



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE LA
SUBRASANTE CON LA ADICIÓN DE CAL Y RESIDUOS DE
ALBAÑILERÍA PARTICULADO EN SUELOS ARCILLOSOS DE
LA AV. LOS VIRREYES, JULIACA - 2023**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. CHRISTIAN ROGER CHUQUICALLATA ZAPANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO - PERÚ

2025



CHRISTIAN ROGER CHUQUICALLATA ZAPANA

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE CON LA ADICIÓN DE CAL Y RESIDUOS DE ALB...

- Tesis de pregrado
- Tesis de pregrado
- Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:473649911

Fecha de entrega
13 jul 2025, 9:18 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
13 jul 2025, 9:23 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
7. TESIS FINAL REPOSI - 2025 - CHRISTIAN ROGER CHUQUICALLATA ZAPANA.pdf

Tamaño de archivo
5.3 MB

192 Páginas

41.282 Palabras

214.763 Caracteres



Ing. Félix Rojas Chahuares
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2051221



Ing. Samuel Huaquisto Cáceres
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2007537





11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Ing. Samuel Huayque Cáceres
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2007537

Ing. Félix Rojas Chahuares
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2051221





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE
CON LA ADICIÓN DE CAL Y RESIDUOS DE ALBAÑILERÍA PARTICULADO EN
SUELOS ARCILLOSOS DE LA AV. LOS VIRREYES, JULIACA - 2023**

**TESIS PRESENTADA POR:
CHRISTIAN ROGER CHUQUICALLATA ZAPANA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:


.....
Mag. EMILIO CASTILLO ARONI

PRIMER MIEMBRO:


.....
Ing. JOSE LUIS CUTIPA ARAPA

SEGUNDO MIEMBRO:


.....
Dr. CESAR EDWIN GUERRA RAMOS

ASESOR DE TESIS:


.....
Dr. SAMUEL HUAQUISTO CACERES

ÁREA: Geotecnia Vial

TEMA: Mejoramiento de suelos arcillosos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 04 de julio de 2025




.....
Lic. Juana I. Zavaleta Gómez
Dr. En Matemáticas



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis estimados padres por su presencia, motivación y apoyo constantemente en mi formación académica.

Christian Roger Chuquicallata Zapana



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, familiares y amistades que me brindaron su respaldo y acompañaron en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco mi queridísima escuela profesional de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad Nacional del Altiplano, por formarme con conocimiento y moral dentro del ámbito profesional.

Expreso mi sincero agradecimiento a todos los docentes que me han acompañado a lo largo de mi formación universitaria; por compartir generosamente sus conocimientos, por su dedicación y por motivarme a desarrollar un pensamiento crítico y profesional.

También agradezco sinceramente a todas aquellas personas que contribuyeron, en cualquier medida, en el proceso y desarrollo del presente proyecto.

Christian Roger Chuquicallata Zapana



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2.1. Problema general.....	22
1.2.2. Problemas específicos	22
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.3.1. Hipótesis general.....	23
1.3.2. Hipótesis específicas	23
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
1.5.1. Objetivo general.....	26
1.5.2. Objetivos específicos	26

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	28
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.....	28
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	31
2.1.3.	Antecedentes Locales.....	39
2.2.	MARCO TEÓRICO	40
2.2.1.	Suelo.....	40
2.2.2.	Tipo de material	41
2.2.3.	Clasificación de Suelos	42
2.2.4.	Suelos Arcillosos.....	44
2.2.5.	Estructura de las Arcillas	45
2.2.6.	Subrasante	45
2.2.7.	Propiedades físicas de la subrasante	47
2.2.8.	Propiedades mecánicas de la subrasante	58
2.2.9.	Estabilización de Suelos.....	61
2.2.10.	Tipos de Estabilización de Suelos.....	63
2.2.11.	Residuos de Albañilería	68

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	ZONA DE ESTUDIO	70
3.1.1.	Ubicación	70
3.2.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	73
3.2.1.	Nivel de Investigación.....	73
3.2.2.	Diseño de investigación	74
3.2.3.	Enfoque de investigación	74
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO	75



3.3.1.	Población.....	75
3.3.2.	Muestra.....	75
3.4.	DISEÑO ESTADÍSTICO	78
3.4.1.	Prueba de Hipótesis	78
3.4.2.	Correlación	78
3.4.3.	Significancia.....	79
3.5.	VARIABLES	80
3.5.1.	Variable independiente.....	80
3.5.2.	Variable dependiente.....	80
3.5.3.	Variable interviniente.....	80
3.5.4.	Operacionalización de variables	80
3.6.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	81
3.6.1.	Técnicas.....	81
3.6.2.	Instrumentos	81
3.7.	PROCEDIMIENTO.....	81
3.7.1.	Etapa preliminar	82
3.7.2.	Trabajo en campo	82
3.7.3.	Ensayos de laboratorio	88

