por ser mi guía constante y darme la fuerza en cada paso de este camino.

A mi madre, Mirtha, ejemplo de sacrificio y entrega, cuyo amor incondicional y esfuerzo diario fueron mi mayor motivación.

A mi hermano, por su paciencia, compañía y silencioso apoyo en cada etapa de esta travesía.

A Roberto, Bonet, Betsy, César, Steven y a todos los amigos que la universidad me regaló, gracias por su amistad leal y por estar presentes en cada trabajo, evaluación y proyecto compartido.

Y al ingeniero Jorge Timaná, por su valioso tiempo, disposición y guía a lo largo de este proceso.

#### **Dedicatoria**

#### **Jesús Moscol**

A Dios, por darme salud y entendimiento y a mi familia, a mis padres Nereyda y Carlos por apoyarme siempre en todas mis decisiones y agradecer el esfuerzo que hacen para que pueda cumplir mis objetivos

A mis hermanos Carlo y Karen por su apoyo constante y por ser mis ejemplos para seguir e impulsarme a superarme día a día.

A Luhana, quien ha sido un motor y apoyo constante en mi etapa universitaria y motivación en toda la presente investigación.

A nuestro asesor, Ing. Jorge Timaná por el tiempo dedicado y sus aportes de mejora continua.

#### **Dedicatoria**

#### **Nelson Portilla**

## Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal la comparación técnica del efecto estabilizador en suelos arcillosos, en primer lugar, con la aplicación de óxido de calcio (Cal Viva) y por otro lado con cemento tipo I con fines de mejora a nivel de subrasante en caminos de servicio. Para este análisis, se realizaron estabilizaciones con 3 porcentajes determinados: 2%, 3% y 4% de cada agente estabilizador. El suelo por estabilizar se extrajo de un proyecto denominado "REHABILITACIÓN DEL CAMINO DE SERVICIO DE LOS CANALES NORTE (KM. 0+000 – KM. 39+358) Y SUR (KM. 0+000 – KM. 25+707)" en el distrito de Marcavelica – Sullana.

En la caracterización del suelo patrón en estado natural se obtuvo que el suelo presente es una arcilla inorgánica de plasticidad alta (CH o A-7-6), con un índice de plasticidad de 28 y un valor de soporte de California (CBR) del 3.9%. Indicando que es un suelo no apto para su desempeño a nivel de subrasante.

La aplicación de la cal viva obtuvo los siguientes resultados técnicos: el Índice de Plasticidad (IP) con aplicación al 2% de cal lo redujo a un valor de IP igual a 20, con 3% a 18 y con un 4% a 16. Así mismo su valor de máxima densidad seca (MDS) se vio disminuido a medida que se aumentaba el porcentaje de cal, caso contrario sucedió con la humedad óptima que se vio significativamente aumentada hasta un 25% con aplicación al 4% de cal; por último, indujo a un incremento brusco del CBR, elevando su valor de un 3.9% inicial a un 48% con solo un 2% de aplicación del estabilizador químico, su posterior aumento de resistencia fue gradual, pues con un 3% de cal se obtuvo un valor de 56%, y por último con un 4% se llegó a 62%.

Por otro lado, el cemento tipo I logró una mayor disminución del IP, con aplicación al 2% se obtuvo un IP de 12, con el 3% redujo a 11 y con 4% redujo mínimamente a 10; mientras tanto su MDS y humedad óptima, en este caso fueron directamente proporcionales y aumentaron su valor respecto al patrón mínimamente; por último su valor de CBR obtuvo un aumento gradual, ya que con el 2% de cemento se obtuvo un CBR del 12%, seguido por un aumento a 22% del CBR con un 3% de cemento, finalmente con el 4% se llegó a un 49%.

Ambas estabilizaciones logran un aumento del CBR ideal para lo requerido a nivel de subrasante. Sin embargo, los costos que generaría usar cal viva son más del 500% que estabilizar con cemento debido al costo elevado por kilogramo de la cal viva, y esto solo analizando el precio de mezcla estabilizada; tomando en cuenta la cantidad de agua que demanda la cal viva para llegar a su humedad óptima en comparación del cemento es considerable y podría generar dificultad con el recurso hídrico. Por ello se llega a la conclusión y recomendación de utilizar cemento tipo I con fines de estabilización del suelo a nivel de subrasante en el proyecto mencionado.

## Tabla de contenido

Introducción	12
Capítulo 1 Generalidades	14
1.1 Justificación	14
1.2 Antecedentes	15
1.2.1 <i>Antecedentes nacionales e internacionales</i>	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	17
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
1.4 Materiales	17
1.4.1 <i>Cemento Portland</i>	17
1.5 Suelos	18
1.5.1 <i>Propiedades de los Suelos</i>	19
1.5.2 <i>Clasificación de Suelos</i>	20
1.6 Pavimentos	25
1.6.1 <i>Clasificación de Pavimentos</i>	25
1.6.2 <i>Componentes de los Pavimentos</i>	27
1.7 Parámetros de análisis de la Subrasante	28
1.7.1 <i>Humedad óptima y Máxima Densidad Seca (MDS)</i>	28
1.7.2 <i>California Bearing Ratio (CBR)</i>	28
1.8 Estabilización de Suelos	30
1.8.1 <i>Estabilización Mecánica</i>	30
1.8.2 <i>Estabilización Química</i>	30
1.9 Elaboración de cuerpos de prueba	37
1.9.1 <i>Probetas de Suelo - Cal</i>	37
1.9.2 <i>Probetas de Suelo - Cemento</i>	37
Capítulo 2 Descripción y presentación de resultados del Suelo Patrón	38
2.1 Ubicación Geográfica	38
2.2 Análisis del tramo a intervenir	38
2.3 Extracción de Muestras de Suelo Patrón	41
2.4 Caracterización del Suelo Patrón	43
2.4.1 <i>Correlación sistemas AASHTO y SUCS aplicado al Suelo Patrón</i>	45
2.5 Propiedades y parámetros del Suelo Patrón	46
2.5.1 <i>Textura del Suelo Patrón</i>	46
2.5.2 <i>Plasticidad del Suelo Patrón</i>	46
2.6 Ensayo de Compactación Proctor Modificado del Suelo Patrón	48
2.7 CBR del Suelo Patrón	49
2.8 Evaluación del Suelo Patrón como Subrasante	51
2.9 Elección del método de estabilización	52

Capítulo 3 Presentación de resultados aplicando el agente estabilizador -----	55
3.1 Ensayo de Cal Útil Vial (CUV) -----	55
3.2 Granulometría de los cuerpos de prueba-----	58
3.3 Límites de Atterberg de los cuerpos de prueba -----	64
3.4 Ensayo Proctor Modificado de los cuerpos de prueba -----	65
3.5 Ensayo de valor relativo de soporte (CBR) de los cuerpos de prueba-----	69
3.6 Ensayo de Peso Volumétrico de los cuerpos de prueba-----	75
Capítulo 4 Análisis de Resultados y Discusión -----	77
4.1 Análisis del Ensayo de Granulometría-----	77
4.2 Análisis del Ensayo de Límites de Atterberg -----	77
4.3 Análisis del Ensayo Proctor Modificado-----	78
4.4 Análisis del Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)-----	79
4.5 Resumen comparativo suelo Patrón – Cal Viva – Cemento -----	80
4.6 Análisis de costos de las mezclas de diseño-----	81
Conclusiones -----	83
Recomendaciones-----	85
Referencias -----	86



## Lista de tablas

Tabla 1 <i>Caracterización de los suelos según su IP</i> -----	20
Tabla 2 Clasificación según AASHTO de Materiales Granulares -----	21
Tabla 3 Clasificación según AASHTO de Materiales Limo-Arcillosos-----	22
Tabla 4 Clasificación según SUCS de Suelos de Partículas Gruesas -----	23
Tabla 5 Clasificación según SUCS de Suelos de Partículas Finas -----	24
Tabla 6 Categorías de la subrasante -----	29
Tabla 7 <i>Ensayos y frecuencias de un suelo estabilizado con Cal</i> -----	33
Tabla 8 Ensayos y frecuencias de un suelo estabilizado con Cal -----	35
Tabla 9 <i>Granulometría del Suelo Patrón</i> -----	44
Tabla 10 <i>Resultados del ensayo de los límites de Atterberg</i> -----	45
Tabla 11 Descripción del suelo -----	45
Tabla 12 Correlación de Tipos de suelos AASHTO-SUCS -----	45
Tabla 13 Calificación de los suelos de acuerdo con su IP -----	47
Tabla 14 Resultados del Ensayo CBR del Suelo Patrón-----	49
Tabla 15 Resultados del Ensayo Proctor Modificado del Suelo Patrón -----	50
Tabla 16 Determinación del CBR del Suelo Patrón -----	50
Tabla 17 Resumen del Suelo Patrón -----	52
Tabla 18 <i>Elección del Método de Estabilización</i> -----	53
Tabla 19 Tipo de suelo estabilizado con Cal-----	54
Tabla 20 Especificaciones Técnicas Cal Viva -----	55
Tabla 21 Ensayo 01 Cal Útil Vial -----	56
Tabla 22 Ensayo 02 Cal Útil Vial-----	57
Tabla 23 Ensayo 03 Cal Útil Vial-----	57
Tabla 24 <i>Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%</i> -----	58
Tabla 25 <i>Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%</i> -----	59
Tabla 26 <i>Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%</i> -----	60
Tabla 27 <i>Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cemento 2%</i> -----	61
Tabla 28 <i>Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cemento 3%</i> -----	62
Tabla 29 <i>Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cemento 4%</i> -----	63
Tabla 30 <i>Límites de Atterberg de los Cuerpos de Prueba</i> -----	64
Tabla 31 <i>Clasificación de los diseños a evaluar</i> -----	65
Tabla 32 <i>Resumen de Ensayo Proctor Modificado</i> -----	68
Tabla 33 <i>Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%</i> -----	69
Tabla 34 <i>Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%</i> -----	69
Tabla 35 <i>Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%</i> -----	69
Tabla 36 <i>Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%</i> -----	70
Tabla 37 <i>Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%</i> -----	70
Tabla 38 <i>Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%</i> -----	70
Tabla 39 <i>Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%</i> -----	71
Tabla 40 <i>Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%</i> -----	71
Tabla 41 <i>Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%</i> -----	71
Tabla 42 <i>Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 2%</i> -----	72

Tabla 43 Resultados del Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cemento 2%	72
Tabla 44 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 2%	72
Tabla 45 Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 3%	73
Tabla 46 Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cemento 3%	73
Tabla 47 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 3%	73
Tabla 48 Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 4%	74
Tabla 49 Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cemento 4%	74
Tabla 50 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 4%	74
Tabla 51 Peso Volumétrico de muestras en estado compactado	75
Tabla 52 Peso Volumétrico de muestras en estado natural	76
Tabla 53 Resultados de los ensayos	80
Tabla 54 Costo Mezcla Arcilla + % Cal en estado compactado	81
Tabla 55 Costo Mezcla Arcilla + % Cemento en estado compactado	81
Tabla 56 Costo Mezcla Arcilla + % Cal en estado suelto	82
Tabla 57 Costo Mezcla Arcilla + % Cemento en estado suelto	82



## Lista de figuras

Figura 1 Pavimento Flexible	25
Figura 2 Pavimento Rígido	26
Figura 3 Pavimento Semirrígido	26
Figura 4 Pavimento Articulado	27
Figura 5 Gráfica del Ensayo CBR	29
Figura 6 Porcentaje de cal recomendado según IP.	31
Figura 7 Perdida máxima según el tipo de suelo	36
Figura 8 Tramos del Proyecto Canal Norte y Sur	38
Figura 9 Índice de Plasticidad del Canal Norte	39
Figura 10 CBR al 100% en el Canal Norte	40
Figura 11 Calicata en Prog. 9 +500	41
Figura 12 Calicata Prog. 9+500	41
Figura 13 Muestras Prog. 9+500	42
Figura 14 Traslado de Muestras a LEMC	42
Figura 15 Tamizado de Material con Tamiz N° 4	43
Figura 16 Material Tamizado por Tamiz N° 4	43
Figura 17 Curva Granulométrica del Suelo Patrón	44
Figura 18 Grafica % Humedad vs N° de Golpes	47
Figura 19 Ensayo de Plasticidad	48
Figura 20 Curva de Compactación del Suelo Patrón	48
Figura 21 Muestras del Suelo Patrón para Ensayo Proctor	49
Figura 22 Determinación de CBR del Suelo Patrón	50
Figura 23 Ensayo CBR del Suelo Patrón	51
Figura 24 Cal Viva disuelta	55
Figura 25 PH Inicial de Cal Viva	56
Figura 26 Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cal Viva 2%	59
Figura 27 Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cal Viva 3%	60
Figura 28 Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cal Viva 4%	61
Figura 29 Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cemento 2%	62
Figura 30 Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cemento 3%	63
Figura 31 Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cemento 4%	64
Figura 32 Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%	65
Figura 33 Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%	66
Figura 34 Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%	66
Figura 35 Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cemento 2%	66
Figura 36 Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cemento 3%	67
Figura 37 Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cemento 4%	67
Figura 38 Resultados de Proctor Modificado	68
Figura 39 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%	70
Figura 40 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%	71
Figura 41 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%	72
Figura 42 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 2%	73

Figura 43 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 3%-----	74
Figura 44 Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 4%-----	75
Figura 45 Análisis de resultados de Granulometría-----	77
Figura 46 Análisis de resultados de Limites de Atterberg-----	78
Figura 47 Análisis de resultados de Proctor Modificado -----	79
Figura 48 Resultados de CBR al 100%-----	80



## Introducción

Las vías de transporte de una ciudad están íntimamente ligadas con su desarrollo, Piura como ciudad en auge de desarrollo en los últimos años debido al alto impacto de las actividades primarias en su territorio, necesita garantizar una correcta transitabilidad vehicular en sus diferentes caminos.

Marcavelica, al igual que muchos otros distritos de Sullana, es parte del crecimiento económico de la región debido principalmente a la actividad agrícola, el constante crecimiento de dicha actividad se debe a las 10 400.67 hectáreas registradas como superficie cultivada en el Censo Nacional Agropecuario (CENAGRO 2012) que significan el 51.72% de la superficie total como uso de la Tierra (Albañil Ordinola, 2015). La importancia de la correcta transitabilidad de los caminos terciarios o de servicio, radica en que son parte fundamental para la comunicación del producto con el mercado exterior, es por ello que como parte de la estrategia nacional de desarrollo, la garantía de una correcta transitabilidad en dichos caminos se traduce en la reducción en los tiempos de movilización, que significa menor costo de producción y mayor facilidad de integración del producto a los diferentes mercados.

La estabilización de suelos es una técnica ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería vial para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, con el objetivo de incrementar de mejorar sus propiedades. Esta técnica posee diversas formas de estabilización, entre las que se destaca la estabilización química por su potencial atractivo económico, dado que te permite trabajar con suelos que inicialmente no cumplen con las características necesarias para soportar las diferentes carpetas estructurales. En este tipo de estabilización se destacan entre los principales agentes estabilizadores a la cal y el cemento, que al interactuar con el suelo, generan reacciones químicas que modifican su estructura y lo transforman en un material más estable y resistente, adecuado para cumplir con los requerimientos del proyecto.

La presente tesis propone como alternativa para garantizar el correcto estado de los caminos terciarios, al método de estabilización química, teniendo como agentes estabilizadores a la cal Viva y al cemento respectivamente. Para ello se muestreó un suelo de calificación terciaria, del distrito de Marcavelica (Sullana) y se sometió a los diferentes ensayos siguiendo los requisitos y especificaciones establecidas por las normas utilizadas como ASTM, NTP y Manual de Carreteras. El desarrollo de ensayos se llevó a cabo en el Laboratorio de Ensayos y Materiales de Construcción (LEMC) de la Universidad de Piura, para analizar el desempeño de las diferentes mezclas de diseño propuestas en la presente tesis.

Para una mayor comprensión la tesis ha sido segmentada en 4 capítulos. En el capítulo 1 se aborda el marco teórico y conceptual que incluye, conceptos como los tipos de suelos, parámetros de calificación así como los diversos métodos de estabilización con agentes tradicionales y no tradicionales. En el capítulo 2 se describe la muestra contemplada para la

presente investigación y la descripción de los ensayos realizados para su respectiva clasificación. En el capítulo 3 se detallan los diseños propuestos como alternativa de solución. En el capítulo 4 se contrastan y discuten los resultados del efecto de los respectivos agentes estabilizadores.

Finalmente, se han incluido las conclusiones y se realizan recomendaciones para posteriores estudios que complementen el presente trabajo.



## Capítulo 1

### Generalidades

#### 1.1 Justificación

Diversos estudios concuerdan en que los proyectos viales son fundamentales para el desarrollo de una ciudad, ya que no solo impulsan la economía, sino que también satisfacen las necesidades básicas de las personas.

En el ámbito nacional Vega (2010), sostiene que “el desarrollo de un país debe sustentarse en la integración de las distintas poblaciones a los mercados nacionales e internacionales, fomentando el intercambio entre ellas que permita potenciar sus ventajas competitivas”. (p.4)

En el ámbito regional esta postura se ve respaldada por Rosales (2016), quien indica que “mediante la intervención de la red vial departamental conseguimos un desarrollo progresivo de las regiones con inclusión social, acceso a los servicios básicos de educación, así como mejora de la calidad de vida de la población”. (p. 128)

En este sentido, se evidencia que la finalidad de la mejora de la red vial es incrementar la calidad de vida de la población.

Dentro de todo proyecto vial, es fundamental reconocer la importancia de los suelos desde una perspectiva ingenieril. Un análisis preciso de las características del suelo permite a los ingenieros diseñar carreteras seguras, duraderas y capaces de soportar las cargas generadas por el tráfico. Aspectos como la capacidad de carga, estabilidad, capacidad de drenaje y compactación son evaluados minuciosamente para estimar la calidad del suelo como parte del pavimento. Es por ello que en Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) se encuentran los estándares mínimos de calidad para garantizar la estabilidad, resistencia y durabilidad de las carreteras y vías.

Sin embargo, en ocasiones, las condiciones del suelo no cumplen con los estándares mínimos requeridos, como el Valor de Soporte Relativo (CBR). Ante esta situación, es necesario considerar alternativas que permitan superar estos desafíos. Una de las opciones disponibles es la estabilización de suelos, la cual adquiere mayor importancia al optimizar los recursos disponibles durante la ejecución de un proyecto vial. Este proceso permite mejorar las propiedades fundamentales que influyen en el rendimiento del proyecto, evitando así gastos adicionales y asegurando un resultado eficiente y satisfactorio.

En este contexto, el Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones INVIERTE.PE, en Ministerio de Economía y Finanzas (2015), establece pautas metodológicas para abordar la creciente demanda de intervenciones de mejoramiento en las vías de la Red Vial Nacional. Se destaca la importancia de los estabilizadores de suelos, como

la cal, el cemento y los aditivos químicos, que son utilizados para mejorar la transitabilidad de las vías, prevenir el deterioro acelerado y prolongar la vida útil del pavimento. Con base en esta información, la presente investigación se centra en la estabilización de suelos tipo A-4, los cuales presentan características limo arenosas con baja plasticidad. Se propone el uso de una mezcla de cal y cemento como agente estabilizador, aprovechando los beneficios de la reacción entre la cal y la humedad presente en el suelo, así como las propiedades de fraguado y endurecimiento del cemento. El objetivo principal de esta investigación es generar una alternativa práctica y económica para aquellos suelos que no cumplan con las condiciones necesarias en proyectos viales de la región y el país, asegurando así el desarrollo vial de manera sostenible.

## **1.2 Antecedentes**

Desde hace más de 500 años en India y China es que se utilizan mezclas puzolánicas naturales para la estabilización de suelos en obras públicas, e incluso para la construcción del imperio Romano tanto en sus vías de comunicación como sus obras hidráulicas. Sin embargo, no es hasta el período 1930-1950 que se da un desarrollo tecnológico en este tipo de estabilización, siendo los pioneros Estados Unidos y algunos países europeos, que debido a la necesidad militar debido a la segunda guerra mundial se vieron en la necesidad de conseguir un avance técnico en esta rama generando así la extensión de suelos estabilizados a países involucrados en el conflicto mundial. Por otro lado, la estabilización con cal es la forma tradicional y de las más antiguas para el tratamiento de suelos plásticos, su uso viene desde muchos años atrás, pues se tiene data de que fue utilizada en la construcción de las pirámides del Tíbet y en la Vía Apia, sin embargo, su mayor demanda se dio alrededor del año 1950 al igual que el suelo-cemento y de la misma forma para carreteras y pistas de aterrizaje necesitadas por la confrontación mundial.

### **1.2.1 Antecedentes nacionales e internacionales**

De acuerdo con Morocho y Casaverde (2022) en su trabajo de investigación sobre el “Diseño y aplicación de base estabilizada con cemento producida en planta de suelos para un tramo de carretera en el departamento de Piura” se buscaba describir el comportamiento de un diseño de mezcla con un contenido bajo de cemento (2.5%) para un tipo de suelo conformado por fragmentos de roca, grava y arena (A-1-a(0)), guiándose de los manuales establecidos por la PCA se demostró que se puede estabilizar este tipo de suelo con ese porcentaje de cemento, logrando altas resistencias, sin embargo, al ser un bajo porcentaje utilizado puede generar una mayor probabilidad de generar grietas y fisuras.

Becerra y Herrera (2019) realizaron el estudio de los tipos de cementos disponibles que tengan un mejor desempeño de transmisión de resistencia en “Estabilización de arcillas, arenas y afirmados, empleando los cementos Pacasmayo Víaforte, mochica y qhuna”. La estabilización se realizó en múltiples porcentajes de cemento entre el 4%-19% para un estudio

y comparación más precisa, donde se obtuvo que el cemento Qhuna el que brinda una mayor resistencia, seguido por el Mochica y por último el Víaforte.

García (2019) en su proyecto de grado “Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín”, demostró que el comportamiento frágil del caolín pudo ser compensado con un porcentaje del 12% de cemento, sin embargo, se debe tener bastante control y cuidado con el estado de saturación del material, ya que provoca pérdida de resistencia mecánica incluso en suelo ya estabilizado con porcentajes de cemento mayores al 8% disminuye su resistencia hasta un 50%. Recomendando por ello tener buenos sistemas de drenaje o aumentar la impermeabilidad del material.

Robles (2018) en la monografía titulada “Análisis y estabilización de arcilla negra con cloruro de sodio, arena pómez, cal y cemento, para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas” resalta que este tipo de arcilla es un suelo malo para el uso en terracería y para subrasante en estructura de pavimento, ya que es un suelo muy plástico y con muy bajo CBR. Se logró llegar a los valores de resistencia mayores con la estabilización con cemento (13.8, 19.2 y 26.2 kg/cm<sup>2</sup>) que con cal hidratada (11.5, 17.2 y 23 kg/cm<sup>2</sup>). Por ello, se determinó que utilizando cemento en un porcentaje del 14.1% se garantiza una resistencia de 21 kg/cm<sup>2</sup> y un incremento del CBR a 24.7.

Álvarez; Rojas y Díaz realizaron un artículo aplicado en una región de Colombia “Comparación de las alternativas de estabilización con cal, cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía” presenta un suelo A-2-4 (3) - ML, en esta comparación de estabilizadores se obtuvo que la cal es el agente que obtiene mejores resultados en el comportamiento mecánico del suelo, ya que mejoró el CBR natural en un 370.11%.

De los antecedentes investigados se puede extraer principalmente para el tema a tratar lo siguiente: Para un mismo porcentaje de cemento y cal utilizado en la estabilización de un mismo suelo, el cemento brinda mayor mejoría de CBR; Se debe buscar un porcentaje de cemento equilibrado, es decir, a pesar de que se logre los requisitos de resistencia con una cantidad de cemento baja y genere reducción en costos inmediata, hay que tener en cuenta que esto puede generar la formación de fisuras o grietas a corto plazo; Y por último el seguimiento en la colocación del diseño de mezcla debe ser exhaustivo, ante todo tener en cuenta el porcentaje de saturación del suelo, ya que una sobre saturación puede llevar a disminuciones significativas en la resistencia de la mezcla.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo del comportamiento mecánico y económico de un suelo pobre extraído del distrito de Marcavelica-Sullana, mediante el diseño de mezclas estabilizadas químicamente con cal y cemento en diferentes proporciones.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Con relación a los objetivos específicos que ayudarán al progreso de la investigación, se incluyen los siguientes

- Caracterizar el suelo patrón mediante ensayos de laboratorio como: Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor Modificado y CBR.
- Diseñar mezclas estabilizadas utilizando cal y cemento por separado en proporciones de 2%, 3% y 4%, y realizar los ensayos correspondientes (Proctor modificado, CBR, entre otros).
- Comparar los resultados obtenidos en términos de mejora de propiedades geotécnicas y costos asociados a cada agente estabilizador.

### 1.4 Materiales

#### 1.4.1 Cemento Portland

El cemento Portland es un material de construcción con textura semejante a un polvo finamente molido, compuesto mayoritariamente por silicatos de calcio y, con menor proporción, por aluminatos de calcio. Fue patentado bajo el nombre de “Cemento Portland” en 1824 por Joseph Aspdin, un albañil e inventor británico. Su nombre proviene de la piedra de Portland en Inglaterra, debido a la similitud de su color.

Se comporta como un aglomerante hidráulico, puesto que al hidratarse forma una pasta que fragua y endurece a temperatura ambiente. Este proceso de fabricación patentado por el propio Aspdin en 1824, revolucionando el ámbito industrial de la construcción convirtiéndose en el elemento base de numerosas estructuras modernas.

El cemento Portland tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria de la construcción, utilizándose principalmente para la fabricación de elementos de concreto, concreto armado, morteros y estabilización de suelos; ante ello la ASTM (American Society for Testing and Materials), ha establecido diversas normativas para la regulación de los diversos tipos de cemento, siendo estas:

- La norma *ASTM C 150* detalla las especificaciones para el cemento Portland tipo I, II, III, IV y V.

- La norma *ASTM C 595* detalla las especificaciones para el cemento Portland tipo IS, tipo IP, tipo P, tipo I (PM), tipo I (SM) y tipo S.
- La norma *ASTM C 845* detalla las especificaciones para los cementos hidráulicos expansivos.
- La norma *ASTM C 1157* detalla las especificaciones para cemento hidráulico, tipo GU, tipo HE, tipo MS, tipo HS, tipo MH y tipo LH.

En nuestro país la normativa reguladora para el cemento Portland se encuentra en la NTP (Normativa Técnica Peruana) *NTP 334.009* (Cementos Portland. Requisitos), que tiene su fundamento en las diversas normas de la ASTM.

### **1.5 Suelos**

Según Terzaghi & Peck (1978), los suelos se definen como agregados sueltos de origen mineral u orgánico que componen la capa externa de la corteza terrestre, siendo complementados por las rocas. A diferencia de las rocas, que exhiben fuerzas cohesivas que predominan, los suelos se caracterizan por carecer de una cohesión significativa.

La amplia variedad de suelos en la corteza terrestre ha impulsado a múltiples ramas de la ingeniería y ciencias naturales a emprender numerosas investigaciones sobre estos. Dichas investigaciones tienen como objetivo primordial explorar las propiedades esenciales que distinguen a los diferentes tipos de suelos presentes en la corteza, así como su origen geológico, composición química y distribución granulométrica.

Dentro de la Ingeniería Civil, la geotecnia se encarga de estudiar el comportamiento de los suelos frente a los diversos esfuerzos a los que son sometidos en distintos tipos de obras. Esta investigación precisa y exhaustiva no solo permite establecer parámetros esenciales para su uso como material de construcción y base de cimientos sólidos, sino que también refuerza la noción de que la mayoría de las edificaciones y obras civiles se apoyan sobre estos suelos.

El resultado de estos estudios minuciosos sobre los suelos ha llevado a diversas instituciones a hacer valiosos aportes en la regulación y aplicación de los suelos en la construcción y la Ingeniería Civil. Dichas contribuciones han establecido pautas cruciales para la utilización de los suelos como material de construcción y como base fundamental para la sustentación de cimientos y estructuras diversas.

### 1.5.1 Propiedades de los Suelos

**1.5.1.1 Textura.** Refiere a la distribución y tamaño de las partículas minerales que componen el suelo. Es decir, refleja la granulometría del suelo. (Morocho y Casaverde, 2022) Acorde con esto el suelo tendrá propiedades distintas. La clasificación de acuerdo con la textura es:

- Grava: rocas entre 2 y 200 milímetros de diámetro. Las recién formadas tienen forma angular, y las que han sido alteradas por las condiciones del entorno suelen haber adquirido forma redondeada.
- Arena: su diámetro oscila entre 0.06 y 2 mm compuesta por partículas de sílice y cuarzo. Cuentan con una fricción interna considerable y poca cohesión entre partículas.
- Limo: cuentan con un diámetro entre 0.002 y 0.06 mm, y tienen características similares a la arena respecto a fricción y permeabilidad.
- Arcilla: granulometría con un diámetro menor a 0.002 mm que por su naturaleza química sus propiedades físicas se ven alteradas. Es sensible al contacto con el agua debido a su naturaleza y la forma de láminas alargadas de sus partículas. Esto le concede sus propiedades de hinchazón, contracción, etc.
- Materia orgánica: refiere a componentes vegetales de distintos tamaños y formas.

**1.5.1.2 Plasticidad.** Es una propiedad física que describe su capacidad para deformarse sin romperse cuando contiene cierta cantidad de agua. Es una característica importante especialmente en suelos finos como los arcillosos. Según el MTC (2014), los límites de consistencia o límites de Atterberg establecen cuan sensible es el comportamiento de un suelo en relación con su contenido de humedad. Los límites correspondientes a los tres estados de consistencia (líquido, plástico o sólido) según su humedad. Los límites son:

- Límite Líquido (LL): Es el contenido de agua a partir del cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido.
- Límite Plástico (LP): Es el contenido de agua en el cual el suelo deja de comportarse como plástico y empieza a quebrarse al ser moldeado en hilos delgados, es decir, pasa de un estado plástico a semisólido.
- Límite de contracción (LC): Es el contenido de agua a partir del cual el suelo ya no se encoge más al perder agua, es decir, pasa de un estado semisólido a un estado sólido.

El Índice de Plasticidad (IP) se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ( $IP = LL - LP$ ), y representa el rango de humedad en el cual un suelo exhibe comportamiento plástico. En la **Tabla 1** se presenta la caracterización de los suelos según su valor de IP.

**Tabla 1***Caracterización de los suelos según su IP*

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

*Nota. Adaptado de Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.*

**1.5.1.3 Compactibilidad.** La compactibilidad es una propiedad que indica la capacidad del suelo para ser comprimido hasta su máxima densidad, alcanzando su humedad óptima correspondiente (Morocho y Casaverde, 2022).

Este parámetro es significativo debido a la estrecha relación que existe entre la densidad y la porosidad del suelo (Morocho y Casaverde, 2022). Una densidad adecuada contribuye a la estabilidad estructural del terreno, facilitando su resistencia a cargas externas. Además, influye en la capacidad del suelo para retener y transmitir agua, afectando su comportamiento hidráulico.

**1.5.1.4 Cohesión.** La cohesión es una propiedad que refleja la capacidad del suelo para mantener unidas sus partículas ante un esfuerzo de tensión (Morocho y Casaverde, 2022). Esta característica está determinada por las propiedades adhesivas o de unión de las partículas finas del suelo (Morocho y Casaverde, 2022). Su magnitud depende de factores como el contenido de agua y el tipo de minerales presentes en el suelo.

### **1.5.2 Clasificación de Suelos**

**1.5.2.1 Sistema de clasificación AASHTO.** Sistema de clasificación de suelos desarrollado inicialmente con finalidad de aplicación en carreteras, publicado hacia 1929 como Road Administration Classification System. Los suelos son clasificados según 7 grupos desde A-1 hasta A-7 según su según los siguientes criterios: Tamaño de grano, grava (pasa tamiz 75mm y retenido en el N°10), arena (pasa tamiz N°10 y retenido en el N°200) y limos y arcillas (pasa tamiz N°200); Plasticidad, cuando el IP es 10 o menos se define como limoso y cuando el IP es 10 o más se define como arcilloso.

La clasificación según el sistema AASHTO se organiza en siete grandes grupos, que van desde el A-1 hasta el A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son suelos granulares, con un 35% o menos de partículas que pasan por la malla N°200. En contraste, los suelos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son suelos de material limoso y/o arcilloso. Los suelos se clasifican en A-7-5 cuando el índice plástico (IP) es menor o igual al límite líquido (LL) menos 30 ( $IP \leq LL-30$ ), y en A-7-6 cuando el índice plástico es mayor que el límite líquido menos 30 ( $IP > LL-30$ ).

Para la clasificación AASHTO, se emplean los siguientes criterios:

- **Tamaño del grano:** En los suelos se distinguen tres tamaños: grava, arena y limos. Si se encuentran partículas con tamaños mayores a 75 mm, se debe registrar la cantidad presente.
- **Plasticidad:** En el caso de que el índice de plasticidad sea inferior o igual a 10, se denomina limo; en el caso de la arcilla el índice de plasticidad es superior a 10.
- **Índice de Grupo (IG):** Para evaluar la calidad del suelo, se emplea la siguiente fórmula.

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(WI - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (1)$$

Donde:

**F:** Porcentaje que pasa por 0.08 mm, expresado en números enteros.

**WI:** Límite líquido.

**IP:** Índice de plasticidad.

En la **Tabla 2** y **Tabla 3** se presenta la clasificación de suelos mediante la clasificación de suelos por el método de AASHTO.

**Tabla 2**  
*Clasificación según AASHTO de Materiales Granulares*

Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos del total pasa el Tamiz N° 200)						
	A-1		A-3	A-2			
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Porcentaje de Material que pasa el Tamiz							
N° 10	50 Máx.	50 Máx.					
N° 40	30 Máx.	50 Máx.	51 Mín.				
N° 200				35 Máx.	35 Máx.		
Características de la fracción que pasa el Tamiz N° 40							
L. Líquido (LL)				40 Máx.	41 Mín.	40 Máx.	41 Mín.
I. Plasticidad (IP)		6 Máx.	N P	10 Máx.	10 Máx.	11 Mín.	11 Mín.
Tipo usual de material significativo constituyente	Fragmento de Piedra Arena Gruesa		Fineza	Grava y arena arcillosa color plata			
Calificación	Bueno, excelente.						

*Nota.* Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014)

**Tabla 3**  
*Clasificación según AASHTO de Materiales Limo-Arcillosos*

Clasificación General	Materiales Limo-Arcillosos (35% o menos del total pasa el Tamiz N° 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 / A-7-6
Porcentaje de Material que pasa el Tamiz				
N° 10				
N° 40				
N° 200	36 Mín.	36 Mín.	36 Mín.	36 Mín.
Características de la fracción que pasa el Tamiz N° 40				
L. Líquido (LL)	40 Máx.	41 Mín.	40 Máx.	41 Mín.
I. Plasticidad (IP)	10 Máx.	10 Máx.	11 Mín.	11 Mín.
Tipo usual de material significativo constituyente	Suelo Color Plata		Suelo Arcilloso	
Calificación	Regular, Pobre, Malo.			

*Nota.* Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014)

**1.5.2.2 Sistema de clasificación SUCS.** Propuesto originalmente por Arthur Casagrande en el año 1942, desarrollado inicialmente para el Cuerpo de Armada de Ingenieros con el fin de usarlo en las construcciones de campos de aterrizaje hacia finales de la Segunda Guerra Mundial. Actualmente es el más utilizado, ASTM lo designa como D-2487. Se divide principalmente en 2 grupos:

- **Grano Grueso:** En este grupo se encuentran las gravas y arenas naturales con menos del 50% que pasa el tamiz N°200. Los símbolos de este grupo son los prefijos G: gravas o S: arenas.
- **Grano Fino:** Suelos que pasan más del 50% a través del tamiz N°200. Los símbolos de este grupo son los prefijos M: limos inorgánicos, C: arcillas inorgánicas, O: limos y arcillas orgánicos y PT: turba, estiércol y cualquier otro suelo altamente orgánico.

El procedimiento de clasificación SUCS comienza dividiendo el suelo en dos fracciones principales, basadas en la cantidad de material que pasa a través de la malla N°200. Si la malla retiene más del 50% en peso del material, se considera un suelo de partículas gruesas. Si más del 50% en peso pasa a través de la malla, se clasifica como suelo de partículas finas.

En suelos de partículas gruesas, la clasificación en arena o grava se basa en la cantidad de material que pasa a través de la malla N°4. Si más de la mitad de la fracción gruesa pasa por esta malla, se considera arena; de lo contrario, se clasifica como grava. En suelos de partículas finas, el material que pasa por la malla N°200 representa menos del 5% en peso del material.

Una adecuada gradación de los suelos se alcanza cuando los espacios entre las partículas gruesas son llenados por granos finos. De lo contrario, se obtiene una granulometría discontinua, lo que indica un suelo mal graduado. Este tipo de suelo no es recomendable debido a la alta proporción de vacíos que presenta.

En el caso de que el porcentaje de finos pase por la malla N°200 en suelos gruesos es mayor al 12%, estos se clasifican según el contenido y la naturaleza del material fino, pudiendo ser limo y/o arcilla (Ravines, 2010). Si el porcentaje que pasa por la malla N°200 está en el intervalo del 5% al 12%, se requiere el uso de una doble simbología.

Para determinar correctamente la clasificación, es esencial seguir las especificaciones del SUCS en cada caso, las cuales se detallan en la **Tabla 4** y **Tabla 5**.

El análisis granulométrico y los límites de consistencia son fundamentales para esta metodología, estos parámetros nos sirven para una evaluación precisa y estandarizada del comportamiento de los suelos.

El sistema de clasificación de SUCS proporciona una nomenclatura uniforme para suelos gruesos y fino, de esta forma, se facilita su identificación en proyectos de ingeniería y construcción.

**Tabla 4**  
*Clasificación según SUCS de Suelos de Partículas Gruesas*

Tipo de Suelo	Criterios de Clasificación	Clasificación de Suelos	
		Grupo	Nombre del Grupo
Suelos de Partículas Gruesas	Gravas Limpias Menos del 5% pasa el Tamiz N° 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW Grava bien graduada
		$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP Grava mal graduada
Más del 50% es retenido en el Tamiz N° 200	Gravas con Finos Más del 12% pasa el Tamiz N° 200	$IP < 4$ o debajo de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	GM Grava limosa
	<b>Gravas</b>	$IP > 7$ o arriba de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	GC Grava arcillosa
Entre el 5 y 12% pasa el Tamiz N° 200	Gravas Limpias con Finos	Cumple los criterios para GW y GM	GW - GM Grava bien graduada con limo
		Cumple los criterios para GW y GC	GW - GC Grava bien graduada con arcilla
		Cumple los criterios para G P y GM	GP - GM Grava mal graduada con limo

Tipo de Suelo	Criterios de Clasificación	Clasificación de Suelos		
		Grupo	Nombre del Grupo	
Arenas		Cumple los criterios para GP y GC	GP - GC	Grava mal graduada con arcilla
	Arenas Limpias Menos del 5% pasa el Tamiz N° 200	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
		$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
	Arenas con Finos Más del 12% pasa el Tamiz N° 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	SM	Arena limosa
		IP > 7 o arriba de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	SC	Arena arcillosa
		Cumple los criterios para SW y SM	SW - SM	Arena bien graduada con limo
	Arenas Limpias con Finos Entre el 5 y 12% pasa el Tamiz N° 200	Cumple los criterios para SW y SC	SW - SC	Arena bien graduada con arcilla
		Cumple los criterios para SP y SM	SP - SM	Arena mal graduada con limo
		Cumple los criterios para SP y SC	SP - SC	Arena mal graduada con arcilla

Nota. Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014).

**Tabla 5**  
Clasificación según SUCS de Suelos de Partículas Finas

Tipo de Suelo	Criterios de Clasificación	Clasificación de Suelos			
		Grupo	Nombre del Grupo		
Suelos de Partículas Finas	Inorgánicos	IP > 7 o arriba de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	CL	Arcilla de baja plasticidad	
		IP < 4 o debajo de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	ML	Limo de baja plasticidad	
	Orgánicos	L.Líquido - Secado al horno < 0.75	OL	Arcilla orgánica	
		L.Líquido - No Secado		Limo orgánico	
	El 50% o más pasa el Tamiz N° 200	Inorgánicos	IP > 7 o arriba de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	CH	Arcilla de alta plasticidad
			IP < 4 o debajo de la línea "A" en la Carta de Plasticidad	MH	Limo de alta plasticidad
Orgánicos		L.Líquido - Secado al horno < 0.75	OH	Arcilla orgánica	
		L.Líquido - No Secado		Limo orgánico	
Suelos Altamente Orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro	PT	Turba		

Nota. Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014).

## 1.6 Pavimentos

Los pavimentos son estructuras diseñadas a partir de capas superpuestas cuya función principal es soportar y distribuir eficientemente las cargas vehiculares hacia el terreno, asegurando estabilidad y seguridad. Estas capas trabajan en conjunto para ofrecer una superficie resistente que pueda soportar el tránsito constante sin deteriorarse rápidamente. Además, su objetivo es proporcionar una superficie cómoda y segura para los usuarios, contribuyendo al flujo eficiente del tránsito vehicular.

La composición de los pavimentos varía según su clasificación y uso previsto, pero generalmente incluyen una capa de rodadura, que está en contacto directo con los vehículos, una base que proporciona soporte intermedio y una subbase que distribuye las cargas hacia la subrasante. Estas capas son seleccionadas y diseñadas según las condiciones del suelo, el clima y el volumen de tráfico esperado, garantizando su durabilidad y funcionalidad a largo plazo.

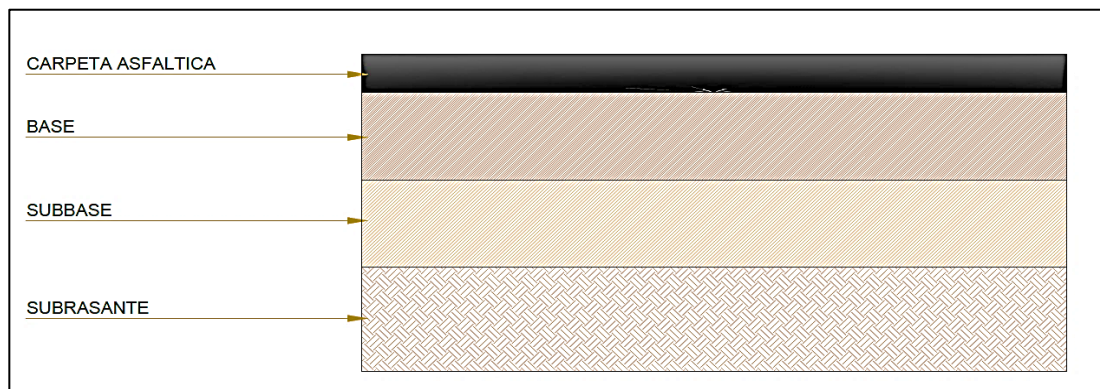
### 1.6.1 Clasificación de Pavimentos

Los pavimentos se clasifican en cuatro tipos según sus materiales y estructura: flexible, rígido, semirrígido y articulado.

**1.6.1.1 Pavimento Flexible.** El pavimento consta de una capa superior de concreto asfáltico (agregado pétreo + asfalto), apoyada sobre capas de menor rigidez compuestas por materiales granulares no tratados. Todo el paquete estructural (capa asfáltica + base + subbase) descansa sobre la subrasante. Los esfuerzos se transmiten mediante la disipación de tensiones, reduciendo presiones con la profundidad. Esta estructura distribuye uniformemente las cargas vehiculares, asegurando estabilidad y evitando deformaciones gracias a la subbase. El uso de materiales adecuados en cada capa garantiza durabilidad y reduce costos de mantenimiento. Una correcta compactación durante la construcción es clave para un desempeño óptimo del pavimento.

**Figura 1**

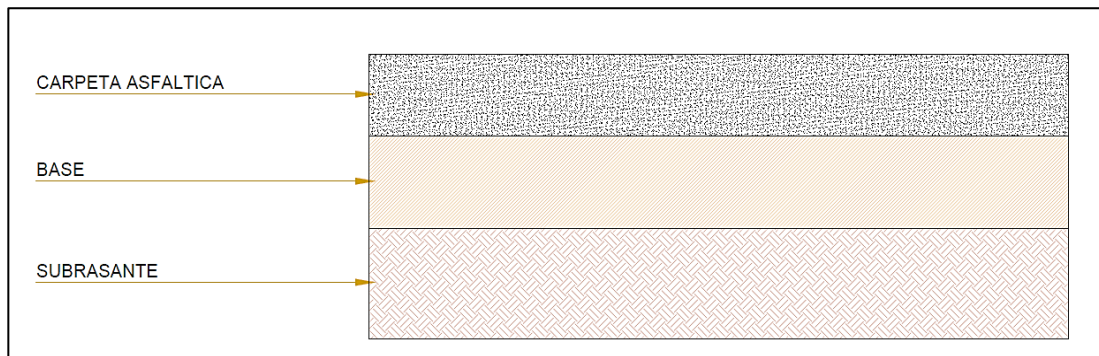
*Pavimento Flexible*



**1.6.1.2 Pavimento Rígido.** Su superficie de rodadura es una losa de concreto hidráulico soportada sobre una subbase y esta a su vez por una subrasante. Su mecanismo de transmisión es la distribución de tensiones, pues la mayor parte de esfuerzos es disipada por la losa, esta cuenta con un gran modulo elástico que permite que los esfuerzos inducidos por el tráfico sean atenuados por flexión por sí misma y los esfuerzos por compresión se distribuyan en un área amplia y se transmitan al suelo en magnitudes muy pequeñas.

**Figura 2**

*Pavimento Rígido*

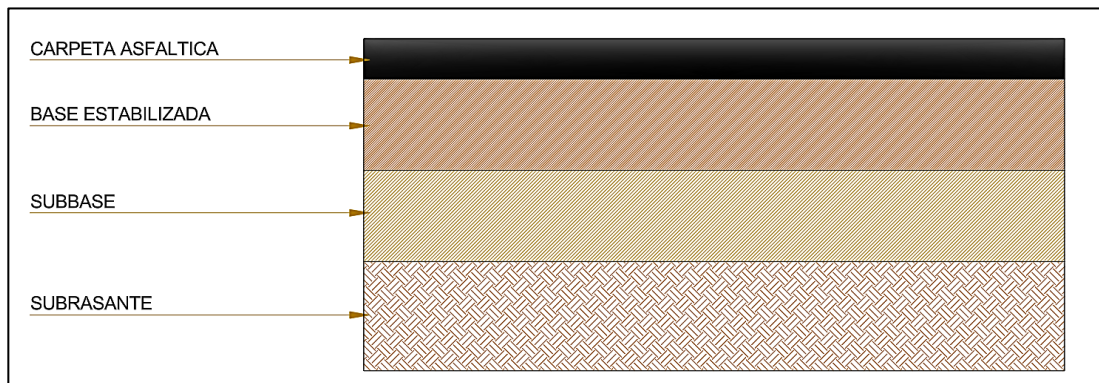


**1.6.1.3 Pavimento Semirrígido.** Se compone superficialmente por una capa asfáltica apoyada sobre una base estabilizada (con cal, cemento, asfalto, etc.) seguida por una subbase y una subrasante. La transmisión de esfuerzos es por disipación y distribución, por ello se considera que tienen un comportamiento mixto.