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	118
4.1.1.	Resultados de los valores característicos de la subrasante natural.....	118
4.1.2.	Resultados para el Índice de Plasticidad.	125
4.1.3.	Resultados de la Máxima Densidad Seca.....	137
4.1.4.	Resultados para la Capacidad de Soporte CBR.	146



4.1.5. Resultados de análisis de costos.....	157
4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS	168
4.2.1. Prueba de Normalidad.....	168
4.2.2. Prueba de Correlación Pearson para Índice de Plasticidad	169
4.2.3. Prueba de Correlación Pearson para Máxima Densidad Seca	170
4.2.4. Prueba de Correlación Pearson para CBR al 95%	172
4.3. DISCUSIONES.....	173
V. CONCLUSIONES.....	178
VI. RECOMENDACIONES	181
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182
ANEXOS.....	190



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Categorización de los materiales según sus características. 41
Tabla 2	Asociación de tipo de suelos según AASHTO-SUCS..... 44
Tabla 3	Categorización de subrasante..... 46
Tabla 4	Clasificación de suelos conforme al IP..... 52
Tabla 5	Clasificación de subrasante conforme al IG. 53
Tabla 6	SUCS; simbología para grava..... 55
Tabla 7	SUCS; simbología para arenas..... 56
Tabla 8	SUCS; simbología para limos y arcillas 57
Tabla 9	Ubicación geográfica de la Av. Virreyes..... 70
Tabla 10	Ubicación geográfica de las calicatas de estudio..... 71
Tabla 11	Cantidad de ensayos base para análisis..... 76
Tabla 12	Cantidad de ensayos especiales a realizar..... 77
Tabla 13	Interpretación del coeficiente de correlación..... 79
Tabla 14	Operacionalización de variables..... 80
Tabla 15	Cantidad de puntos de exploración según la tipología de vía..... 84
Tabla 16	Análisis químico de los residuos de albañilería particulado..... 87
Tabla 17	Regulación de las características de cal de obra..... 88
Tabla 18	Cantidades Mínimas de Material Húmedo Seleccionado..... 90
Tabla 19	Conformación de tamices estandarizados..... 91
Tabla 20	Estándares de lecturas de penetración y presión patrón..... 108
Tabla 21	Valores característicos de la subrasante en C – 1..... 118
Tabla 22	Valores característicos de la subrasante en C – 2..... 120
Tabla 23	Selección de Aditivo estabilizante..... 122
Tabla 24	Resultados de plasticidad con 4% cal para C-1..... 125
Tabla 25	Resultados de plasticidad con 4% cal para C-2..... 126
Tabla 26	Resultados de plasticidad con 8% cal para C-1..... 126
Tabla 27	Resultados de plasticidad con 8% cal para C-2..... 127
Tabla 28	Variación porcentual de IP con 4% constante de cal..... 133
Tabla 29	Variación porcentual de IP con 8% constante de cal..... 134
Tabla 30	Valores de DMS y CHO para la calicata N°01..... 137



Tabla 31	Valores de DMS y CHO para la calicata N°02.....	138
Tabla 32	Variación porcentual de la DMS.....	143
Tabla 33	Variación porcentual del CHO.....	144
Tabla 34	Compilado de CBR al 95% y 100% DMS en C-1.....	146
Tabla 35	Compilado de CBR al 95% y 100% DMS en C-2.....	146
Tabla 36	Variación porcentual del CBR al 95% DMS.....	149
Tabla 37	Variación porcentual del CBR al 100% DMS.....	151
Tabla 38	Hinchamiento del sustrato arcilloso en C-1.....	153
Tabla 39	Hinchamiento del sustrato arcilloso en C-2.....	155
Tabla 40	Tipo de mejoramiento de Subrasante.....	157
Tabla 41	Recursos respecto a materiales.....	158
Tabla 42	Recursos respecto a Equipos.....	159
Tabla 43	Recursos respecto a Mano de Obra.....	159
Tabla 44	Metrados de los espesores estructurales incidentes.....	162
Tabla 45	Incidencia de materiales en mezclas estabilizadas.....	164
Tabla 46	Costo de mejoramiento convencional.....	165
Tabla 47	Costo de mejoramiento mediante Estabilización con cal y RAP.....	165
Tabla 48	Variación porcentual de costo de mejoramiento.....	166
Tabla 49	Prueba de normalidad para datos de propiedades analizados.....	169
Tabla 50	Test de homogeneidad de varianzas para IP.....	170
Tabla 51	Test de homogeneidad de varianzas para DMS.....	171
Tabla 52	Test de homogeneidad de varianza para CBR.....	172
Tabla 53	Variación de costo de Estabilización según aditivo reciclado.....	176
Tabla 54	Variación de costo de Estabilización con respecto al convencional.....	176