Este tipo de pavimento combina la flexibilidad del asfalto con la rigidez de la base estabilizada, ofreciendo mayor resistencia al agrietamiento. Es adecuado para soportar cargas pesadas y repetitivas, siendo común en vías de tráfico intenso. Además, permite un mantenimiento más económico en comparación con pavimentos completamente rígidos.

**Figura 3**

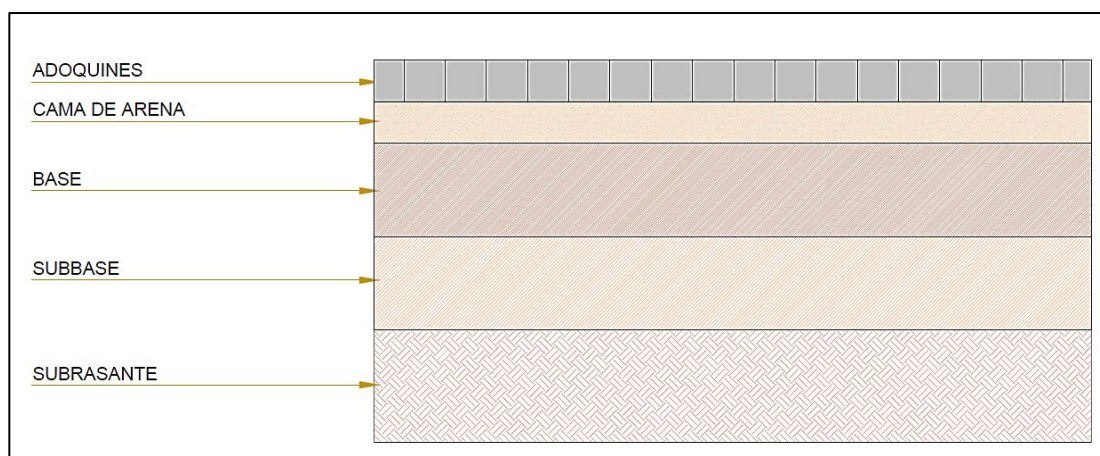
*Pavimento Semirrígido*



**1.6.1.4 Pavimento Articulado.** Conformada superficialmente por elementos individuales rígidos prefabricados ligados entre sí por un material sellante para retener estos se cuenta con una cama de arena y un codón lateral, que impiden el desplazamiento de los adoquines, y como soporte se cuenta con base y subbase, y por último se cuenta con una subrasante. Su transmisión de esfuerzos dependerá de si la base es o no es tratada, su comportamiento será semejante a un flexible si se cuenta con una base no tratada y similar a un semirrígido con una base tratada. Estos pavimentos son utilizados en zonas urbanas debido a su facilidad de instalación y mantenimiento.

**Figura 4**

*Pavimento Articulado*



## 1.6.2 Componentes de los Pavimentos

**1.6.2.1 Subrasante.** Se puede definir como la fundación del pavimento ya que soporta las cargas que transmite toda la estructura de pavimentación, entre mejor calidad se tenga en esta capa tendremos que el espesor del paquete estructural será reducido teniendo un ahorro en costos sin dejar de lado la calidad. Para tener un buen comportamiento de toda la estructura es clave que se tenga una buena compactación de la capa de subrasante, se debe analizar si se cuenta con un buen material en sitio o si es necesario un mejoramiento previo a compactación.

**1.6.2.2 Subbase.** También tiene como función la distribución y transmisión de cargas para que la subrasante pueda soportar, se puede utilizar como capa de drenaje utilizando material granular y controlar así el movimiento ascendente del agua en los vacíos presentes. En el caso del pavimento flexible se encuentra por debajo de la base y puede ser de una menor calidad que la subbase al soportar menores cargas. Por otro lado, en pavimento rígido se coloca entre la subrasante y losa de concreto, debe permitir el drenaje libre o ser altamente resistente a la erosión con el fin de prevenir el bombeo.

**1.6.2.3 Base.** Función principal de distribuir y transmitir las cargas del tráfico a las capas inferiores, debido a que es la continua a la capa de rodadura debe contar con una alta capacidad de deformación. Puede ser constituida por materiales no tratados, refiere a agregados pétreos y finos naturales cuya resistencia a la deformación se determina exclusivamente por el rozamiento de sus partículas; tratados, suelos con mejoramiento de propiedades mecánicas ya que se les incorpora productos aditivos que generan cambios físicos y químicos en el suelo.

## **1.7 Parámetros de análisis de la Subrasante**

### **1.7.1 Humedad óptima y Máxima Densidad Seca (MDS)**

El contenido de humedad óptima es un factor crucial en diseños ingenieriles ya que desencadena una reacción mecánica a la carga de peso, es decir, influye directamente en la capacidad soporte y la compactación del terreno, evitando así asentamientos indeseables durante el proceso de construcción y servicio. La MDS y el contenido óptimo de humedad están directamente relacionados, pues la MDS se logra a partir de aplicar cierta energía de compactación a un suelo que presente el contenido óptimo de humedad.

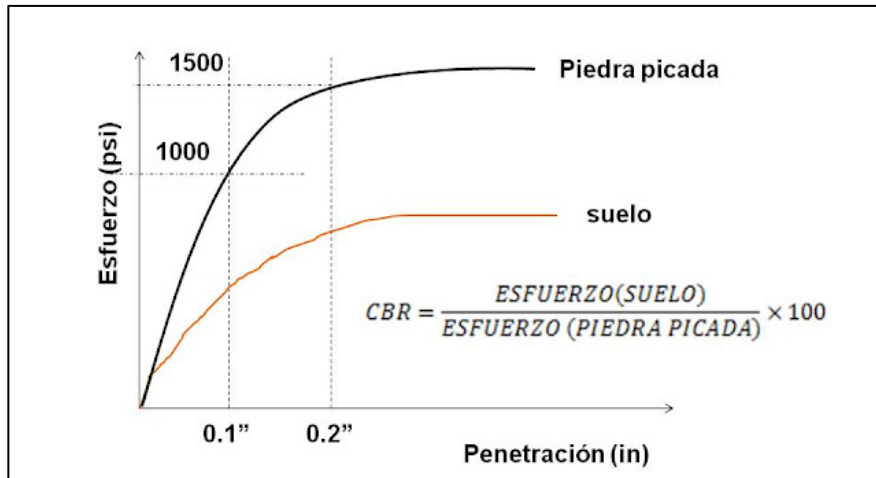
Para el caso de estabilización de suelos con cal y/o cemento, un contenido de humedad suficiente es esencial no sólo para que se lleve a cabo el proceso de hidratación sino también para una compactación eficiente. El cemento completamente hidratado absorbe aproximadamente el 20% de su propio peso de agua del entorno; Por otro lado, la cal viva (CaO) absorbe aproximadamente el 32% de su propio peso de agua del entorno. Un contenido de humedad insuficiente hará que los aglutinantes compitan con los suelos para ganar estas cantidades de humedad. Para suelos con gran afinidad por el agua (como arcilla, turba y suelos orgánicos), el proceso de hidratación puede retrasarse debido a un contenido de humedad insuficiente, lo que en última instancia afectará la resistencia final.

### **1.7.2 California Bearing Ratio (CBR)**

Es una prueba de resistencia simple a la penetración bajo condiciones controladas de densidad y humedad, que compara la capacidad de carga de un material con la de una piedra triturada bien graduada. Este ensayo utilizado para evaluar la resistencia potencial de un material fue desarrollado por la División de Carreteras del estado de California en 1930, hoy en día es un método de prueba de laboratorio que se puede encontrar normado en *ASTM D1883* y *AASHTO T193* como un método empírico simple. El valor CBR obtenido permite clasificar suelos y materiales en función de su capacidad para soportar cargas.

Esta prueba es ampliamente utilizada en el diseño de pavimentos, ya que permite determinar los espesores requeridos de sus distintas capas. Consiste en medir la penetración de un pistón bajo condiciones de humedad controlada. Gracias a su facilidad de ejecución, se ha convertido en un procedimiento estándar en los proyectos de infraestructura vial.

**Figura 5**  
Gráfica del Ensayo CBR



*Nota.* Extraído de Blog Ramcodes.

Para el cálculo del CBR de subrasante se debe tener en cuenta lo siguiente.

- Si existen sectores con 6 o más valores de CBR en secciones homogéneas, entonces se determina el valor de CBR de diseño considerando el promedio total de los valores analizados.
- Si existen menos de 6 valores de CBR, se debe tener en cuenta que: si son valores similares, se toma el valor promedio; si no son valores cercanos, se debe tomar el valor más crítico o en todo caso subdividir en subsectores (con longitud no menor a 100m) y definir el valor promedio.

Una vez obtenido el CBR de diseño se clasifica el suelo según la **Tabla 6** establecida por el MTC:

**Tabla 6**  
*Categorías de la subrasante*

CBR	CATEGORÍA DE SUBRASANTE
CBR < 3%	Subrasante Inadecuada
3% ≤ CBR < 6%	Subrasante Pobre
6% ≤ CBR < 10%	Subrasante Regular
10% ≤ CBR < 20%	Subrasante Buena
20% ≤ CBR < 30%	Subrasante Muy Buena
CBR ≥ 30%	Subrasante Extraordinaria

*Nota.* Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014)

Se establece que en caso se tenga una subrasante pobre o inadecuada, se realice algún proceso de estabilización de suelos, elevación de rasante o cambio de trazo, según lo más conveniente técnica y económicamente.

## **1.8 Estabilización de Suelos**

Metodologías que tienen como objetivo la mejora de las propiedades ingenieriles del suelo, principalmente para la mejora de los parámetros de resistencia al corte del suelo y aumentando así la capacidad portante del suelo. Se utiliza para reducir la permeabilidad y compresibilidad de la masa del suelo en las estructuras de la tierra y para aumentar la resistencia al corte y, por lo tanto, reducir el asentamiento de estructuras.

### **1.8.1 Estabilización Mecánica**

La estabilización mecánica es el proceso de mejorar las propiedades del suelo cambiando su gradación. Este proceso incluye la compactación y densificación del suelo mediante la aplicación de energía mecánica mediante diversos tipos de rodillos, apisonadores, técnicas de vibración y, en ocasiones, voladuras. La estabilidad del suelo en este método depende de las propiedades inherentes del material del suelo. En este tipo de estabilización se puede realizar la mezcla dos o más tipos de suelos naturales para obtener un material compuesto superior a cualquiera de sus componentes, o incluso el reemplazo total del suelo. La estabilización mecánica se logra mezclando suelos de dos o más gradaciones para obtener un material que cumpla con una granulometría completa y las especificaciones requeridas.

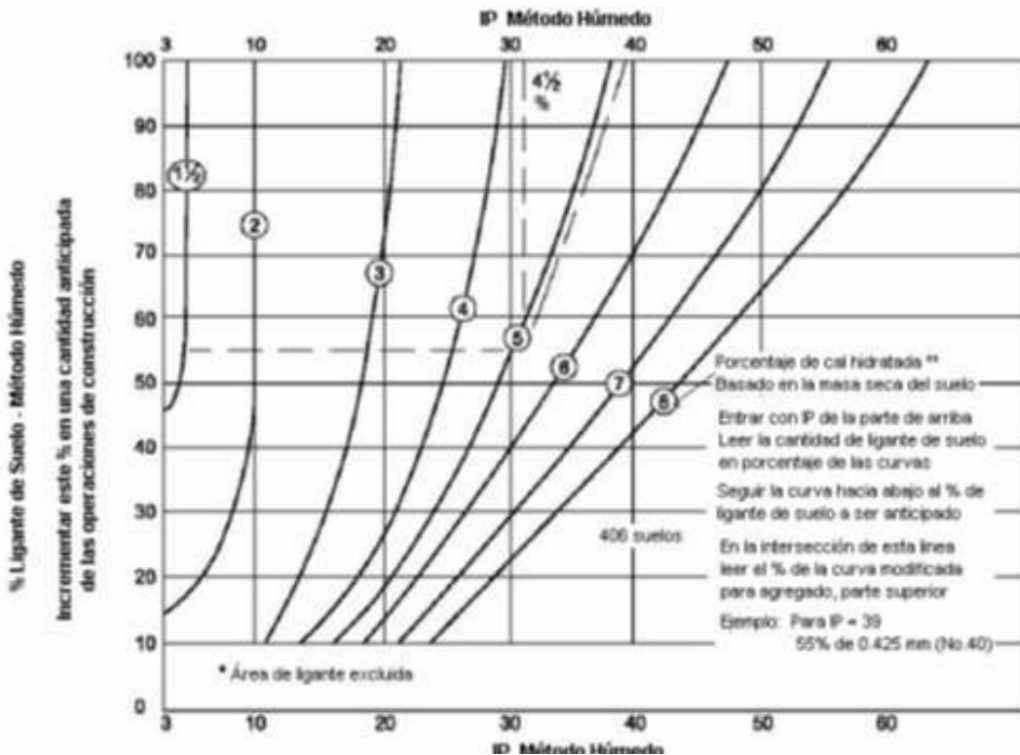
### **1.8.2 Estabilización Química**

**1.8.2.1 Estabilización de suelos con Cal.** Es un tipo de estabilización económica. Los tipos de cal utilizados con mayor frecuencia son cal hidratada con alto contenido de calcio, cal dolomita monohidratada, cal viva calcita y cal dolomita; de estas la más usada es la cal viva, debido a que presenta ventajas sobre la cal hidratada como por ejemplo: mayor contenido de cal libre disponible por unidad de masa – más densa que la cal hidratada (requiere menos espacio de almacenamiento) y menos polvo – genera calor que acelera la ganancia de resistencia y una gran reducción en el contenido de humedad.

El porcentaje que se utiliza en la mayoría de estabilización va en el rango del 5% al 10%. Su aporte se da principalmente en suelos arcillosos, ya que los vuelve menos susceptibles a los cambios en el contenido de agua. La cal no solo realiza un aporte en la disminución de suelos plásticos, sino que también describe un aumento en la resistencia provocado por la capacidad de intercambio catiónico en lugar del efecto cementante provocado por la reacción puzolánica.

Figura 6

Porcentaje de cal recomendado según IP.



Nota. Extraído de Manual de Ensayo de Materiales.

La tecnología de estabilización con cal se utiliza principalmente en aplicaciones geotécnicas y ambientales. Algunas de las aplicaciones incluyen encapsulación de contaminantes, renderizado de relleno (por ejemplo, suelo cohesivo húmedo), cobertura de carreteras, estabilización de pendientes y mejora de cimientos, como el uso de pilotes de cal.

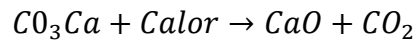
Según lo mencionado se entiende que la cal tiene un espectro de aplicación que se extiende mucho más hacia los materiales más arcillosos que el cemento y, en contrapartida, se extiende algo menos hacia los materiales granulares de naturaleza friccional.

La cal viva se produce mediante la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza -  $\text{CaCO}_3$ ) en óxido de calcio. Por otro lado, la cal hidratada se forma cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua, lo que permite que esta reaccione con las partículas arcillosas y las transforme permanentemente en una matriz cementante (LIME, 2004).

La cal más comúnmente utilizada en el tratamiento de suelos es la cal alta en calcio, que contiene un máximo de 5% de óxido o hidróxido de magnesio (LIME, 2004). Sin embargo, en ocasiones se utiliza cal dolomítica, que contiene entre un 35% y un 46% de óxido o hidróxido de magnesio. En este último caso, la fracción de magnesio reacciona más lentamente que la fracción de calcio como agente estabilizante.

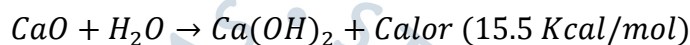
- **Cales Vivas.**

La cal viva es un tipo de cal aérea compuesta principalmente por óxido de calcio y óxido de magnesio, que se produce mediante la calcinación de la caliza.



La cal viva se comercializa en forma de gránulos o polvo molido. Cuando la cal viva entra en contacto con el agua, experimenta una reacción exotérmica intensa y se hidrata. En el caso de utilizar calizas que contienen carbonato de magnesio, la calcinación produce óxidos de calcio y magnesio. Si el porcentaje de óxido de magnesio en la cal viva es mayor al 5%, se le conoce como "cal dolomítica o dolomita calcinada" (Chávez y Odar, 2019).

- **Cales hidratadas**



La cal hidratada presenta menor reacción exotérmica en comparación con la cal viva al entrar en contacto con el agua.

- **Lechada de cal**

La lechada de cal puede ser producida a partir de la cal viva o la cal hidratada (LIME, 2004). Las instalaciones para la preparación de la lechada deben ser aprobadas por los ingenieros del proyecto. La lechada obtenida a partir de la cal viva suele estar caliente debido a la reacción exotérmica entre la cal viva y el agua, mientras que la lechada producida con cal hidratada no presenta este calentamiento.

La composición de la lechada de cal es del 42% de sólidos, aunque el porcentaje de cal puede variar según el tipo de suelo y el contenido de sólidos en la lechada.

El proceso de estabilización del suelo con cal ya sea viva o hidratada, es similar al proceso de estabilización con cemento (Chávez y Odar, 2019). Sin embargo, difieren en varios aspectos. En primer lugar, la cal se utiliza principalmente en suelos arcillosos, mientras que el cemento se emplea en suelos granulares. Además, el uso de la cal está ganando popularidad como pre-tratamiento en aplicaciones de estabilización de suelos.

Existen dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo. La primera reacción ocurre de manera inmediata e implica la captación de iones de calcio por las partículas del suelo, lo que afecta su doble capa y aumenta la concentración de cationes en el agua (Chávez y Odar, 2019). La segunda reacción es más gradual y es la reacción cementante propiamente dicha, aunque aún no se comprende completamente (Chávez y Odar, 2019). Durante esta reacción cementante se forman silicatos de calcio, cuya naturaleza depende del tipo de suelo involucrado, lo que diferencia significativamente la estabilización con cal de la estabilización con cemento.

Los ensayos de laboratorio para mezclas Suelo-Cal nos ayudan a determinar parámetros clave, como la resistencia, plasticidad y durabilidad, asegurando que las mezclas sean aptas para aplicaciones estructurales y de pavimentación.

Es por ello, que el MTC (2013) establece que el diseño de la mezcla se debe realizar de acuerdo con los siguientes ensayos y frecuencias detallado en la **Tabla 7**.

**Tabla 7**

*Ensayos y frecuencias de un suelo estabilizado con Cal*

MATERIAL O PRODUCTO	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS	METODO DE ENSAYO	FRECUENCIA (1)	LUGAR DE MUESTREO
Suelo Estabilizado con Cal	Granulometría	MTC E107	750 m <sup>3</sup>	Pista
	Índice Plástico	MTC E111	750 m <sup>3</sup>	Pista
	Relación Humedad Densidad	MTC E1102	750 m <sup>3</sup>	Pista
	Compresión Simple	MTC E1101 / E 11103	500 m <sup>3</sup>	Pista
	Compactación	MTC E117 / 124	Cada 250 m <sup>2</sup>	Pista
	Abrasión Los ángeles	MTC E 207	2000 m <sup>3</sup>	Cantera
	Materia Orgánica	AASHTO T 194	2000 m <sup>3</sup>	Cantera
	Durabilidad (2)	MTC E 209	2000 m <sup>3</sup>	Cantera

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

(2) Ensayo exigido para capas estructurales en zona con altitud mayor a 3 000 m.s.n.m.

*Nota.* Adaptado de Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

**1.8.2.2 Cal Útil Vial (CUV).** La Cal a diferencia de otros agentes estabilizantes, no reacciona en su totalidad cuando se mezcla con los suelos, lo que hace necesario determinar la cantidad que realmente participa en la reacción química.

Para ello, se recurre al ensayo de cal útil vial, que tiene como objetivo identificar la cantidad óptima de cal necesaria para mejorar de manera eficiente y económica las propiedades del suelo. Este ensayo permite evaluar la calidad de la cal utilizada, verificando su capacidad para mejorar características esenciales del suelo como la resistencia y la estabilidad. Es importante que la cal cumpla con ciertos parámetros de pureza y reactividad para asegurar que la mejora sea significativa y se logren los objetivos deseados.

**1.8.2.3 Estabilización de suelos con cemento.** Refiere a la unión de las partículas del suelo causada por la hidratación de las partículas de cemento que crecen hasta convertirse en cristales que pueden entrelazarse entre sí dando una alta resistencia a la compresión. Para lograr esta unión exitosa, las partículas de cemento deben cubrir en casi su totalidad las partículas del material, para proporcionar esto es necesario una buena mezcla entre el suelo y cemento, esto con una cierta distribución del tamaño de partículas. Así mismo, el suelo-cemento debe seguir un proceso de compactación para que el cemento llene el vacío entre las partículas del suelo, a continuación de esto se agrega el agua, causando que el cemento reacción y endurezca. Debido al endurecimiento se aumenta la resistencia al corte y la capacidad de carga.

La reacción del cemento no depende de los minerales del suelo y el papel clave es su reacción con el agua que puede estar disponible en cualquier suelo. Esta puede ser la razón por la que el cemento se utiliza para estabilizar una amplia gama de suelos. En el mercado se encuentran disponibles numerosos tipos de cemento; estos son el cemento Portland ordinario, el cemento de alto horno, el cemento resistente a los sulfatos y el cemento con alto contenido de alúmina.

La estabilización de cemento consta de varias etapas, la primera es la acción de la naturaleza fibrosa del silicato de calcio que se forma al momento de que los granos del cemento entran en contacto con el agua. Debido a esta reacción se forman fibras minúsculas que se unen unas con otras. Esta relación de agua y cemento reacciona con el suelo, en esta reacción los iones de calcio tienden agrupar las partículas del suelo cargadas negativamente produciéndose su floculación por efecto de la gravedad. Finalmente, al compactarse la mezcla se produce una reacción del calcio con sílice y alúmina de tamaños coloidales, produciéndose silicatos y aluminatos que aumenten la resistencia de la mezcla con el tiempo (Monteja, 2002).

La hidratación del cemento es un proceso complejo con una serie de reacciones químicas. Este proceso puede verse afectado por presencia de impurezas, relación  $a/c$ , temperatura de curado, presencia de aditivos, etc. Dependiendo de los factores involucrados, el efecto final sobre el fraguado y la ganancia de resistencia del suelo estabilizado puede variar. Los suelos estabilizados con cemento suelen tener las siguientes propiedades mejoradas: menor cohesividad (plasticidad), menos expansión de volumen o compresibilidad y mayor resistencia.

Los ensayos de laboratorio nos ayudan a entender el comportamiento del suelo a partir de la mezcla suelo cemento. De acuerdo con la PCA (Portland Cement Association) la cantidad de ensayos que se deben realizar en un proyecto depende de los requerimientos de construcción, la cantidad de suelos encontrados y la magnitud del proyecto.

**Tabla 8***Ensayos y frecuencias de un suelo estabilizado con Cal*

MATERIAL O PRODUCTO	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS	METODO DE ENSAYO	FRECUENCIA (1)	LUGAR DE MUESTREO
Suelo Estabilizado con Cemento Portland	Granulometría	MTC E107	750 m <sup>3</sup>	Pista
	Índice Plástico	MTC E111	750 m <sup>3</sup>	Pista
	Relación Humedad Densidad	MTC E1102	750 m <sup>3</sup>	Pista
	Compresión Simple	MTC E1101 / E 11103	2 muestras por día	Pista
	Compactación	MTC E117 / 124	Cada 250 m <sup>2</sup>	Pista
	Abrasión Los ángeles	MTC E 207	2000 m <sup>3</sup>	Cantera
	Durabilidad (2)	MTC E 209	2000 m <sup>3</sup>	Cantera
	Sulfatos	NTP 339.178	2000 m <sup>3</sup>	Cantera
	pH	NTP 339.073	2000 m <sup>3</sup>	Fuente de Agua
	Sulfatos	NTP 339.074	2000 m <sup>3</sup>	Fuente de Agua
Materia Orgánica	NTP 339.072	2000 m <sup>3</sup>	Fuente de Agua	

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

(2) Ensayo exigido para capas estructurales en zona con altitud mayor a 3 000 m.s.n.m.

Nota. Adaptado de Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)

Por otro lado, el MTC (2013) establece que el diseño de la mezcla se debe realizar de acuerdo con lo establecido en la PCA. Y el seguimiento de calidad de la mezcla y materiales se debe realizar siguiendo los siguientes ensayos y frecuencias especificados en la **Tabla 5**.

**1.8.2.3.1 Relación Humedad-Densidad.** Según la PCA (1992), la relación Humedad-Densidad en una mezcla suelo-cemento determina la relación entre la humedad contenida de la mezcla y la densidad resultante cuando la mezcla es compactada antes de la hidratación del cemento con una fuerza estándar de compactación.

Los efectos por la reacción química serán notados como un aumento en el contenido de humedad óptimo y una disminución en la densidad máxima del suelo-cemento a medida que el tiempo de la mezcla húmeda aumente. Es por esta razón que la PCA (1992) recomienda que los ensayos de laboratorio se deben hacer lo más rápido posible, ya que los testigos de muestreo se extraen unos pocos minutos después de haber mezclado el suelo, cemento y agua, y esto siendo antes de la hidratación del cemento.

Por otro lado, el MTC recomienda que la mezcla antes de ser humedecida debe ser homogénea. También exige que la humedad óptima debe ser la hallada con el ensayo establecido en el *ASTM D-558* o *MTC E-1102* permitiendo una tolerancia de  $\pm 1.5\%$ .

**1.8.2.3.2 Resistencia a la compresión no confinada.** Los ensayos de resistencia a la compresión según la PCA (1992) se deben realizar en especímenes que tengan la edad de 2, 7 y 28 días. También indica que deben ser almacenadas a temperatura ambiente y bajo humedad al 100% hasta el día de su ensayo, en el cual se le debe aplicar una tasa de carga de 20 libras por pulgada cuadrada por segundo, que es lo comúnmente utilizado.

El MTC brinda la norma *MTC E 1101* y la *MTC E 1103* para la preparación de los testigos. Además, menciona que se deben extraer 2 muestras diarias de mezcla elaborada in situ y de estas se deben moldear 3 probetas por cada muestra con la energía del ensayo de compactación para verificar la resistencia a los 7 días de curado. Los requisitos de resistencia para la aprobación del tramo son las siguientes:

- La resistencia individual de cada probeta ( $R_i$ ) debe ser mayor o igual que el 95% del valor de resistencia de diseño ( $R_d$ ):  $R_i \geq 0.95 R_d$
- La resistencia media de las seis o más extraídas en el día ( $R_m$ ) debe ser mayor o igual que el 100% de la resistencia de diseño ( $R_d$ ):  $R_m \geq R_d$

La USACE (U.S. Army Corps of Engineers) establece que se deben cumplir las siguientes resistencias a compresión mínimas, según se haya tratado una base o subbase en un pavimento flexible o rígido.

**Figura 7**

*Perdida máxima según el tipo de suelo*

Stabilized Soil Layer	Minimum Unconfined Compressive Strength, psi <sup>a</sup>	
	Flexible Pavement	Rigid Pavement
Base course	750	500
Subbase course, select material or subgrade	250	200

**1.8.2.3.3 Contracción en suelo cemento.** La contracción es un factor muy importante para cualquier elemento o estabilización que se quiera realizar con suelo-cemento, ya que una excesiva contracción producirá fisuras y grietas.

Generalmente los suelos adecuados para que no se genere contracción son los suelos que tienen una buena gradación, es decir, tienen tanta proporción de gruesos y finos. De la

misma manera su plasticidad debe aportar cierta cohesión a la mezcla, mejorando la trabajabilidad y aumentando el aislamiento térmico evitando así los agrietamientos.

## **1.9 Elaboración de cuerpos de prueba**

### **1.9.1 Probetas de Suelo - Cal**

El proceso de mezclado para suelo-cal en laboratorio, se debe asemejar lo más posible a la aplicación en campo de acuerdo con el Manual de estabilización de suelo tratado con cal (2004). Se realiza un mezclado y pulverizado uniforme previo a la adición de agua, es esencial que la cantidad de agua agregada sea la adecuada para asegurar la completa hidratación y llevar el contenido de humedad del suelo 3% arriba del óptimo, antes de empezar la compactación se debe asegurar que no hayan quedado remanentes de cal viva sin hidratar. En caso se observen exceso de cal sin agua de mezcla se debe agregar más agua y remezclar para asegurar la hidratación completa.

Al trabajar con arcillas muy plásticas, es ideal permitir un periodo de fraguado mínimo de 24 horas, en campo esto debe analizarse ya que la fragua en algunos casos puede extenderse hasta un período de 7 días. Una vez la mezcla haya fraguado debe volverse a mezclar uniformemente y proceder con la compactación para el ensayo.

### **1.9.2 Probetas de Suelo - Cemento**

La elaboración de cuerpos de ensayo para la mezcla suelo-cemento consiste en preparar una mezcla homogénea de suelo, cemento y agua en proporciones específicas y compactarla en moldes normalizados mediante equipos especializados. Es fundamental realizar una correcta selección y caracterización del suelo, controlar la cantidad de agua para obtener la humedad óptima, y compactar uniformemente para garantizar la reproducibilidad de los resultados. Este proceso permite evaluar propiedades mecánicas clave, como la resistencia a la compresión, y verificar el desempeño de la mezcla.

## Capítulo 2

### Descripción y presentación de resultados del Suelo Patrón

#### 2.1 Ubicación Geográfica

La región de Piura se encuentra ubicada al norte de Perú, al sur de la línea ecuatorial. Limita al norte con la región de Tumbes y la República del Ecuador; al este con la región de Cajamarca y la República del Ecuador; al sur con el departamento de Lambayeque y al oeste con el océano Pacífico (Rosales, 2016).

La presente tesis recopiló información del expediente técnico del proyecto "Rehabilitación del Camino de Servicio de los Canales Norte (KM. 0+000 - KM. 39+358) y Sur (KM. 0+000 - KM. 25+707)", el cual se ejecutó con el objetivo de restaurar la transitabilidad vehicular de los caminos de servicio del Canal Norte y Canal Sur, devolviéndolos a las condiciones anteriores al fenómeno de El Niño.

Los caminos de servicio del Canal Norte y Canal Sur se encuentran en los distritos de Marcavelica, Ignacio Escudero, Tamarindo, Amotape y La Huaca; dentro de las provincias de Sullana y Paita en la región de Piura. El tramo del Canal Norte comienza en el kilómetro 0+000 y finaliza en el kilómetro 39+781.91, mientras que el tramo del Canal Sur inicia en el kilómetro 0+000 y concluye en el kilómetro 25+756.56, como se muestra en la **Figura 8**.

#### Figura 8

*Tramos del Proyecto Canal Norte y Sur*



*Nota.* Adaptado de Expediente Técnico del proyecto.

#### 2.2 Análisis del tramo a intervenir

El objetivo del proyecto "Rehabilitación del camino de servicio de los Canales Norte y Sur" es recuperar la transitabilidad vehicular de estos caminos de servicio que se encontraban

habilitados en buenas condiciones antes del fenómeno del niño costero ocurrido en el año 2017.

El Canal Norte se encuentra conformado por material granular, el cual se ha clasificado por tres tipos de tramos. El primero, es el que se encuentra más desgastado, por ello el expediente técnico propuso corte y relleno hasta llegar a nivel de subrasante y en la parte superior colocar una capa de afirmado de espesor de 0.15m. El segundo corresponde a zonas donde las condiciones de rodadura no han sido muy afectadas por el FEN del año 2017, por lo que en estos tramos se ha planteado la conformación de la rasante mediante el corte y relleno. Y el tercer tramo corresponde a zonas donde no se va a intervenir, por ejemplo, cruce de quebradas, longitud de puentes vehiculares, tramos donde existe asfalto, etc.

En líneas generales se puede resumir que el estado superficial de la vía carrozable se encuentra a nivel de afirmado en un estado de regular a malo, presenta zonas con bacheo, encalaminados; de lo cual se indica que se han producido por las lluvias.

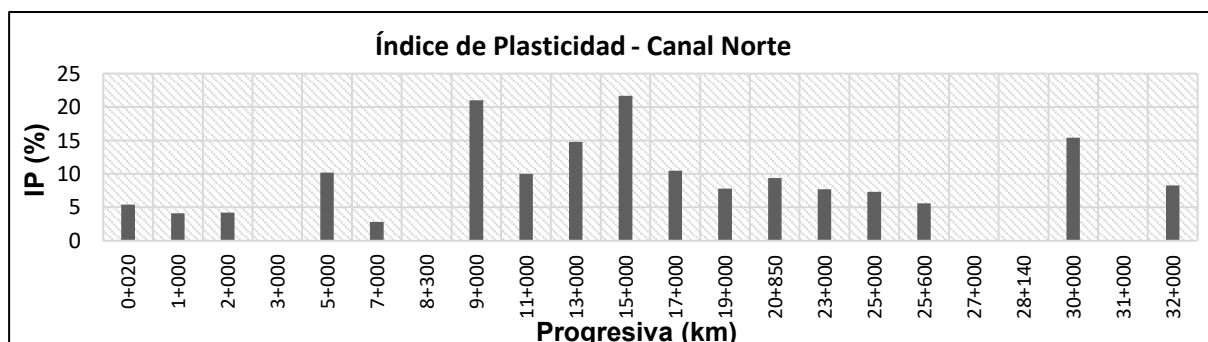
Según el expediente técnico para los 32 kilómetros de extensión del canal norte se realizaron calicatas cada 1.5 kilómetros, resultando un total de 22 calicatas. A las muestras extraídas se le realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Contenido de humedad de un suelo (NTP 339.127)
- Contenido de sales solubles en suelos (NTP 339.152)
- Análisis granulométrico (NTP 339.128)
- Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de suelos (NTP 339.129)
- Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (NTP 339.141)
- Ensayo CBR (Relación Soporte de California) (NTP 339.145)
- Peso Específico relativo de las partículas sólidas de un suelo (NTP 339.131)

A continuación, se muestran 2 gráficas resumen de los resultados de los ensayos: Límites de Atterberg y CBR, que nos brinda el estudio de mecánica de suelos del expediente.

**Figura 9**

*Índice de Plasticidad del Canal Norte*

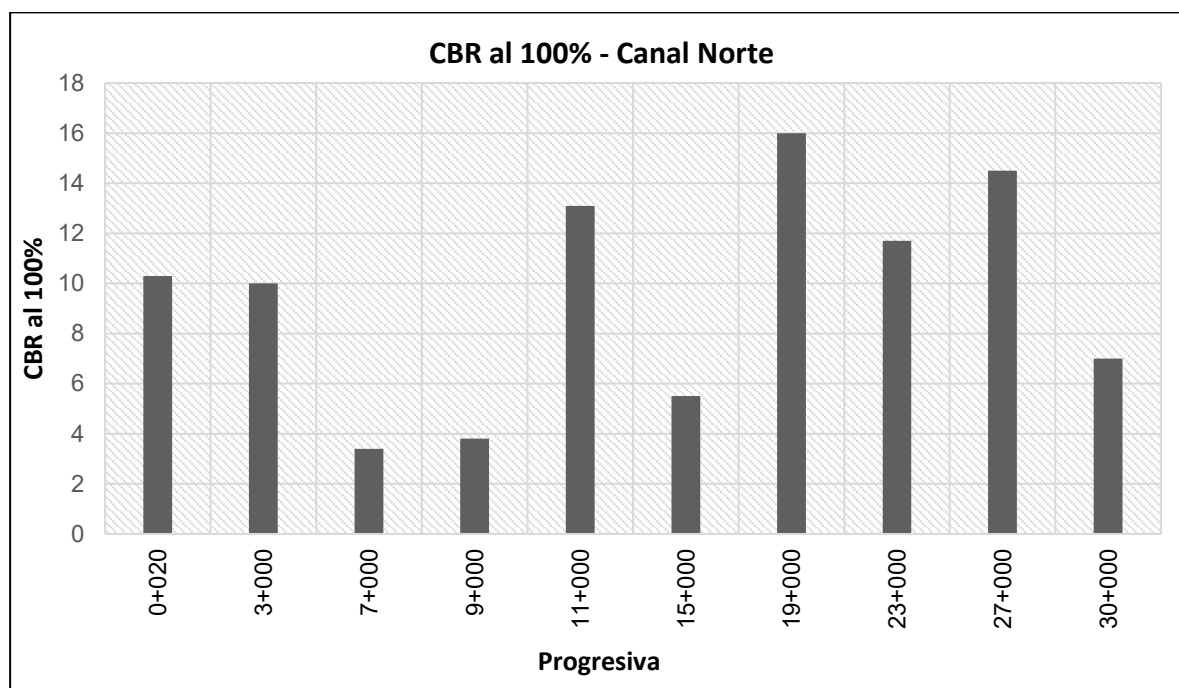


*Nota.* Adaptado de Expediente técnico del proyecto.

Se puede observar que se tiene 2 picos con plasticidad superior a 20%, así mismo que el tramo central tiene los valores más constantes y relativamente elevados. En este se presentan principalmente arcillas limosas y arenas arcillosas. Así mismo, en el expediente se menciona que de las constantes físicas de plasticidad en los suelos a nivel de subrasante se concluye existencia de suelos con un potencial de expansión medio.

**Figura 10**

*CBR al 100% en el Canal Norte*



*Nota.* Adaptado de Expediente técnico del proyecto.

Los tramos exteriores presentan valores de CBR mayor a 6% que representa un valor Regular a Bueno para su uso como subrasante, sin embargo, el tramo medio (comprendido entre las Pc 3+000-11+000) presentan un CBR menor al 6% que representa un valor Pobre para su uso como subrasante.

Se evidencia en la **Figura 9** y **Figura 10** que el suelo de la Prog. 9+000, presenta condiciones que justifican un proceso de mejoramiento, debido a su bajo índice de CBR y su alto índice de plasticidad (IP). Por esta razón, la presente investigación se centró en dicho tramo para su respectivo análisis, ya que, al ser el más crítico, resulta ideal para desarrollar un caso de estabilización de suelos. Este enfoque no solo permite abordar las deficiencias existentes, sino también generar un modelo aplicable a tramos con características similares.

### 2.3 Extracción de Muestras de Suelo Patrón

Para la presente investigación, se muestreo un suelo patrón próximo a la Prog. 9+000, como se detallan en las **Figura 11**.

**Figura 11**

*Calicata en Prog. 9 +500*



A continuación, en las **Figura 12** y **Figura 13** se muestra la calicata y las muestras extraídas de la Prog. 9+500 respectivamente.

**Figura 12**

*Calicata Prog. 9+500*



**Figura 13**  
*Muestras Prog. 9+500*



Ya con las muestras extraídas en sacos y posteriormente envueltas en papel film (**Figura 14**), para preservar sus características del material in situ, se procedió a trasladarlas al laboratorio para la realización de los ensayos base para su clasificación: granulometría y plasticidad.

**Figura 14**  
*Traslado de Muestras a LEMC*



## 2.4 Caracterización del Suelo Patrón

Al trabajar con un suelo notoriamente plástico (arcilloso), las muestras se encontraban en trozos de magnitud considerable, por lo que se procedió a chancar la muestra y tamizarla por la malla N°4 y posteriormente su almacenamiento en baldes.

**Figura 15**

*Tamizado de Material con Tamiz N° 4*



**Figura 16**

*Material Tamizado por Tamiz N° 4*



Posteriormente, se realizaron el ensayo de Análisis Granulométrico (NTP 339.128-1999) y el ensayo de los Límites de Atterberg (NTP 339.129-1999) a la muestra del suelo patrón. Esto ensayos se detallan en la **Tabla 9** y **Tabla 10** respectivamente.



**Tabla 10***Resultados del ensayo de los límites de Atterberg*

Constantes del Suelo	Valor
Límite Líquido (LL)	51.0 gr
Límite Plástico (LP)	23.0 gr
Índice Plástico (IP)	28.0 gr

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Posteriormente, se realizaron con los resultados obtenidos de los ensayos se realizó la clasificación del suelo patrón obteniendo detallado en la **Tabla 11**.

**Tabla 11***Descripción del suelo*

SUELO PATRÓN	
<b>Clasificación</b>	AASHTO A-7-6 (29)
<b>Descripción</b>	Muestra de color marrón amarillento claro, con presencia del 6% de arena fina y 94% de finos arcillosos de alta plasticidad.

Luego, de conocer la clasificación del Suelo Patrón (A-7-6 (17)), se evidencia que se tiene un suelo de naturaleza arcillosa, con alta plasticidad y probablemente limitada capacidad de soporte (CBR bajo), lo que lo convierte en un suelo ideal para la técnica de estabilización de suelos.

#### **2.4.1 Correlación sistemas AASHTO y SUCS aplicado al Suelo Patrón**

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) resume la correlación entre el sistema SUCS y AASHTO, tal como se muestra en **Tabla 12**.

**Tabla 12***Correlación de Tipos de suelos AASHTO-SUCS*

CLASIFICACIÓN DE SUELOS	
AASHTO	SUCS
AASHTO M-145	ASTM-D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

*Nota.* Adaptado de Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014)

Acorde a la **Tabla 12**, para el Suelo Patrón según AASHTO A-7-6 (17), le corresponde un suelo de tipo CH según el sistema SUCS (Unified Soil Classification System).

## 2.5 Propiedades y parámetros del Suelo Patrón

Según Houben y Guillar (1994), las propiedades del suelo son diversas y varían en importancia según su uso y aplicación. Algunas propiedades del suelo son más cruciales que otras, lo que permite definir cuatro propiedades fundamentales, mientras que las demás pueden considerarse generales o complementarias. En esta investigación se detallan las propiedades del suelo, de acuerdo con las características de los suelos analizados.

En particular, el suelo clasificado como CH bajo el sistema SUCS y A-7-6 (29) según el sistema AASHTO presenta las siguientes propiedades: un 7.3% de arena fina y un 92.7% de finos arcillosos de alta plasticidad, con un límite líquido (LL) de 51, un límite plástico (LP) de 23, y un índice de plasticidad (IP) de 28.

### 2.5.1 Textura del Suelo Patrón

La textura del suelo refleja su granulometría, es decir, la distribución del tamaño de las partículas sólidas que lo componen (Morocho y Casaverde, 2022). Esta distribución granulométrica determina el comportamiento del suelo, ya que diferentes distribuciones resultan en diferentes propiedades físicas y mecánicas. De tal forma que influyen en la estructura, retención de agua, lavado, capacidad de cambio y reserva de nutrientes.

### 2.5.2 Plasticidad del Suelo Patrón

La plasticidad es una propiedad que permite a los suelos deformarse hasta cierto límite sin romperse (Morocho y Casaverde, 2022). Este ensayo mide el comportamiento del suelo en términos de su capacidad para deformarse bajo diferentes condiciones de humedad y carga. Cuando el contenido de humedad del suelo es bajo, este se comporta de forma quebradiza; en el caso de que el contenido de humedad sea alto, el agua y el suelo pueden fluir como un líquido (Braja, 2015).

**a) Límite líquido (LL).** El límite líquido es el contenido de humedad del suelo en el que pasa del estado semilíquido a un estado plástico, permitiendo su moldeabilidad. En este estado, el suelo fluye muy poco al aplicarle una fuerza. Para la determinación del LL se emplea la norma *ASTM D-4318*.

**b) Límite plástico (LP).** El límite plástico es el contenido de humedad del suelo en el que pasa de un estado plástico semisólido a un estado en el que comienza a romperse. En este estado, el suelo puede ser arrollado escasamente en forma de fideo, con aproximadamente 3 mm de espesor.

**c) Límite de contracción (LC).** El límite de contracción es el contenido de humedad del suelo en el que pasa de un estado semisólido a un estado sólido, dejando de contraerse al perder humedad. Para la determinación del límite de contracción en laboratorio se llena un

plato de porcelanato de unos 44 mm de diámetro y aproximadamente 13 mm de altura (Braja, 2015).

La diferencia entre el LL y el LP es el Índice de Plasticidad (IP), que representa la sensibilidad del suelo a las variaciones de humedad. En la **Tabla 13** se observan los resultados del ensayo de plasticidad, donde se puede ver que se obtuvo un valor de  $IP=28$ . Este valor indica que estamos en presencia de un suelo de alta plasticidad, lo que sugiere que es predominantemente arcilloso.

**Tabla 13**

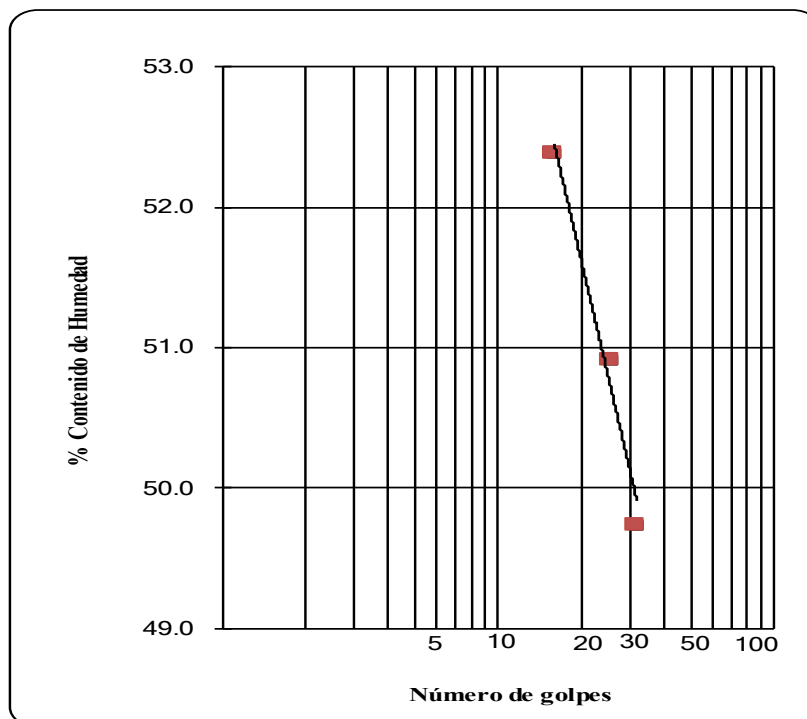
*Calificación de los suelos de acuerdo con su IP*

Índice de plasticidad	Plasticidad	Características	Resultado del Suelo Patrón
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos	IP=28
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos	
$IP \leq 7$	Baja	Suelos poco arcillosos	
$IP = 0$	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla	

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 18**

*Grafica % Humedad vs N° de Golpes*



*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 19**  
*Ensayo de Plasticidad*



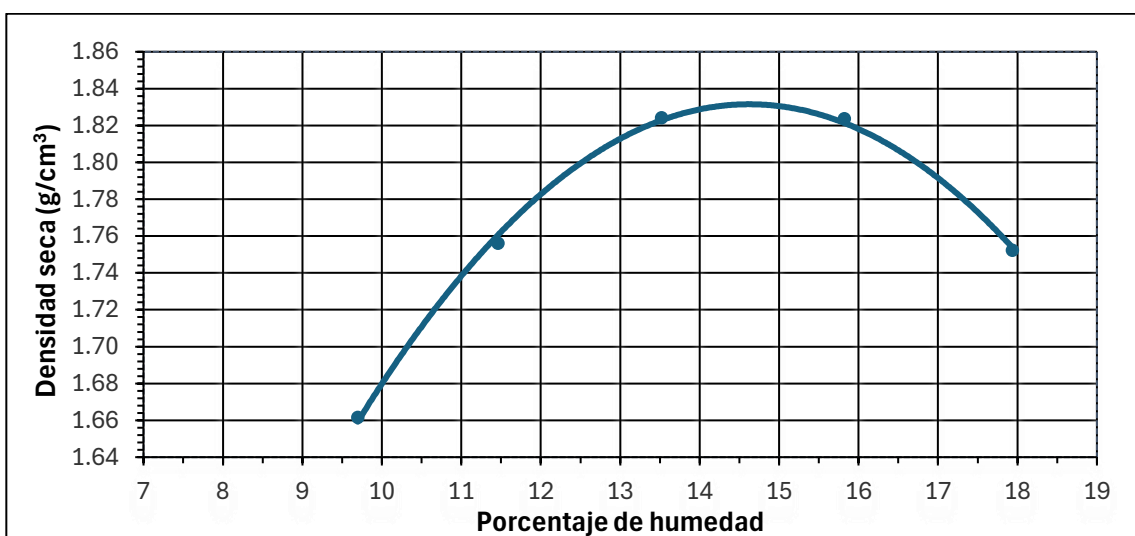
*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

## 2.6 Ensayo de Compactación Proctor Modificado del Suelo Patrón

Se realizó el presente ensayo para determinar la Máxima Densidad Seca (MDS) y la humedad de compactación ideal según una determinada energía de compactación con el fin de obtener el mejor desempeño por compactación de los materiales a utilizar en las capas de esta obra vial. Se ha utilizado el Proctor Modificado por el tipo de suelo que se encuentra en el sitio caracterizándose por ser altamente plástico. Para nuestro suelo se obtuvieron los siguientes resultados:

- Máxima densidad seca: 1.83 g/cm<sup>3</sup>
- Humedad óptima: 14.6 %

**Figura 20**  
*Curva de Compactación del Suelo Patrón*



*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 21***Muestras del Suelo Patrón para Ensayo Proctor*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

## 2.7 CBR del Suelo Patrón

Como ya se ha mencionado en el punto **1.4.8.** el CBR es una prueba de resistencia simple a la penetración bajo condiciones controladas de densidad y humedad. Se utiliza para medir las condiciones que presenta un suelo como subrasante definiéndola desde inadecuada hasta extraordinaria. Los resultados obtenidos del suelo extraído del camino de servicio se detallan en la **Tabla 14** a continuación:

**Tabla 14***Resultados del Ensayo CBR del Suelo Patrón*

<b>Espécimen</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.5	1.7	1.82
% de expansión con respecto de su altura inicial	11.06	7.66	6.57
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	2	3	4
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	2	3	3
Cantidad de sobrecarga	10 lb	10lb	10 lb

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 15***Resultados del Ensayo Proctor Modificado del Suelo Patrón*

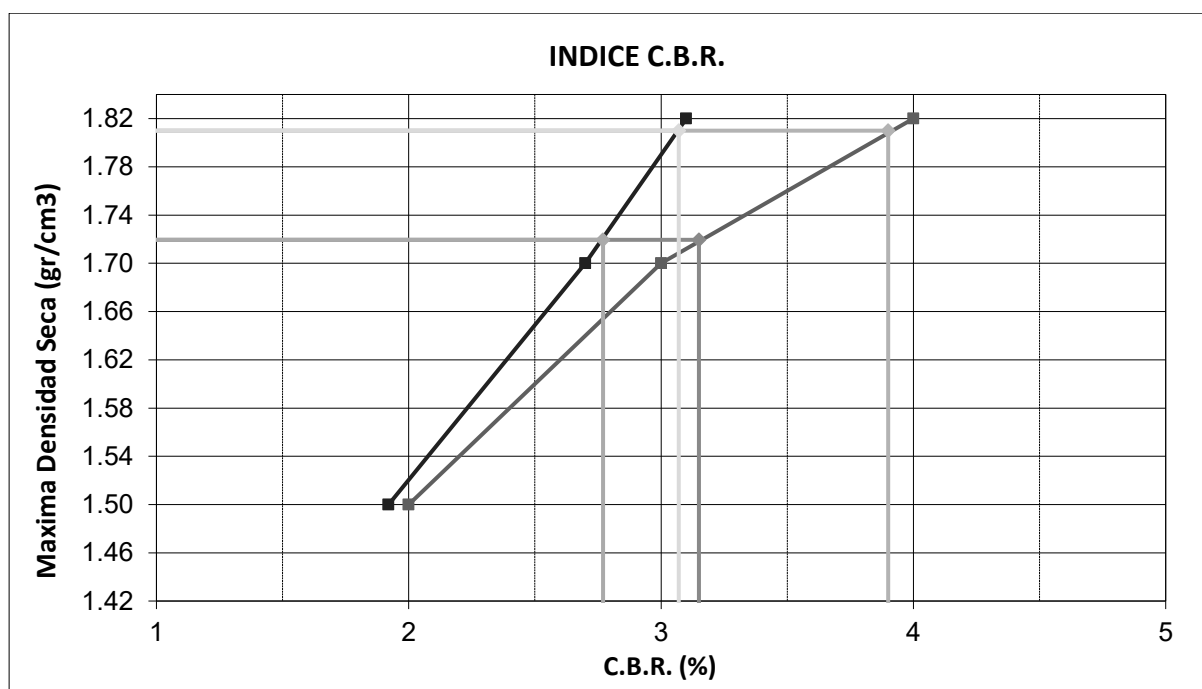
<b>Densidad Seca 100%</b>	1.81 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Óptimo Humedad</b>	14.5 %
<b>Densidad Seca 95%</b>	1.72 gr/cm <sup>3</sup>

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 16***Determinación del CBR del Suelo Patrón*

<b>C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"</b>	<b>3.2</b>
<b>C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"</b>	3.9
<b>C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"</b>	2.8
<b>C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"</b>	3.1

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 22***Determinación de CBR del Suelo Patrón*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 23***Ensayo CBR del Suelo Patrón*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**2.8 Evaluación del Suelo Patrón como Subrasante**

La subrasante desempeña un papel fundamental en el diseño de pavimentos, ya que determina la respuesta estructural y el comportamiento del pavimento durante su construcción y operación (Chávez y Odar, 2019). Esta capa está compuesta por suelo natural o por suelos mejorados mediante procesos como la estabilización mecánica, físico química (con cal, asfalto, cemento, entre otros).

El ensayo del Índice de Soporte California (CBR por sus siglas en inglés) es una medida de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante bajo condiciones de humedad y densidad controladas, y se utiliza para evaluar la capacidad de los pavimentos (Moale y Rivera, 2019). El valor de CBR se determina al comparar el esfuerzo necesario para penetrar una muestra de suelo con el esfuerzo requerido para penetrar la misma profundidad en una muestra de piedra chancada de California. Según las especificaciones de la normativa peruana, se considera un suelo óptimo para proyectos viales si su CBR es mayor o igual al 6% (MTC, 2014).

Cuando las condiciones y los valores del CBR están por debajo de los niveles admisibles, se considera que la capacidad de soporte y resistencia del suelo frente a los esfuerzos cortantes generados por el tránsito vehicular es insuficiente (Chávez y Odar, 2019).

En consecuencia, el CBR se convierte en un parámetro crucial para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos.

Los resultados del ensayo de CBR correspondiente a una penetración de 0.1" y al 95% de la máxima densidad seca de la muestra patrón tiene un valor de CBR de 4, mientras que lo mínimo solicitado para que sea aceptable es un valor de 6.

Luego de analizar las propiedades, se concluye que la subrasante es inadecuada, para ello en esta investigación se estudió la estabilización con cal y cemento respectivamente. Es por ello que al eliminar la subrasante como variable, aumenta la fiabilidad y representatividad de los resultados.

## 2.9 Elección del método de estabilización

En el expediente técnico del proyecto se propuso un mejoramiento del suelo mediante una capa de 15 cm de afirmado para incrementar la capacidad de soporte. Sin embargo, debido a las propiedades del suelo analizado, se estudiará el uso de cal y cemento como agentes estabilizadores para la subrasante de la vía terciaria en el distrito de Marcavelica, Sullana. En la **Tabla 17** se presenta un resumen de la información de la muestra extraída del canal Norte, detallando la calicata, la clasificación de suelo encontrado y la distribución granulométrica.

**Tabla 17**

*Resumen del Suelo Patrón*

Descripción	Valor
<b>Progresivas</b>	Calicata #03
<b>Clasificación</b>	SUCS AASHTO
<b>Límites de consistencia</b>	LL LP
<b>Distribución</b>	IP % Arena fina
	Prog. 9+500 CH A-7-6 (17) 51 23 28 0.07

A lo largo del Capítulo 2, ha quedado en evidencia que el estado actual de la subrasante en el tramo a intervenir es ideal para ser evaluado bajo la técnica de la estabilización química de suelos, en esta tesis se propone el uso de cal como aditivo de estabilización puesto que se recomienda su uso en suelos con un índice de plasticidad mayor a 12. Además, según Morocho y Casaverde (2022), se recomienda estabilizar con cal los suelos clasificados como A-4, A-5, A-6 y A-7. Por ello, en esta investigación se plantea realizar la estabilización con cal, con el objetivo de reducir la plasticidad del suelo, mejorando la estabilidad y capacidad de soporte.

En el caso de la estabilización con cemento, para el tipo de suelo con el que contamos (CH) se recomienda para suelos con un LL menor a 40 e IP menor a 20, por lo que acorde a la **Tabla 18** este tipo de estabilización no sería tan eficiente como sería el uso de la cal. Sin embargo, se trabajará también con cemento para establecer una comparativa entre dichos agentes estabilizantes.

**Tabla 18***Elección del Método de Estabilización*

CLASE DE SUELO	TIPO DE ADITIVO ESTABILIZANTE RECOMENDADO	RESTRICCIÓN EN LL, IP DEL SUELO	(%) QUE PASA TAMIZ N° 200	OBSERVACIONES
SW O SP	(1) BITUMINOSO	-	-	-
	(2) CEMENTO PORTLAND	-	-	-
	(3) CAL-CEMENTO-CENIZAS VOLANTES	IP <25	-	-
SW-SM O SP-SM O SW-SC O SP-SC SM O SC / SM-SC	(1) BITUMINOSO	IP <10	-	-
	(2) CEMENTO PORTLAND	IP <30	-	-
	(3) CAL	IP >12	-	-
	(4) CAL-CEMENTO-CENIZAS VOLANTES	IP <25	-	-
	(1) BITUMINOSO	IP <10	<30%	-
GW O GP	(2) CEMENTO PORTLAND	*	-	-
	(3) CAL	IP >12	-	-
	(4) CAL-CEMENTO-CENIZAS VOLANTES	IP <25	-	-
	(1) BITUMINOSO	-	-	SOLO MATERIAL BIEN GRADADO
	(2) CEMENTO PORTLAND	-	-	MATERIAL DEBE CONTENER 45% QUE PASA LA MALLA N° 4
GW-GM o GP-GM o GW-GC o GP-GC	(3) CAL	IP <25	-	-
	(1) BITUMINOSO	IP <10	-	SOLO MATERIAL BIEN GRADADO
	(2) CEMENTO PORTLAND	IP <30	-	MATERIAL DEBE CONTENER 45% QUE PASA LA MALLA N° 4
	(3) CAL	IP >12	-	-
GM O GC GM-GC	(4) CAL-CEMENTO-CENIZAS VOLANTES	IP <25	-	-
	(1) BITUMINOSO	IP <10	<30%	SOLO MATERIAL BIEN GRADADO
	(2) CEMENTO PORTLAND	*	-	MATERIAL DEBE CONTENER 45% QUE PASA LA MALLA N° 4
	(3) CAL	IP >12	-	-
	(4) CAL-CEMENTO-CENIZAS VOLANTES	IP <25	-	-
CH o CL o MH o ML o OH o OL o ML-CL	(1) CEMENTO PORTLAND	IP <20 y LL <40	-	SUELOS ORGANICOS Y MUY ACIDOS NO SON SUSCEPTIBLES A ESTABILIZACION POR METODOS ORDINARIOS.
	(2) CAL	IP >12	-	-

*Nota.* Traducido de Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction - Pág 4

Habiendo definido el método de estabilización (química) y los agentes estabilizadores empleados (cal y cemento), la elección de los porcentajes en las mezclas encuentra su fundamento en las propiedades del suelo y en los criterios establecidos por el Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. De acuerdo con este manual, el porcentaje de cal (viva o apagada) dependerá de las exigencias del tipo de suelo estabilizado que se desea obtener, lo que se detalla en la **Tabla 19**.

**Tabla 19**

Tipo de suelo estabilizado con Cal

Tipo de suelo estabilizado	Suelo Estabilizado 1	Suelo Estabilizado 2
Porcentaje mínimo de cal	2%	3%
Índice CBR a 7 días	≥ 6	≥ 12

*Nota.* Extraído de Manual de estabilización de suelos con cemento o cal.

Se debe fijar el porcentaje mínimo del 2 o 3%, según el tipo de suelo, y a partir de este valor, la dotación de cal necesaria será aquella que permita obtener una capacidad de soporte del suelo que viene fijada por el valor del índice CBR a 7 días.

Así mismo, el “Manual de carreteras” del MTC propone que la estabilización con cal obtendrá resultados satisfactorios para suelos altamente arcillosos si se utiliza entre el 5 – 10% de cal en peso para una capa granular superficial o entre el 1 – 3% de cal en peso en caso se utilice como capa inferior.

En base a lo señalado por ambas referencias bibliográficas, se optó por trabajar con porcentajes de cal del 2%, 3% y 4%, considerando tanto el valor mínimo recomendado para garantizar una mejora significativa en la capacidad de soporte del suelo —según el índice CBR a 7 días— como los rangos sugeridos por el Manual de Carreteras del MTC para suelos altamente arcillosos. Por otro lado, se utilizaron los mismos porcentajes de cemento con el objetivo de establecer una comparativa directa entre ambos agentes estabilizadores, evaluando su desempeño en condiciones similares.

## Capítulo 3

### Presentación de resultados aplicando el agente estabilizador

#### 3.1 Ensayo de Cal Útil Vial (CUV)

Para la presente investigación se desarrolló el ensayo de Cal útil Vial, a un producto comercializado en la ciudad de Piura, las especificaciones técnicas del producto se detallan en la **Tabla 20**.

**Tabla 20**

*Especificaciones Técnicas Cal Viva*

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Unidad
Oxido de calcio (CaO)	80	99	%w/w
Óxido de silicio (SiO <sub>3</sub> )	-	3	%w/w
Óxido de magnesio (MgO)	-	1.5	%w/w
Granulometría Tamiz Nº 120 (125um)	5	12	%
Aspecto	Polvo higroscópico que no presenta olor		
Color	Blanco		

*Nota.* Adaptado de la Ficha Técnica del producto Cal Viva distribuida por QUINOR S.R.L.

Se determinó el porcentaje de reacción del producto (**Figura 24** y **Figura 25**).

**Figura 24**

*Cal Viva disuelta*



**Figura 25**  
*PH Inicial de Cal Viva*



Luego se realizó el ensayo de Cal Útil Vial en 03 muestras de los 25 kilogramos adquiridos (**Tabla 21**, **Tabla 22** y **Tabla 23**) para después trabajar con el valor promedio de dichos ensayos.

**Tabla 21**

*Ensayo 01 Cal Útil Vial*

NORMALIDAD DE LAS SOLUCIONES		
N1 (Ácido Clorhídrico)		1.0846
N2 (Hidróxido de Sodio)		0.9615
<b>ENSAYO #1 - PH INICIAL = 13.58</b>		
PH	HCl (ml) acumulado	NaOH (ml)
PH 9	33.9	-
PH 7	38.6	-
PH 2	41.4	-
PH 7	-	39.6

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Determinación de CUV como Hidróxido de Calcio:

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times n \times N1 \times 100\%}{3}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times 38.6 \times 1.0846 \times 100\%}{3}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 51.63\%$$

**Tabla 22***Ensayo 02 Cal Útil Vial*

NORMALIDAD DE LAS SOLUCIONES		
N1 (Ácido Clorhídrico)		1.0846
N2 (Hidróxido de Sodio)		0.9615
<b>ENSAYO # 02 - PH INICIAL = 13.42</b>		
PH	HCl (ml) acumulado	NaOH (ml)
PH 9	33	-
PH 7	33.8	-
PH 2	52.1	-
PH 7	-	12.8

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Determinación de CUV como Hidróxido de Calcio:

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times n \times N1 \times 100\%}{3}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times 33.8 \times 1.0846 \times 100\%}{3}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 45.21\%$$

**Tabla 23***Ensayo 03 Cal Útil Vial*

NORMALIDAD DE LAS SOLUCIONES		
N1 (Ácido Clorhídrico)		1.0846
N2 (Hidróxido de Sodio)		0.9615
<b>ENSAYO # 02 - PH INICIAL = 13.42</b>		
PH	HCl (ml) acumulado	NaOH (ml)
PH 9	33	-
PH 7	35.8	-
PH 2	58.4	-
PH 7	-	19.2

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Determinación de CUV como Hidróxido de Calcio:

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times n \times N1 \times 100\%}{3}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{0.037 \times 35.8 \times 1.0846 \times 100\%}{3}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 47.89\%$$

*Nota:* Se observa que el ensayo tiene cierta dispersión debido a que la reacción y la pureza de la cal en cada muestra extraída ha sido distinta. Se tomará como valor patrón el promedio.

$$\text{CUV} = \frac{51.63 + 45.21 + 47.89}{3}$$

$$\text{CUV} = 48.24\%$$

### 3.2 Granulometría de los cuerpos de prueba

- Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%

**Tabla 24**

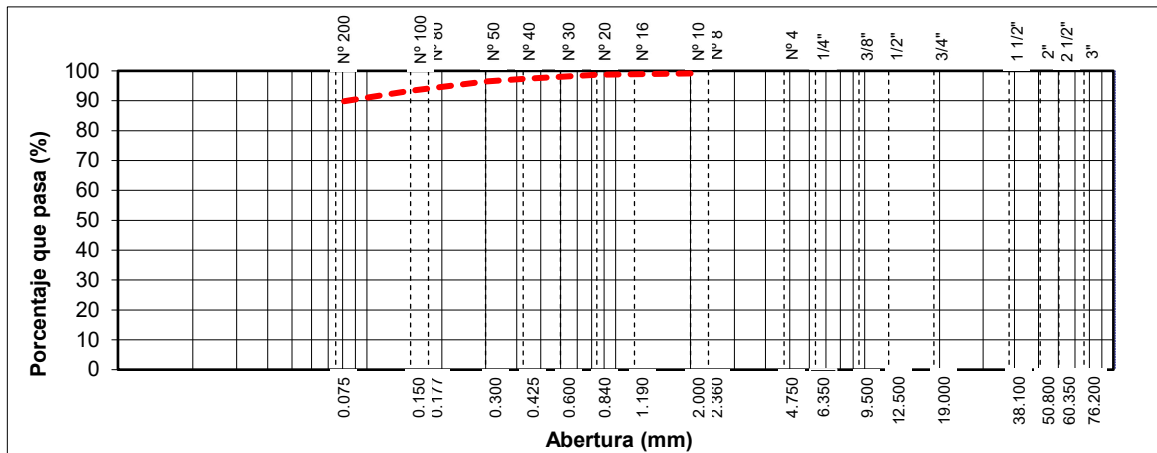
*Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%*

TAMIZ	AASHTO T-27(mm)	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
10"	254.00				
6"	152.40				
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2 1/2"	60.35				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40	0.0			
3/4"	19.00	0.0			
1/2"	12.50	0.0			
3/8"	9.50	0			
1/4"	6.35				
Nº 4	4.75				
Nº 8	2.36				100.0
Nº 10	2.00	6.5	0.9	0.4	99.1
Nº 16	1.19				
Nº 20	0.84	3.3	0.4	1.3	98.7
Nº 30	0.60				
Nº 40	0.43	10.9	1.4	2.7	97.3
Nº 50	0.30	6.2	0.8	3.5	96.5
Nº 80	0.18				
Nº 100	0.15	23.8	3.1	6.7	93.3
Nº 200	0.08	30.0	3.9	10.6	89.4

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Figura 26

Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cal Viva 2%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

- Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%

Tabla 25

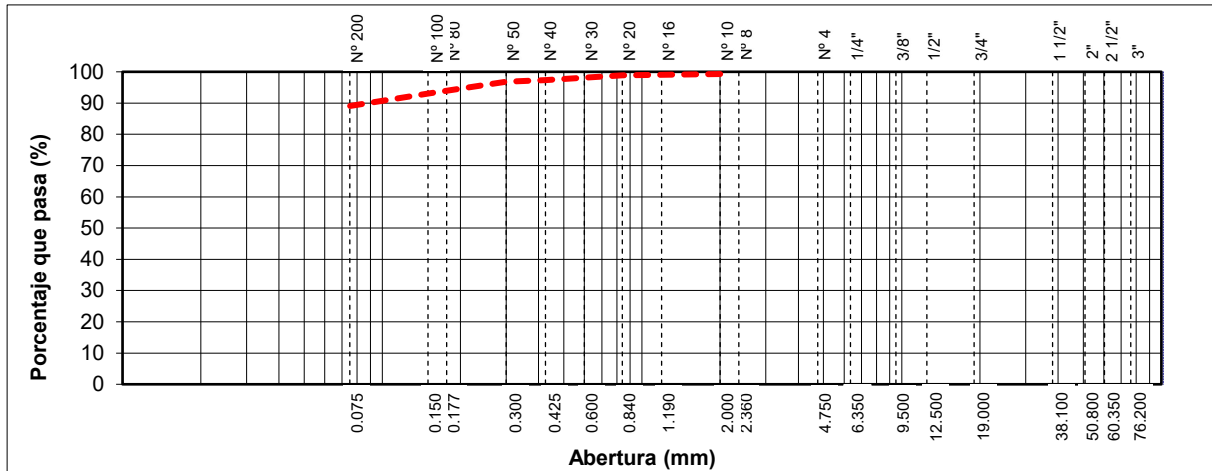
Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%

TAMIZ	AASHTO T-27(mm)	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
10"	254.00				
6"	152.40				
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2 1/2"	60.35				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.00				
1/2"	12.50				
3/8"	9.50				
1/4"	6.35				
Nº 4	4.75				
Nº 8	2.36				100.0
Nº 10	2.00	5.4	0.7	0.7	99.3
Nº 16	1.19				
Nº 20	0.84	2.9	0.4	1.1	98.9
Nº 30	0.60				
Nº 40	0.43	11.8	1.5	2.6	97.4
Nº 50	0.30	4.4	0.6	3.2	96.8
Nº 80	0.18				
Nº 100	0.15	28.4	3.7	6.9	93.1
Nº 200	0.08	30.5	4.0	10.9	89.1

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Figura 27

Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cal Viva 3%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

- Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%

Tabla 26

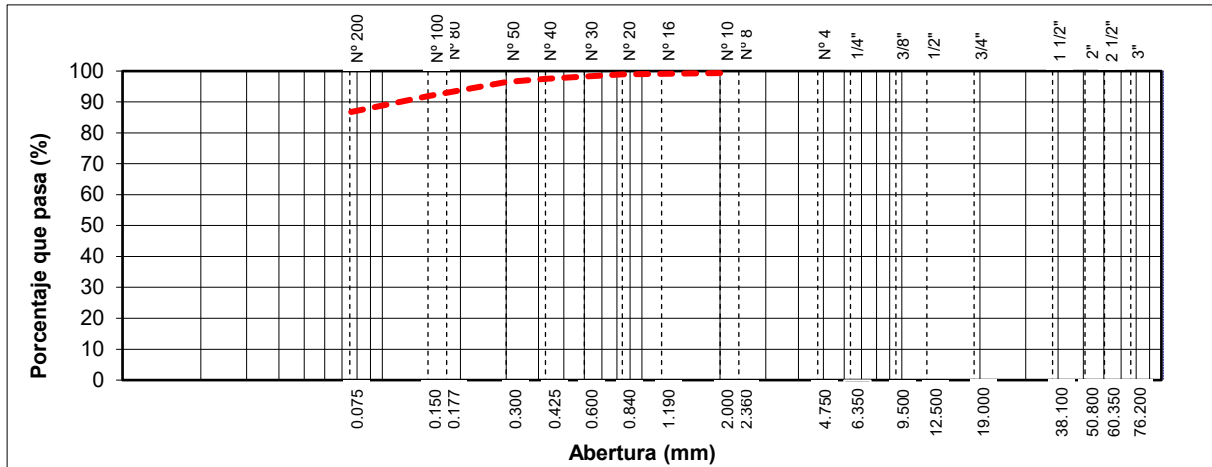
Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%

TAMIZ	AASHTO T-27(mm)	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
10"	254.00				
6"	152.40				
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2 1/2"	60.35				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.00				
1/2"	12.50				
3/8"	9.50				
1/4"	6.35				
Nº 4	4.75				
Nº 8	2.36				100.0
Nº 10	2.00	4.9	0.6	0.6	99.4
Nº 16	1.19				
Nº 20	0.84	3.0	0.4	1.0	99.0
Nº 30	0.60				
Nº 40	0.43	11.1	1.5	2.5	97.5
Nº 50	0.30	7.7	1.0	3.5	96.5
Nº 80	0.18				
Nº 100	0.15	35.1	4.6	8.1	91.9
Nº 200	0.08	39.9	5.2	13.3	86.7

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Figura 28

Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cal Viva 4%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

- Mezcla Arcilla + Cemento 2%

Tabla 27

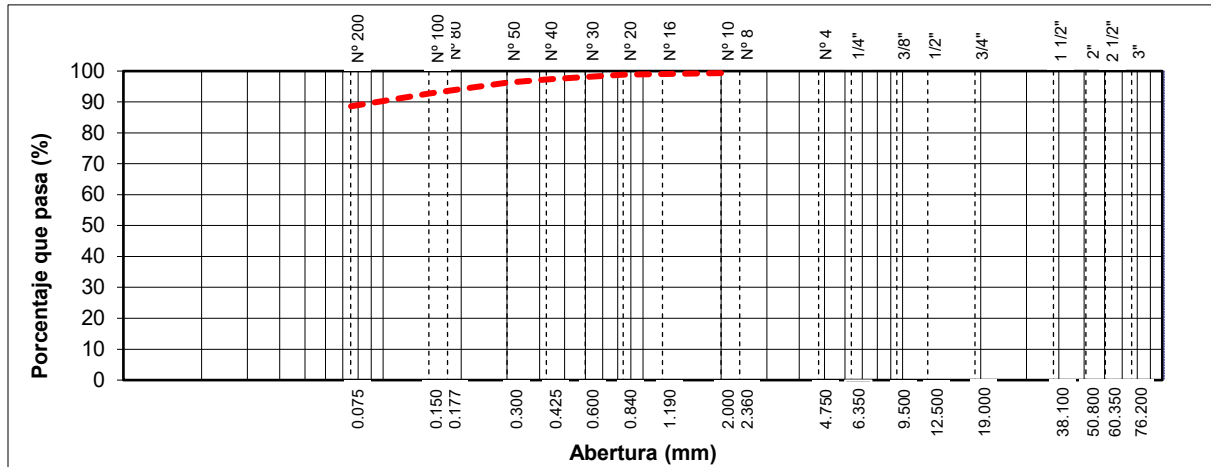
Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cemento 2%

TAMIZ	AASHTO T-27(mm)	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
10"	254.00				
6"	152.40				
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2 1/2"	60.35				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.00				
1/2"	12.50				
3/8"	9.50				
1/4"	6.35				
Nº 4	4.75				
Nº 8	2.36				100.0
Nº 10	2.00	5.0	0.7	0.7	99.3
Nº 16	1.19				
Nº 20	0.84	4.1	0.5	1.2	98.8
Nº 30	0.60				
Nº 40	0.43	11.6	1.5	2.7	97.3
Nº 50	0.30	7.7	1.0	3.7	96.3
Nº 80	0.18				
Nº 100	0.15	27.4	3.6	7.3	92.7
Nº 200	0.08	31.1	4.1	11.4	88.6

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Figura 29

Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cemento 2%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

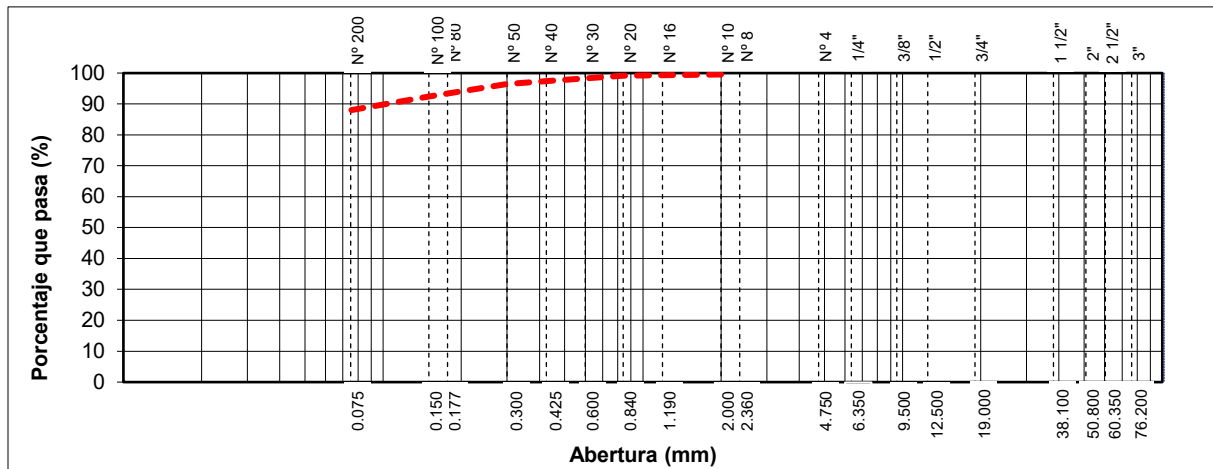
- Mezcla Arcilla + Cemento 3%

Tabla 28

Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cemento 3%

TAMIZ	AASHTO T-27(mm)	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
10"	254.00				
6"	152.40				
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2 1/2"	60.35				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.00				
1/2"	12.50				
3/8"	9.50				
1/4"	6.35				
N° 4	4.75				
N° 8	2.36				100.0
N° 10	2.00	3.5	0.5	0.5	99.5
N° 16	1.19				
N° 20	0.84	2.9	0.4	0.8	99.2
N° 30	0.60				
N° 40	0.43	13.7	1.8	2.6	97.4
N° 50	0.30	7.3	1.0	3.6	96.4
N° 80	0.18				
N° 100	0.15	30.2	4.0	7.6	92.4
N° 200	0.08	34.0	4.5	12.0	88.0

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 30***Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cemento 3%*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

- **Mezcla Arcilla + Cemento 4%**

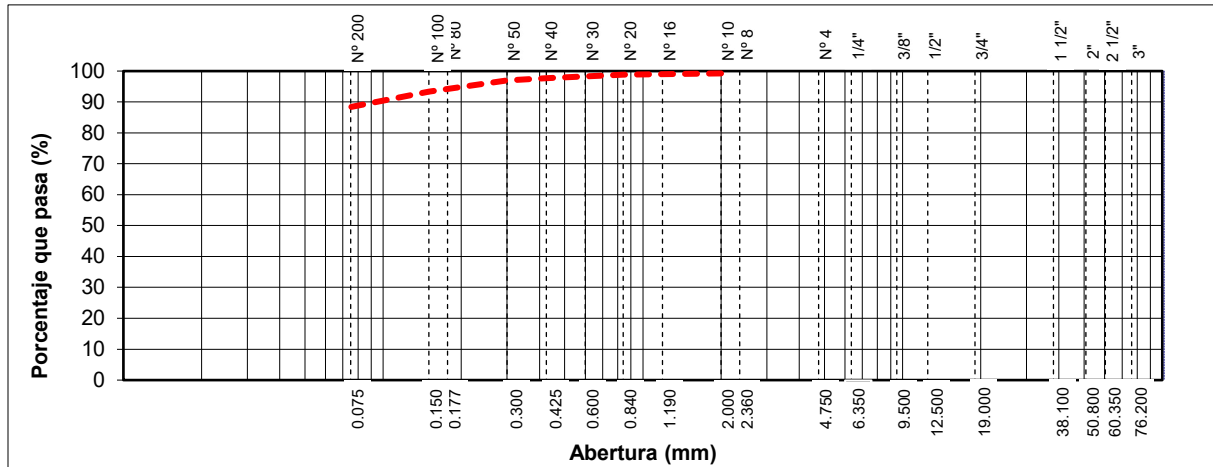
**Tabla 29***Granulometría de la Mezcla Arcilla + Cemento 4%*

TAMIZ	AASHTO T-27(mm)	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
10"	254.00				
6"	152.40				
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	76.20				
2 1/2"	60.35				
2"	50.80				
1 1/2"	38.10				
1"	25.40				
3/4"	19.00				
1/2"	12.50				
3/8"	9.50				
1/4"	6.35				
Nº 4	4.75				
Nº 8	2.36				100.0
Nº 10	2.00	5.8	0.8	0.8	99.2
Nº 16	1.19				
Nº 20	0.84	3.2	0.4	1.2	98.8
Nº 30	0.60				
Nº 40	0.43	8.8	1.2	2.3	97.7
Nº 50	0.30	5.0	0.7	3.0	97.0
Nº 80	0.18				
Nº 100	0.15	28.0	3.7	6.7	93.3
Nº 200	0.08	37.9	5.0	11.6	88.4

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 31**

Curva Granulométrica de la mezcla Arcilla + Cemento 4%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

### 3.3 Límites de Atterberg de los cuerpos de prueba

El presente ensayo se llevó a cabo rigiéndose por la norma *NTP 339.129*. Conforme a ello se obtuvieron los resultados mostrados a continuación en la **Tabla 30**.

**Tabla 30**

Límites de Atterberg de los Cuerpos de Prueba

Constantes del suelo	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Suelo Patrón	51	23	28
Cal 2%	48	28	20
Cal 3%	48	30	18
Cal 4%	46	30	16
Cemento 2%	47	35	12
Cemento 3%	55	44	11
Cemento 4%	51	41	10

Nota. Ensayos realizados en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

Luego se procedió a clasificar las muestras de los suelos, los resultados se detallan en la **Tabla 31**.

**Tabla 31***Clasificación de los diseños a evaluar*

Constantes del suelo	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	% Pasante Malla 200
Suelo Patrón	A-7-6 (17)	CH	92.7
Arcilla + Cal 2%	A-7-6 (14)	ML	89.4
Arcilla + Cal 3%	A-7-5 (13)	ML	89.1
Arcilla + Cal 4%	A-7-5 (12)	ML	86.7
Arcilla + Cemento 2%	A-7-5 (10)	ML	88.6
Arcilla + Cemento 3%	A-7-5 (11)	MH	88.0
Arcilla + Cemento 4%	A-5 (11)	MH	88.4

*Nota.* Ensayos realizados en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

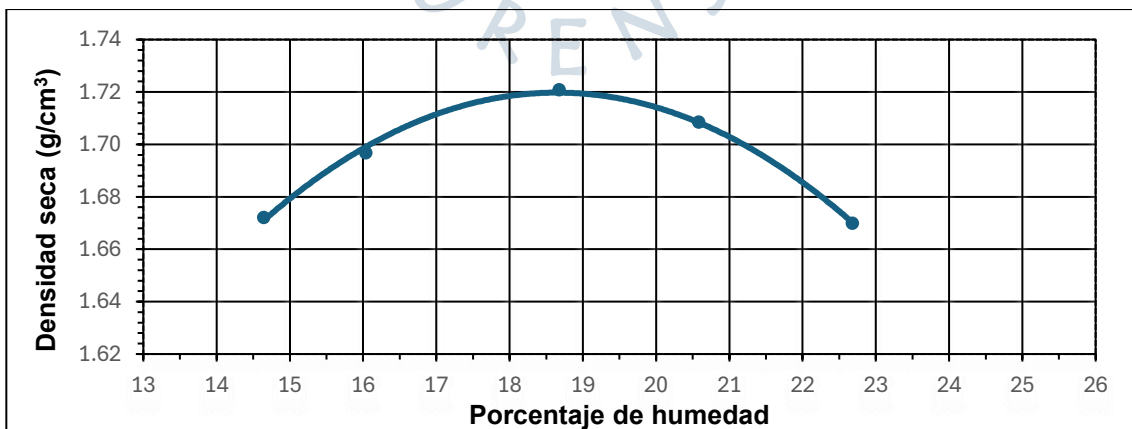
### 3.4 Ensayo Proctor Modificado de los cuerpos de prueba

Se ha desarrollado el presente ensayo siguiendo el procedimiento de la NTP 339.141, con la finalidad de obtener el contenido óptimo de humedad y su respectiva máxima densidad seca (M.D.S) del material estabilizado.

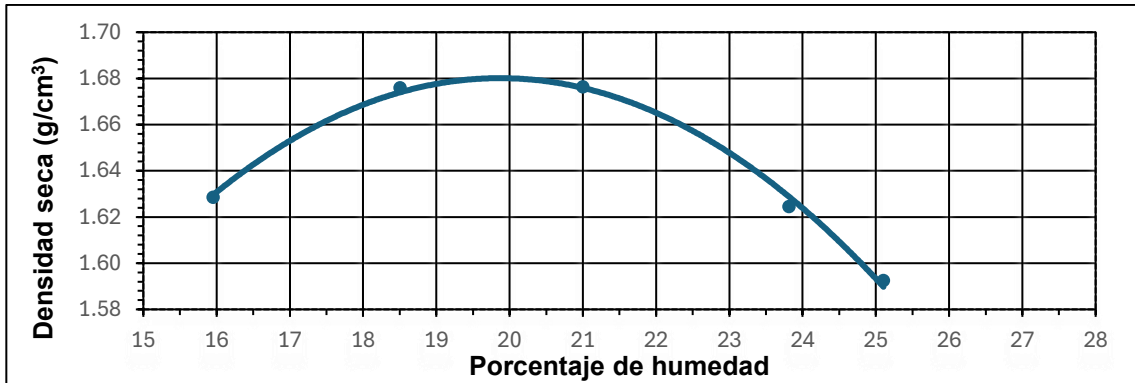
El procedimiento adecuado para el suelo de la zona es el tipo A, ya que la granulometría indica que la malla N° 4 (4,75mm) retiene menos del 20% del peso del material. Este procedimiento se realiza con el molde de 4" de diámetro, en 5 capas y con 25 golpes por capa.

**Figura 32**

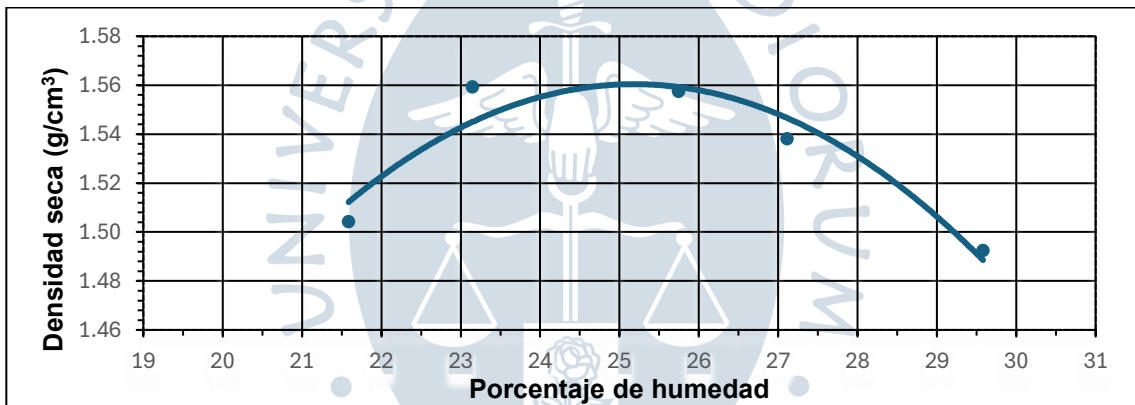
*Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%*



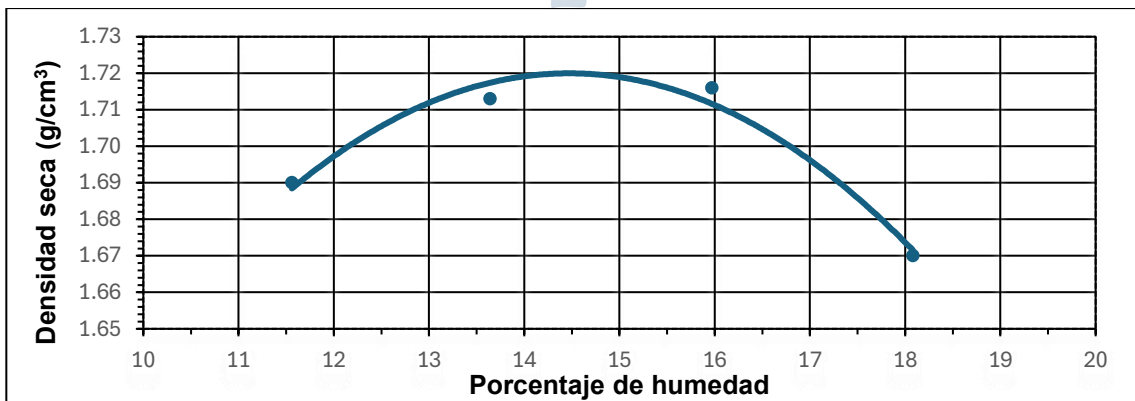
*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 33***Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%*

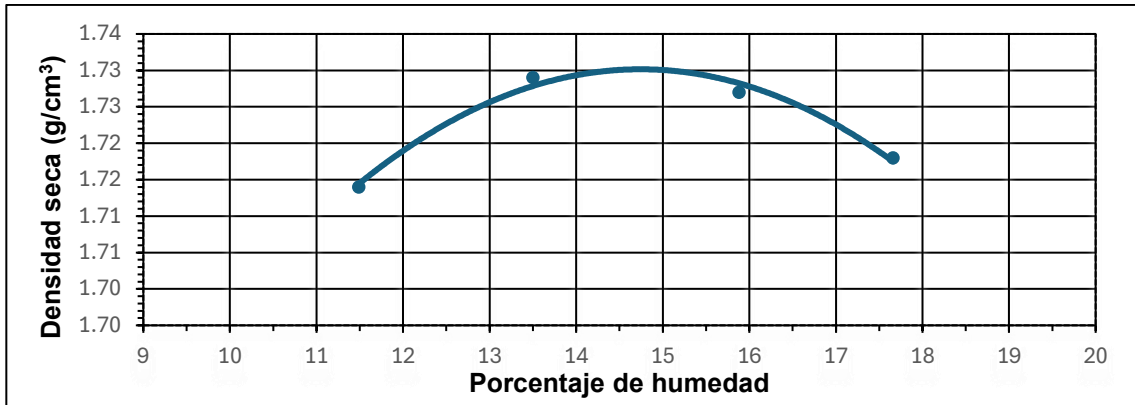
*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 34***Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%*

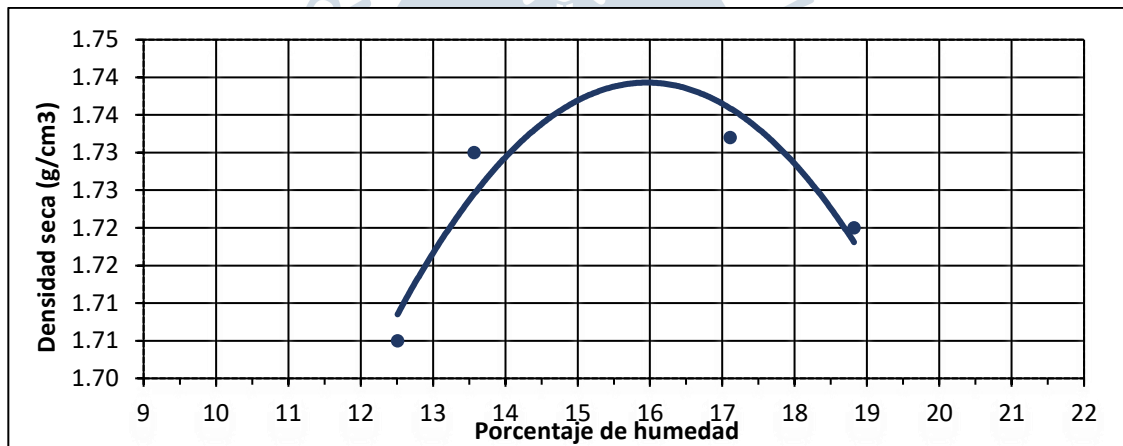
*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 35***Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cemento 2%*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 36***Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cemento 3%*

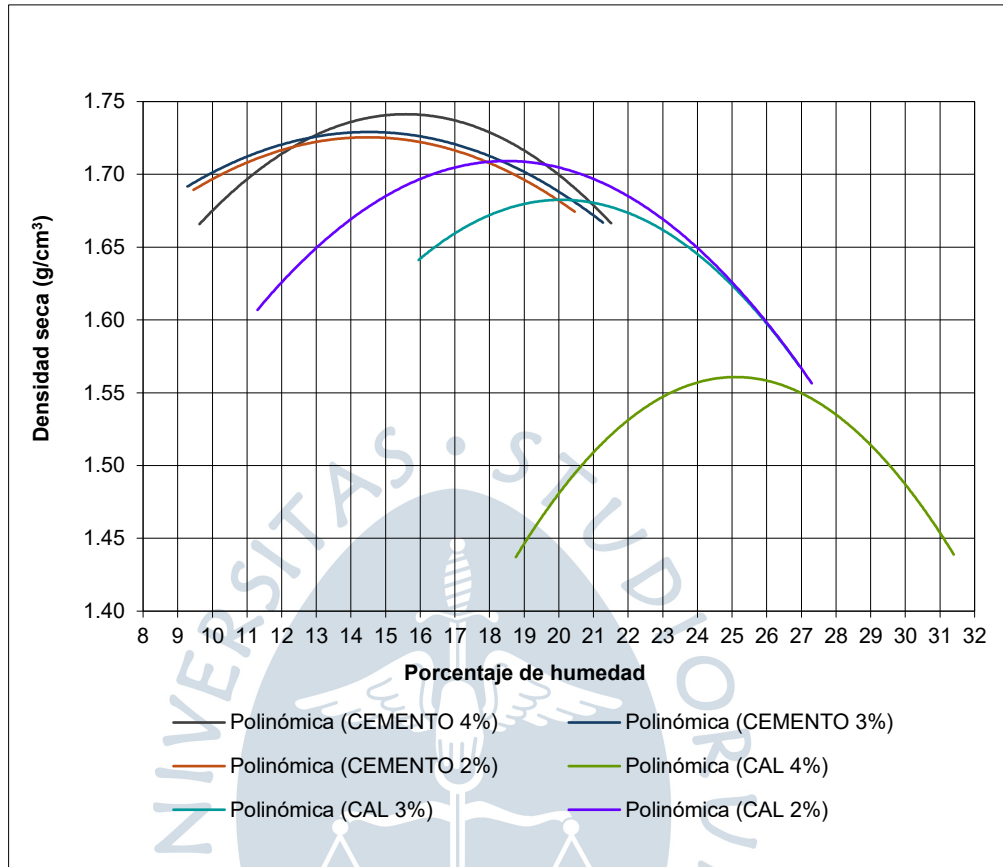
*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 37***Curva de Compactación de Mezcla Arcilla + Cemento 4%*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

A continuación, en la **Figura 38** y **Tabla 32** se muestran los resultados obtenidos.

**Figura 38**  
Resultados de Proctor Modificado



Nota. Ensayos realizados en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 32**  
Resumen de Ensayo Proctor Modificado

%	Método	M.D.S (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
Suelo Patrón		1.81	14.5
Cal 2%		1.71	18.5
Cal 3%		1.68	20
Cal 4%	A	1.56	25
Cemento 2%		1.72	14.8
Cemento 3%		1.73	15
Cemento 4%		1.74	16

Nota. Ensayos realizados en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

### 3.5 Ensayo de valor relativo de soporte (CBR) de los cuerpos de prueba

Se llevó a cabo el ensayo CBR (California Bearing Ratio) siguiendo las directrices establecidas en la norma técnica peruana NTP 339.145, con el objetivo de evaluar la mejora en la capacidad soporte del material estabilizado. Este ensayo es fundamental en la ingeniería geotécnica y de pavimentos, ya que permite analizar el comportamiento mecánico del suelo estabilizado bajo condiciones de carga controlada. Para ello, se prepararon muestras compactadas con diferentes niveles de energía, ajustando el número de golpes aplicados por capa: 10, 25 y 56 golpes. Esta variación en la energía de compactación busca simular diferentes condiciones de compactación en obra y analizar su influencia en la resistencia del material.

- **Diseño 2% de Cal Viva**

**Tabla 33**

*Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%*

Espécimen	#1	#2	#3
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.53	1.63	1.72
% de expansión con respecto de su altura inicial	0.2	0.16	0.11
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	31	40	49
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	26	33	10
Cantidad de sobrecarga	10lb	10lb	10 lb

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura.

**Tabla 34**

*Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%*

Densidad Seca 100%	Óptimo Humedad	Densidad Seca 95%
1.71 gr/cm <sup>3</sup>	18.50%	1.625 gr/cm <sup>3</sup>

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 35**

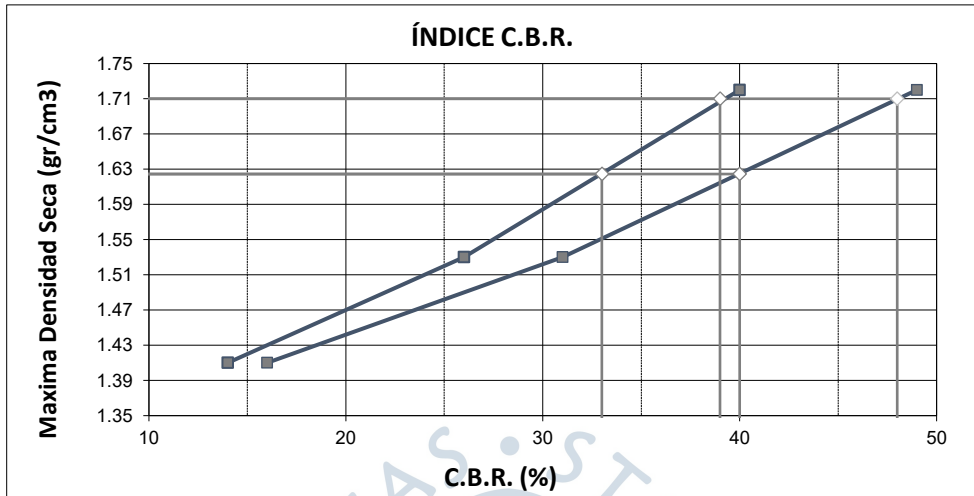
*Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%*

C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"
40	48	33	39

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 39**

Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 2%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

▪ **Diseño 3% de Cal Viva**

**Tabla 36**

Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%

Espécimen	#1	#2	#3
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.39	1.53	1.68
% de expansión con respecto de su altura inicial	0.18	0.11	0.09
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	20	36	55
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	15	31	45
Cantidad de sobrecarga	10 lb	10lb	10 lb

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 37**

Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%

Densidad Seca 100%	Óptimo Humedad	Densidad Seca 95%
1.68 gr/cm <sup>3</sup>	20.00%	1.596 gr/cm <sup>3</sup>

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 38**

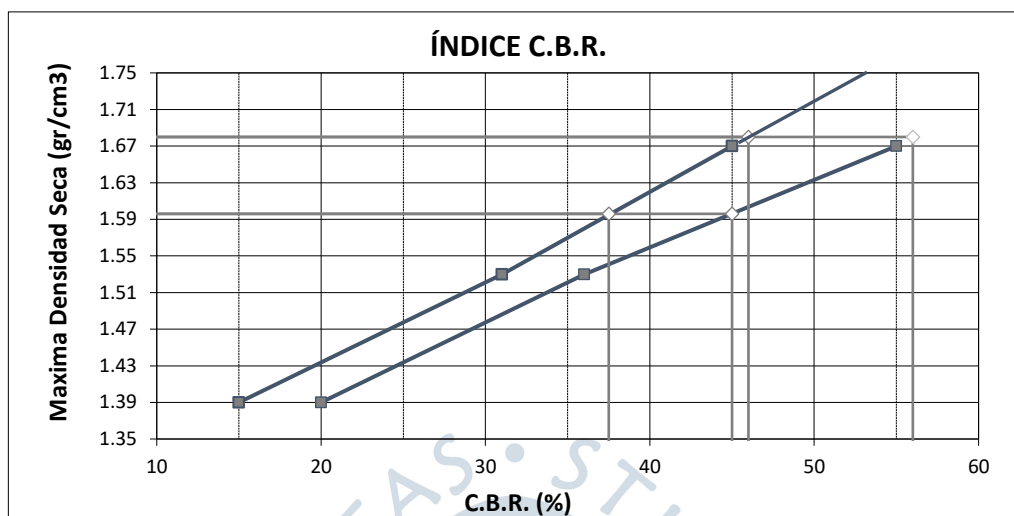
Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%

C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"
45	56	37.5	46

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 40**

*Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 3%*



*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

▪ **Diseño 4% de Cal Viva**

**Tabla 39**

*Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%*

Espécimen	#1	#2	#3
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.26	1.38	1.55
% de expansión con respecto de su altura inicial	0.09	0.07	0.02
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	25	42	61
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	21	34	48
Cantidad de sobrecarga	10 lb	10lb	10 lb

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 40**

*Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%*

Densidad Seca 100%	Óptimo Humedad	Densidad Seca 95%
1.56 gr/cm <sup>3</sup>	25.00%	1.482 gr/cm <sup>3</sup>

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 41**

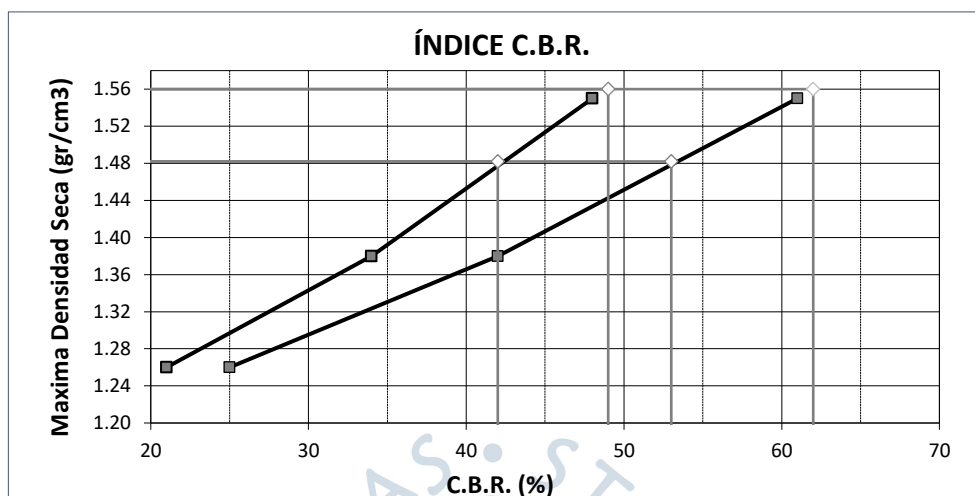
*Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%*

C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"
53	62	42	49

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 41**

*Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cal Viva 4%*



*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

▪ **Diseño 2% de Cemento Tipo I**

**Tabla 42**

*Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 2%*

Espécimen	#1	#2	#3
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.45	1.62	1.72
% de expansión con respecto de su altura inicial	8.76	7.01	6.17
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	25	42	61
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	21	34	48
Cantidad de sobrecarga	10 lb	10lb	10 lb

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 43**

*Resultados del Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cemento 2%*

Densidad Seca 100%	Óptimo Humedad	Densidad Seca 95%
1.72 gr/cm3	14.80%	1.634 gr/cm3

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 44**

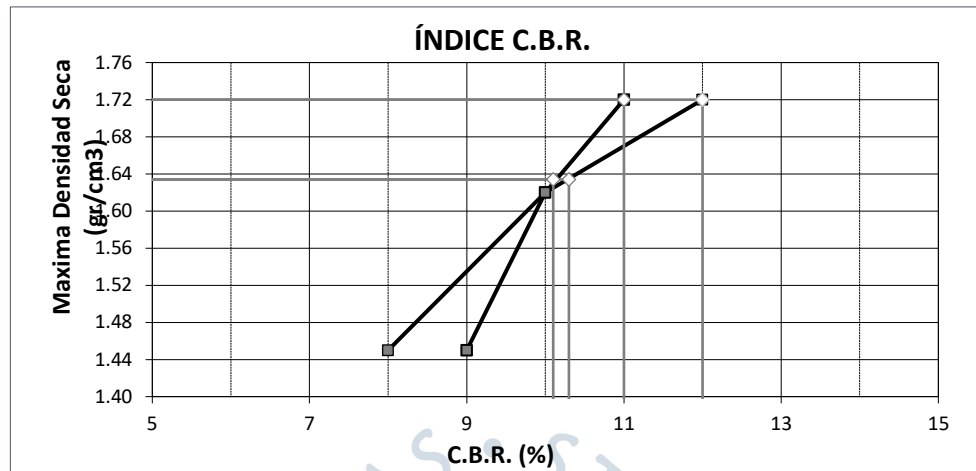
*Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 2%*

C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"
10.3	12	10.1	11

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 42**

Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 2%



Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

▪ **Diseño 3% de Cemento Tipo I**

**Tabla 45**

Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 3%

Espécimen	#1	#2	#3
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.47	1.63	1.74
% de expansión con respecto de su altura inicial	4.07	3.88	3.5
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	13	18	22
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	12	17	20
Cantidad de sobrecarga	10 lb	10lb	10 lb

**Tabla 46**

Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cemento 3%

Densidad Seca 100%	Óptimo Humedad	Densidad Seca 95%
1.73 gr/cm <sup>3</sup>	15.00%	1.644 gr/cm <sup>3</sup>

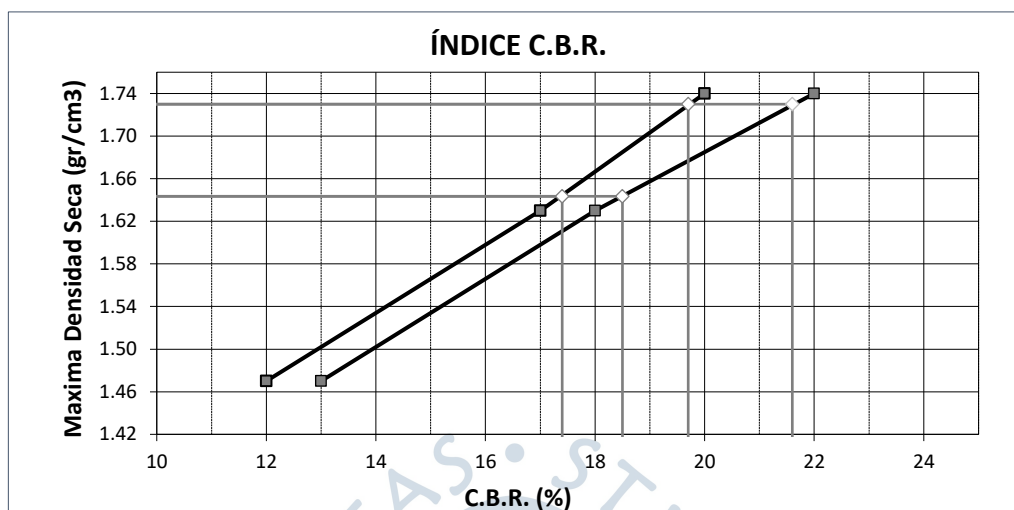
Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 47**

Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 3%

C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"
18.5	21.6	17.4	19.7

Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 43***Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 3%*

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

▪ **Diseño 4% de Cemento Tipo I.**

**Tabla 48***Resultados del Ensayo CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 4%*

Espécimen	#1	#2	#3
Densidad seca antes de sumergirlos al agua en agua	1.5	1.64	1.76
% de expansión con respecto de su altura inicial	3.46	3.11	2.67
C.B.R. corregido a 0.1" de penetración	26	39	49
C.B.R. corregido a 0.2" de penetración	27	37	45
Cantidad de sobrecarga	10 lb	10lb	10 lb

**Tabla 49***Resultados de Proctor Modificado de Mezcla Arcilla + Cemento 4%*

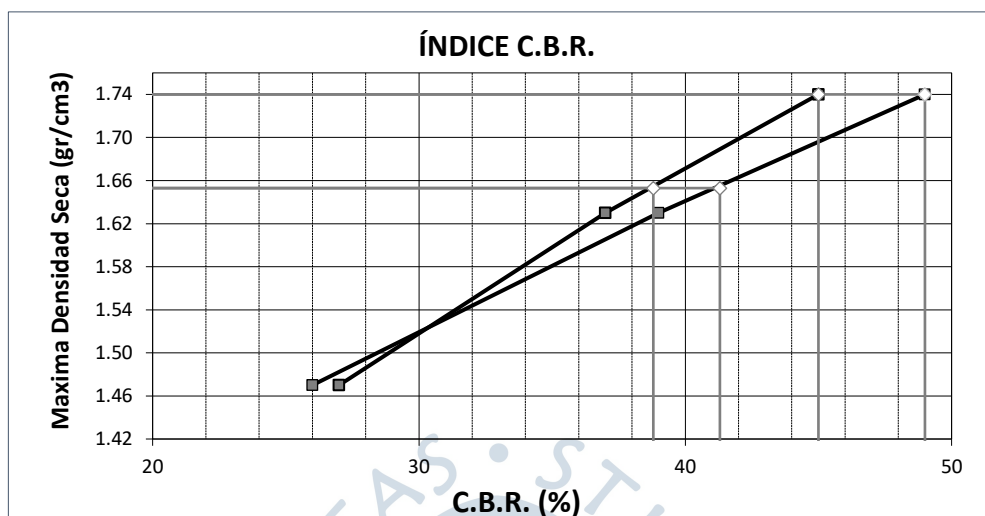
Densidad Seca 100%	Óptimo Humedad	Densidad Seca 95%
1.74 gr/cm <sup>3</sup>	16.00%	1.653 gr/cm <sup>3</sup>

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Tabla 50***Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 4%*

C.B.R. (95% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.1"	C.B.R. (95% M.D.S.) 0.2"	C.B.R. (100% M.D.S.) 0.2"
41.3	49	38.8	45

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).

**Figura 44***Determinación de CBR de Mezcla Arcilla + Cemento 4%*

*Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura*

### 3.6 Ensayo de Peso Volumétrico de los cuerpos de prueba

Se llevó a cabo el ensayo de “Determinación del peso volumétrico de un suelo cohesivo” siguiendo las directrices establecidas en la norma técnica peruana NTP 339.139, con el objetivo de evaluar la relación entre la masa y el volumen de la muestra a analizar en su estado natural o compactado.

Para ello, se prepararon muestras en su estado natural y compactado, los resultados se detallan en la **Tabla 51** y **Tabla 52**.

**Tabla 51***Peso Volumétrico de muestras en estado compactado*

Mezcla Compactada	W Mezcla (Gr)	W Cal Viva (Gr)	V Molde (Cm3)	P. Especifico (gr/cm3)
ARCILLA +CAL 2%	3019.00	60.38	2141.00	1.410
ARCILLA +CAL 3%	3032.33	90.97	2141.00	1.416
ARCILLA +CAL 4%	3047.33	121.89	2141.00	1.423
ARCILLA +CEMENTO 2%	3086.33	61.73	2141.00	1.441
ARCILLA +CEMENTO 3%	3113.33	93.40	2141.00	1.454
ARCILLA +CEMENTO 4%	3119.67	124.79	2141.00	1.457

*Nota. Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).*

**Tabla 52***Peso Volumétrico de muestras en estado natural*

<b>Mezcla Sin Compactar</b>	<b>W Mezcla (Gr)</b>	<b>W Cal Viva (Gr)</b>	<b>V Molde (Cm3)</b>	<b>P.Específico (Gr/Cm3)</b>
ARCILLA +CAL 2%	2533.33	50.67	2141.00	1.183
ARCILLA +CAL 3%	2533.67	76.01	2141.00	1.183
ARCILLA +CAL 4%	2473.67	98.95	2141.00	1.155
ARCILLA +CEMENTO 2%	2546.67	50.93	2141.00	1.189
ARCILLA +CEMENTO 3%	2555.00	76.65	2141.00	1.193
ARCILLA +CEMENTO 4%	2572.00	102.88	2141.00	1.201

*Nota.* Ensayo realizado en el LEMC de la Universidad de Piura (2024).



## Capítulo 4

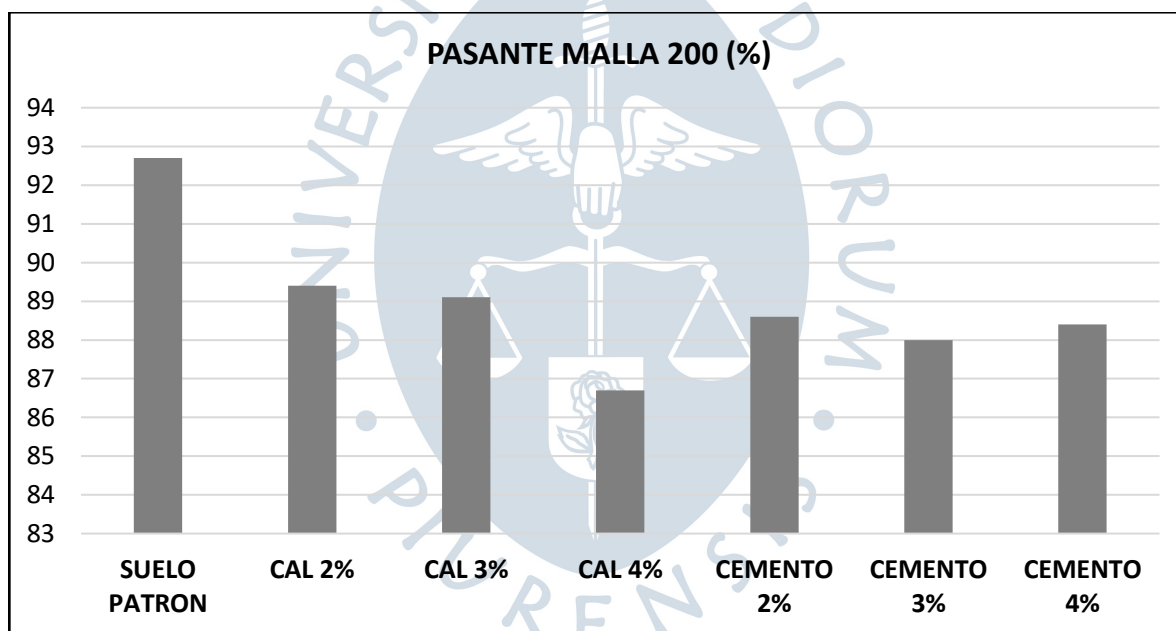
### Análisis de Resultados y Discusión

#### 4.1 Análisis del Ensayo de Granulometría

El ensayo granulométrico junto a los Límites de Atterberg permite clasificar el suelo acorde a los dos sistemas existentes AASHTO y SUCS. Ambos agentes disminuyen el % pasante por la malla 200 y consecuentemente también el IP, es decir, mejoran el suelo para su uso a nivel de subrasante. En cuanto a la clasificación AASHTO quien mejora significativamente el suelo es el cemento al 4% quien llega a obtener un A-5, por otro lado el porcentaje de malla 200 se ve significativamente disminuido por la cal al 4%.

**Figura 45**

*Análisis de resultados de Granulometría*



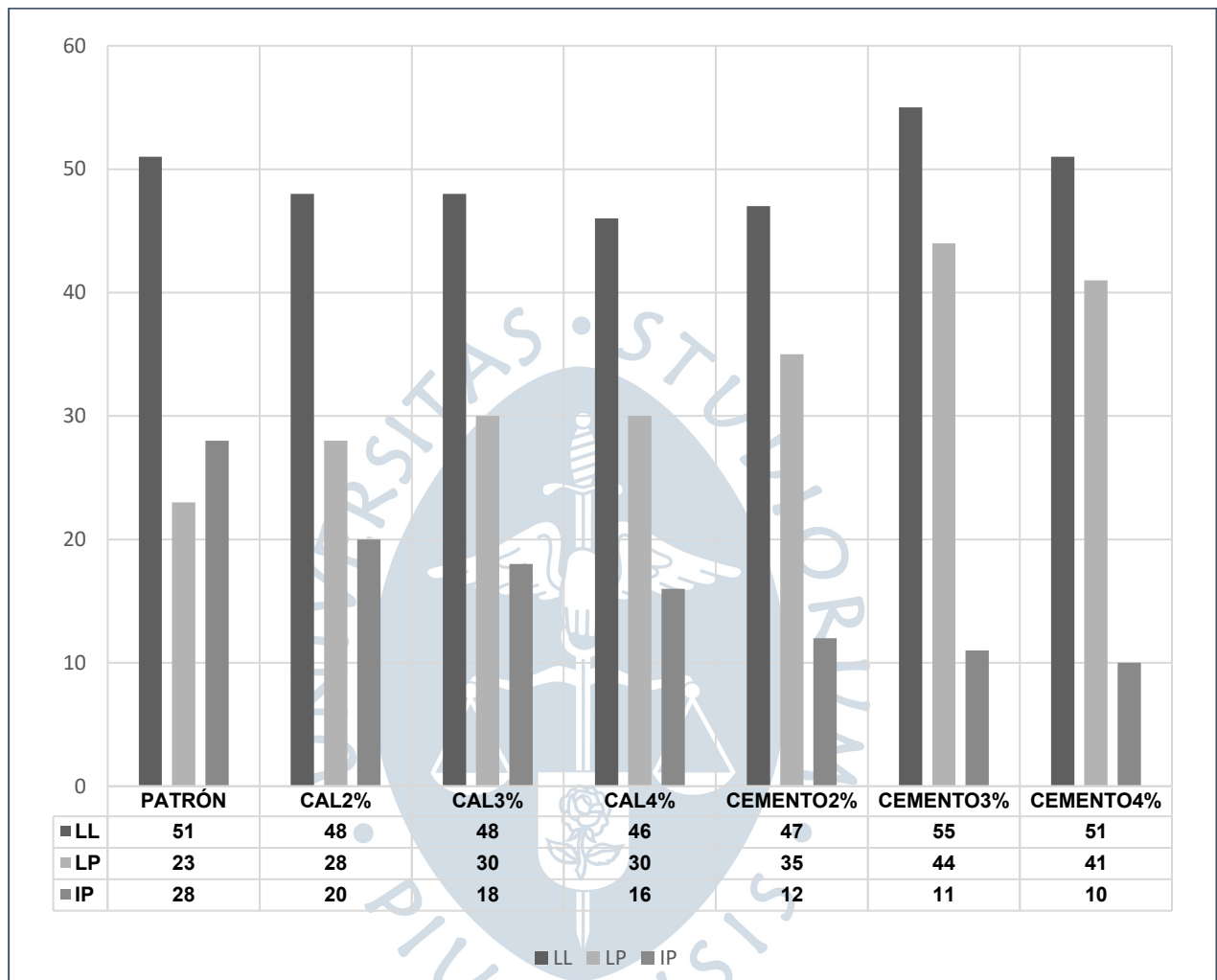
#### 4.2 Análisis del Ensayo de Límites de Atterberg

Se ha graficado el contenido de humedad para cada concentración de cal viva como de cemento. Se observa que la concentración mínima de cal no modifica considerablemente el índice de plasticidad en comparación con lo disminuido por el cemento, diferenciándolos en un 8% de diferencia. A medida que se ha adicionado cal, el IP ha disminuido en 2% por cada 1% de cal, mientras que con el cemento ha disminuido en 1% por cada 1% de cemento. Englobando el resultado, el cemento es el que obtiene una mejor reducción del índice de

plasticidad llegando a una disminución del 18% en su máximo porcentaje aplicado (4%); mientras que la cal viva al 4% llega a una disminución del 12%.

**Figura 46**

*Análisis de resultados de Límites de Atterberg*



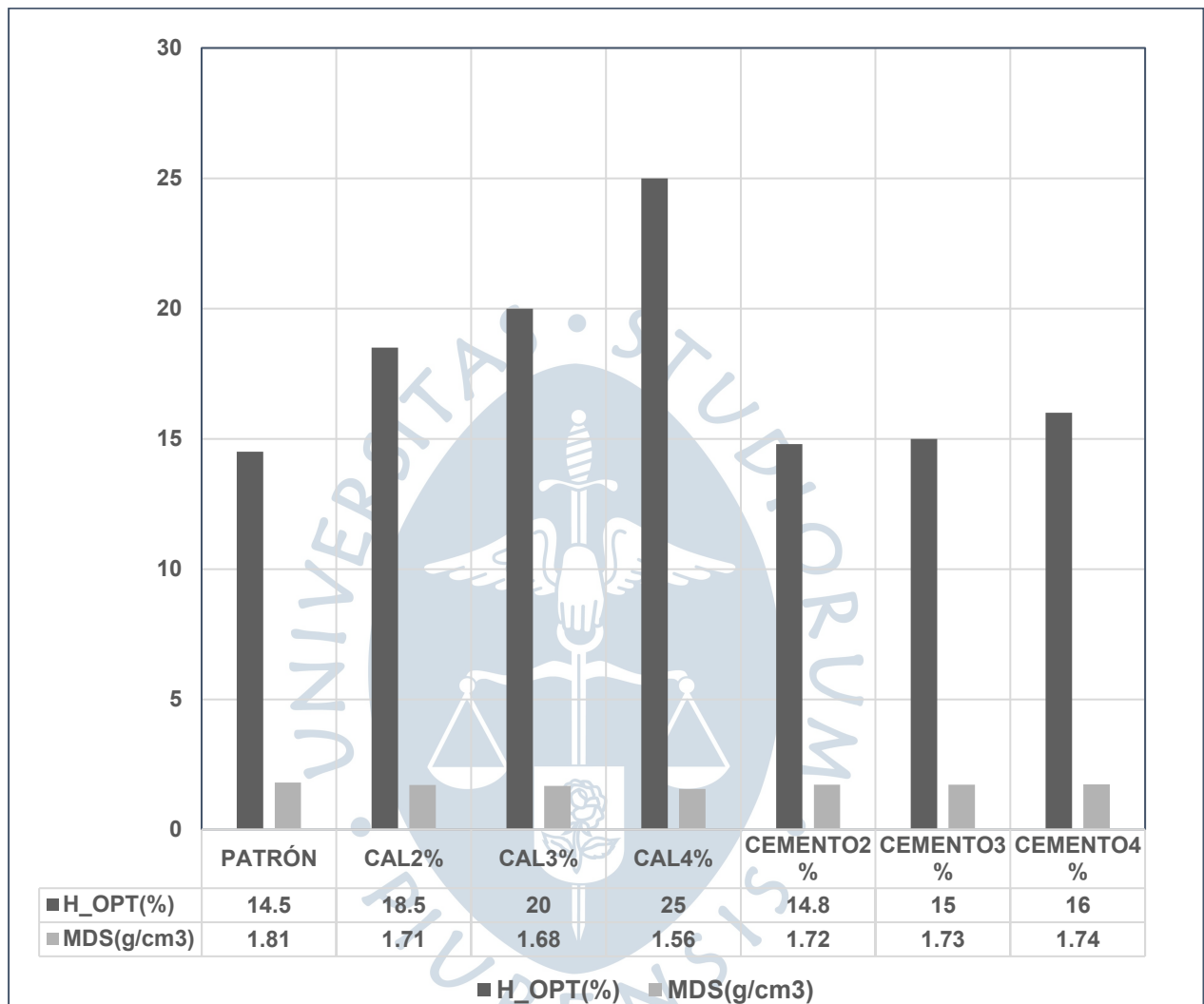
### 4.3 Análisis del Ensayo Proctor Modificado

El ensayo Proctor Modificado permite establecer parámetros como la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad. Se muestran los resultados en una tabla resumen y gráfico. Analizando el comportamiento de la cal, se observa que la humedad óptima tiene un incremento notable con el 4% de cal, llegando hasta un 25%, esto puede llegar a ser un problema en obra por la cantidad de agua que demandaría para llegar a su óptimo; respecto a su máxima densidad seca se nota una disminución considerable del

Proctor de 0.25 g/cm<sup>3</sup>. Por otro lado, el cemento aumenta ligeramente el contenido óptimo de humedad hasta 16% y la máxima densidad seca no la disminuye considerablemente.

**Figura 47**

*Análisis de resultados de Proctor Modificado*



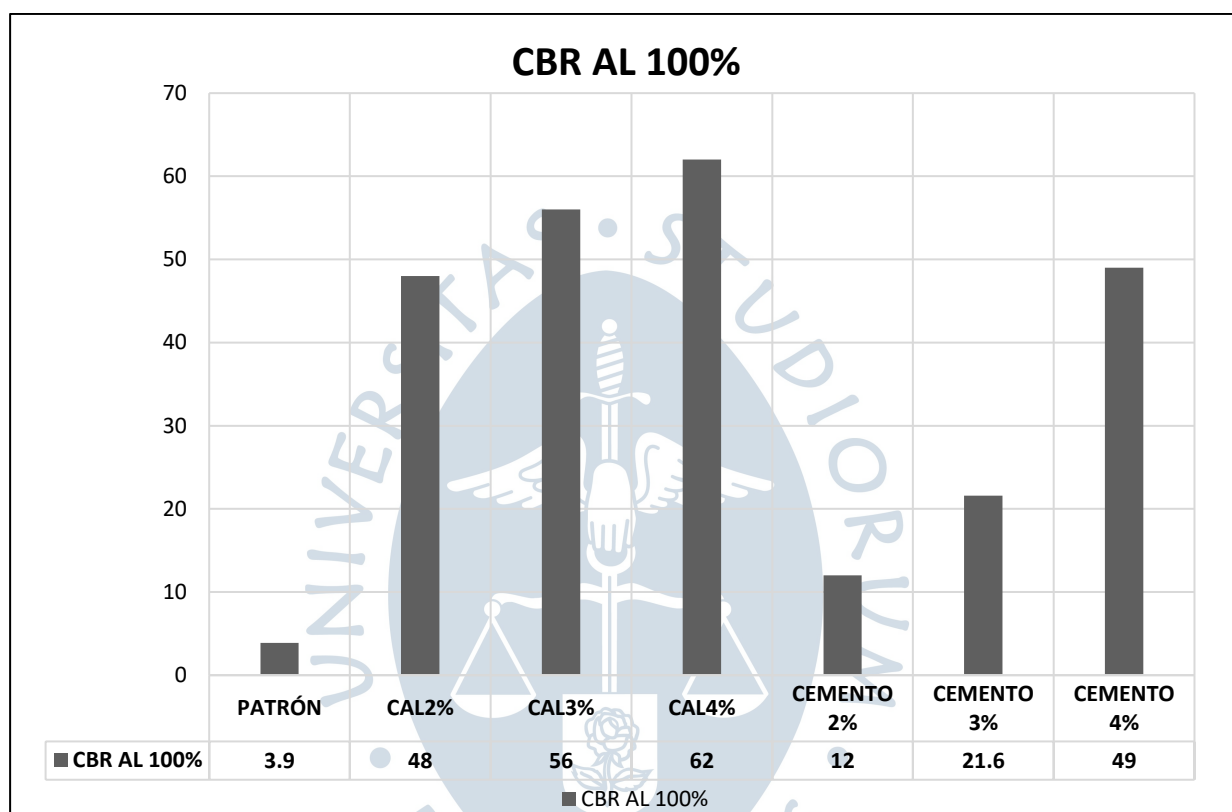
#### 4.4 Análisis del Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

El ensayo CBR nos sirve para medir la capacidad soporte del suelo. A continuación, se presentarán los resultados CBR con una penetración de 0.1" y al 100% de la M.D.S del suelo patrón y del suelo estabilizado con cal y cemento. Se observa que el suelo arcilloso, como es de esperarse, presenta un CBR bajo (3.2%) lo cual hace que sea no apto ni para una subrasante de un camino de servicio. La mezcla con cal al 2% hace una mejora notable llevándolo al 48%, con cal al 3% se obtiene un 56% y con cal al 4% un 62%; mientras que con el cemento al 2% lo eleva al 12%, con 3% a un 22% y por último con un 4% lo lleva a un 49%. Es decir, el efecto de la cal al 2% es equivalente al del cemento al 4%. Esta notable mejor por parte de la estabilización cal viva en comparativa con cemento, probablemente se deba a que la reacción

química de la cal no solo involucra a su interacción con el agua, sino que reacciona también con el calcio y minerales de la arcilla transformándolas y creando una estructura con más capacidad soporte y más impermeable; mientras que el cemento su reacción es directamente con el agua en su proceso de hidratación y fraguado.

**Figura 48**

*Resultados de CBR al 100%*



#### 4.5 Resumen comparativo suelo Patrón – Cal Viva – Cemento

**Tabla 53**

*Resultados de los ensayos*

	SUELO PATRON	CAL 2%	CAL 3%	CAL 4%	CEMENTO 2%	CEMENTO 3%	CEMENTO 4%
PASANTE MALLA 200 (%)	92.7	89.4	89.1	86.7	88.6	88.0	88.4
LÍMITE LÍQUIDO (%)	51	48	48	46	47	55	51
LÍMITE PLÁSTICO (%)	23	28	30	30	35	44	41
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	28	20	18	16	12	11	10
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	1.81	1.71	1.68	1.56	1.72	1.73	1.74
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	14.5	18.5	20	25	14.8	15	16
CBR AL 100% M.D.S 0.1" (%)	3.9	48	56	62	12	21.6	49

Por el lado de la estabilización con cal viva, analizando el factor más importante que es la capacidad portante del suelo representada por el ensayo CBR llegó a un 62% con un contenido de cal al 4%, se ha obtenido que entre el 2% y 3% ha habido un aumento de 12% en CBR, y entre el 3% y 4% un aumento del 6%, es decir, a medida que el porcentaje de cal aumenta, el porcentaje de CBR aumentará mínimamente.

#### 4.6 Análisis de costos de las mezclas de diseño

En proyectos de estabilización de suelos, es fundamental establecer una relación de densidad entre las mezclas a evaluar, ya que esta influye directamente en la capacidad de soporte y en el comportamiento mecánico del suelo tratado. Al comparar diferentes proporciones de estabilizantes, como cal y cemento, es esencial analizar cómo varía la densidad de las mezclas, ya que una mayor compactación puede mejorar la resistencia. Esta propiedad permite optimizar los costos de material y mano de obra, asegurando que el tratamiento del suelo sea eficiente tanto técnica como económicamente.

Por ello, en este estudio se comparan distintas proporciones de cal y cemento, evaluando su impacto en la densidad del suelo compactado y estableciendo criterios para seleccionar la opción más adecuada en términos de rendimiento y costo,

**Tabla 54**

*Costo Mezcla Arcilla + % Cal en estado compactado*

MEZCLA ARCILLA + CAL 2% COMPACTADA			MEZCLA ARCILLA + CAL 3% COMPACTADA			MEZCLA ARCILLA + CAL 4% COMPACTADA		
1000	gr	S/ 4.00	1000	gr	S/ 4.00	1000	gr	S/ 4.00
60.38	gr	S/ 0.24	60.38	gr	S/ 0.36	60.38	gr	S/ 0.49
42.82	cm3	S/ 0.24	42.82	cm3	S/ 0.36	42.82	cm3	S/ 0.49
1	m3	S/ 5,640.35	1	m3	S/ 5,665.27	1	m3	S/ 5,693.29

**Tabla 55**

*Costo Mezcla Arcilla + % Cemento en estado compactado*

MEZCLA ARCILLA + CEMENTO 2% COMPACTADA			MEZCLA ARCILLA + CEMENTO 3% COMPACTADA			MEZCLA ARCILLA + CEMENTO 4% COMPACTADA		
42500	gr	S/ 28.00	42500	gr	S/ 28.00	42500	gr	S/ 28.00
61.72667	gr	S/ 0.04	93.4	gr	S/ 0.06	124.7867	gr	S/ 0.08
42.82	cm3	S/ 0.04	64.23	cm3	S/ 0.06	85.64	cm3	S/ 0.08
1	m3	S/ 949.72	1	m3	S/ 958.03	1	m3	S/ 959.98

**Tabla 56***Costo Mezcla Arcilla + % Cal en estado suelto*

MEZCLA ARCILLA + CAL 2% SIN COMPACTAR			MEZCLA ARCILLA + CAL 3% SIN COMPACTAR			MEZCLA ARCILLA + CAL 4% SIN COMPACTAR		
1000	gr	S/ 4.00	1000	gr	S/ 4.00	1000	gr	S/ 4.00
50.66667	gr	S/ 0.20	76.01	gr	S/ 0.30	98.94667	gr	S/ 0.40
42.82	cm3	S/ 0.20	64.23	cm3	S/ 0.30	85.64	cm3	S/ 0.40
1	m3	S/ 4,732.99	1	m3	S/ 4,733.61	1	m3	S/ 4,621.52

**Tabla 57***Costo Mezcla Arcilla + % Cemento en estado suelto*

MEZCLA ARCILLA + CEMENTO 2% SIN COMPACTAR			MEZCLA ARCILLA + CEMENTO 3% SIN COMPACTAR			MEZCLA ARCILLA + CEMENTO 4% SIN COMPACTAR		
42500	gr	S/ 28.00	42500	gr	S/ 28.00	42500	gr	S/ 28.00
50.93333	gr	S/ 0.03	76.65	gr	S/ 0.05	102.88	gr	S/ 0.07
42.82	cm3	S/ 0.03	64.23	cm3	S/ 0.05	85.64	cm3	S/ 0.07
1	m3	S/ 783.65	1	m3	S/ 786.22	1	m3	S/ 791.45

De las **Tablas 54, Tabla 55, Tabla 56** y **Tabla 57**, se observa que el costo total por metro cúbico aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de estabilizante, tanto para la cal como para el cemento. Sin embargo, la estabilización con cal es considerablemente más costosa en comparación con el cemento.

Por ejemplo, a una proporción del 4% con compactación, el costo con cal asciende a S/ 5,693.29 por metro cúbico, mientras que con cemento es solo S/ 959.98 por metro cúbico, lo que representa una diferencia de casi seis veces. Este patrón se mantiene en todas las proporciones, lo que indica que el cemento es una opción más económica para la estabilización de suelos.

El análisis también sugiere que la compactación contribuye al aumento del costo total, ya que eleva la densidad del suelo, requiriendo mayor cantidad de material estabilizante por unidad de volumen.

## Conclusiones

El comportamiento del límite líquido al incorporar cemento no sigue una tendencia clara. Con un 2% de contenido, se observa una disminución; al 3%, alcanza un valor máximo, y al 4%, se estabiliza manteniendo su valor inicial. Esta variabilidad sugiere que el efecto del cemento sobre el límite líquido depende del contenido y de las propiedades específicas del suelo tratado.

El cemento produce un incremento en el límite plástico, lo que, combinado con el comportamiento variable del límite líquido, conduce a una disminución general del índice de plasticidad (IP). Esta reducción es más marcada que la obtenida con cal viva, lo que indica un mejor desempeño del cemento en cuanto a la modificación de la plasticidad del suelo.

La incorporación de cemento al suelo produce un aumento en la humedad óptima requerida para la compactación. Sin embargo, este incremento es relativamente moderado, lo que implica que no se requerirán grandes volúmenes adicionales de agua en campo. Esto lo convierte en una alternativa más práctica en zonas con recursos hídricos limitados. En comparación con el cemento, la cal viva genera un aumento mucho más notable en la humedad óptima. Este efecto implica un mayor suministro del recurso hídrico durante la ejecución de los trabajos.

Los valores de CBR obtenidos al estabilizar con cemento no presentan mejoras significativas entre los contenidos del 2% y 3%. Sin embargo, al alcanzar un 4%, se evidencia un incremento considerable en el CBR. Aunque estos valores no superan a los obtenidos con cal viva, sí resultan adecuados para el mejoramiento de subrasantes. En cambio, en el caso de la cal viva se genera un aumento sustancial en el CBR del suelo, pasando de un valor inicial de 3.9% a un máximo de 62%. Esta mejora considerable en la capacidad de soporte convierte a la cal en un agente estabilizador altamente eficaz para suelos arcillosos, permitiendo su uso en capas inferiores con buenas condiciones estructurales.

Según el gráfico del MTC (*Figura 6*), el contenido óptimo de cal se aproxima al 4%, ya que a partir de este valor los incrementos en el CBR se vuelven poco significativos. Esto indica que emplear una concentración superior, como el 5%, no generaría mejoras sustanciales en el CBR, tal como se evidenció en la diferencia obtenida entre los contenidos del 3% y 4%. Por tanto, este análisis permite optimizar el uso del material, evitando dosificaciones innecesarias que podrían traducirse en sobrecostos.

Se evidencia que el parámetro de CUV (48.24%) merma la eficiencia de la Cal Viva, dado que para lograr la cantidad real de Cal Viva activa necesaria, el porcentaje nominal aplicado debe ser mayor, lo que implica un aumento considerable en el costo del material, así como en la demanda hídrica, impactando la viabilidad económica y operativa de este agente estabilizador.

El cemento logra mantener o aumentar la densidad seca máxima (entre 1.72 y 1.74 gr/cm<sup>3</sup>) y reduce el índice de plasticidad de manera constante (de 16% a 10%), con un aumento moderado en humedad óptima (de 14.8% a 16%). La cal, aunque reduce más el índice de plasticidad (de 28% a 18%) y mejora considerablemente el CBR (de 48% a 62%), aumenta notablemente la humedad óptima (de 18.5% a 25%), lo que implica mayor demanda hídrica.

Al comparar los costos de estabilización por metro cúbico en estado compactado, se evidencia que la mezcla con 2% de cal viva alcanza un valor de S/ 5,640.35, mientras que la mezcla con 2% de cemento tipo I tiene un costo de S/ 949.72. Esto indica que estabilizar con cal viva resulta 5.94 veces más caro. Esta diferencia de costos es crítica y debe ser considerada con rigor técnico y económico al momento de seleccionar el agente estabilizador.



## Recomendaciones

Se recomienda utilizar cal con un mayor porcentaje de Cal Útil Vial (CUV), ya que a mayor reactividad menor sería la proporción necesaria para estabilizar el suelo, esto optimiza costos, disminuye el consumo de agua y mejora la eficiencia y sostenibilidad del proceso de estabilización.

Antes de la ejecución de estabilizaciones, se debe realizar una planificación detallada del abastecimiento de agua, dado que tanto el cemento como la cal requieren una humedad óptima para su reacción y compactación, siendo especialmente crítico en el caso de la cal debido a su alta demanda hídrica.

Se recomienda priorizar el uso de cemento tipo I como agente estabilizador, ya que estabilizar con cal viva compactada puede ser entre 5 a 6 veces más costoso sin ofrecer un incremento proporcional en el CBR. Es por ello que la elección del agente estabilizador debe basarse en un análisis técnico-económico que considere tanto rendimiento como costos.

Se recomienda investigar la influencia de diferentes grados y métodos de compactación sobre la eficiencia de la estabilización con cal y cemento. Esto puede permitir identificar si mezclas con menor compactación logran propiedades mecánicas adecuadas, lo cual podría reducir costos y facilitar la ejecución en campo.

Es importante incorporar estudios que evalúen el impacto ambiental de ambos métodos de estabilización, considerando consumo de agua, emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes asociados a la producción y aplicación de cal y cemento. Esto ayudará a fomentar prácticas más sostenibles y a tomar decisiones más responsables dentro del sector de la construcción vial.

Para validar la durabilidad y desempeño de las mezclas estabilizadas, se recomienda realizar ensayos a largo plazo bajo condiciones reales de campo. Esto permitirá detectar posibles fallas, degradación o variaciones en propiedades mecánicas que no se manifiestan en pruebas de laboratorio, mejorando así la confiabilidad de los diseños y recomendaciones.

Finalmente, se sugiere explorar el uso de mezclas combinadas (cal + cemento) o la incorporación de aditivos que puedan reducir la demanda hídrica o mejorar la reacción química, buscando alternativas que optimicen costos, rendimiento técnico y sostenibilidad del proceso de estabilización.

## Referencias

- Albañil Ordinola, M. (2015). CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA DEL DISTRITO DE SULLANA. Piura: GOBIERNO REGIONAL PIURA - GERENCIA DE RECURSOS NATURALES Y GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE.
- Álvarez, B., & Rojas, L. (2020). Comparación de las alternativas de estabilización con cal, cemento, silicato de sodio y aceites sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad de Santo Tomás.
- American Concrete Institute. (2009). Report on Soil Cement. ACI COMMITTEE 230.
- ANCADE, ANTER, IECA. (2008). Manual de Estabilización de suelos con cemento o cal.
- Becerra, A., & Herrera, A. (2019). Estabilización de Arcillas, Arenas y Afirmados, empleando los cementos Pacasmayo Viaforte, Mochica y Qhuna. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Señor de Sipán.
- Calle, E., & Olivera, J. (2019). Uso de la técnica base suelo cemento en el pavimento flexible de la Av. Los Algarrobos entre Av. R y Av. Las amapolas - 26 de octubre – Piura. Tesis para optar por el título de Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo.
- García, J. (2019). Estudio de la Técnica Suelo-Cemento para la estabilización de Vías Terciarias en Colombia que posean un alto contenido de Caolín. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de Colombia.
- Gavilanes, E. (2015). Estabilización y Mejoramiento de Sub-Rasante Mediante Cal Y Cemento para una obra Vial en el Sector de Santos Pamba Barrio Colinas del Sur. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Internacional del Ecuador.
- Merino, M. (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura.
- 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 en carreteras.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas y Generales para Construcción.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotécnica y Pavimentos- Sección Suelos y Pavimentos.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de Ensayo de Materiales.

Morocho, F., & Casaverde, G. (2022). Diseño y aplicación de base estabilizada con cemento, producida en planta de suelos para el tramo 2 de la carretera departamental costanera II. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura.

Portland Cement Association. (2001). Soil-Cement: Laboratory Handbook.

Robles, J. (2018). Análisis y estabilización de arcilla negra con cloruro de sodio (NaCl), arena pómez, cal y cemento, para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.

Rosales, M. (2016). Gestión de infraestructura vial en la red departamental de la región Piura. Tesis para optar por el Grado de Máster en Ingeniería Civil con mención en Vial, Universidad de Piura.

Vega, J. (2010). Proyecto Perú. Obtenido de Provias Nacional: <http://www.proviasnac.gob.pe>