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Estructura de clasificación AASHTO 42
Figura 2	Estructura de clasificación SUCS..... 43
Figura 3	Estructura molecular de láminas sílicas. 45
Figura 4	Curva granulométrica. 48
Figura 5	Cambios en los Límites de Atterberg. 50
Figura 6	Cuchara de Casa Grande. 50
Figura 7	Equipo para el ensayo LP. 51
Figura 8	Clasificación de suelos basado en ASTM D 3282 - ASSHTO M 145..... 53
Figura 9	Carta de plasticidad. 57
Figura 10	Equipo para densificación en Proctor Modificado. 59
Figura 11	Sistema automático para CBR..... 60
Figura 12	Proceso de selección para estabilización. 62
Figura 13	Guía de referencia para la elección de estabilizante..... 65
Figura 14	Guía adicional de referencia para elección de estabilizante..... 66
Figura 15	Ubicación política a nivel departamental del sector de análisis. 71
Figura 16	Ubicación política a nivel provincial del sector de análisis. 72
Figura 17	Localización de la Av. Virreyes – Juliaca. 73
Figura 18	Apertura de calicatas C – 1 y C – 2 en la avenida Virreyes Juliaca. 83
Figura 19	Identificación de los residuos de albañilería particulado. 86
Figura 20	Ensayo del análisis granulométrico. 92
Figura 21	Ensayo de LL usando una copa de Casagrande..... 95
Figura 22	Muestras ensayadas para determinar el IP..... 96
Figura 23	Preparación y humedecimiento de mezcla de suelo para molde proctor... 99
Figura 24	Compactado del espécimen para proctor modificado. 100
Figura 25	Preparación y humedecimiento de mezcla de suelo para CBR. 104
Figura 26	Compactación de especímenes en moldes CBR..... 106
Figura 27	Inmersión de especímenes y lectura inicial en deformímetro. 107
Figura 28	Penetración y lectura de la carga aplicada en prensa CBR. 109
Figura 29	Preparación, humedecimiento y mezclado de suelo – cal- RAP. 113



Figura 30	Extracción de especímenes de variaciones de suelo – cal- RAP de cámara húmeda.	116
Figura 31	Inmersión de especímenes de variaciones de suelo – cal- RAP.	117
Figura 32	Curva de gradación de partículas para C – 1.	119
Figura 33	Curva gradación de partículas para C – 2.	121
Figura 34	Familia de curva de fluidez para 4% de cal constante en C-1.	128
Figura 35	Familia de curva de fluidez para 4% de cal constante en C-2.	128
Figura 36	Familia de curva de fluidez para 8% de cal constante en C-1.	129
Figura 37	Familia de curva de fluidez para 8% de cal constante en C-2.	130
Figura 38	Compilado de plasticidad según él % RAP con 4% cal en C-1.	131
Figura 39	Compilado de plasticidad según él % RAP con 4% cal en C-2.	131
Figura 40	Compilado de plasticidad según él % RAP con 8% cal en C-1.	132
Figura 41	Compilado de plasticidad según él % RAP con 8% cal en C-2.	133
Figura 42	Diagrama de barras de la fluctuación de IP con 4% cal.	135
Figura 43	Diagrama de barras de la fluctuación de IP con 8% cal.	136
Figura 44	Familia de curvas de compactación para muestras de C-1.	139
Figura 45	Familia de curvas de compactación para muestras de C-2.	140
Figura 46	Incidencia de la DMS según él % RAP en C-1.	141
Figura 47	Incidencia del CHO según él % RAP en C-1.	141
Figura 48	Incidencia de la DMS según él % RAP en C-2.	142
Figura 49	Incidencia del CHO según él % RAP en C-2.	142
Figura 50	Diagrama de barras variación máxima densidad seca.	145
Figura 51	Incidencia del CBR según él % RAP en C-1.	147
Figura 52	Incidencia del CBR según él % RAP en C-2.	148
Figura 53	Diagrama de barras de la variación de CBR al 95% DMS.	150
Figura 54	Diagrama de barras de la variación de CBR al 100% DMS.	152
Figura 55	Expansión según porcentaje de RAP en C-1.	154
Figura 56	Expansión según porcentaje de RAP en C-2.	156
Figura 57	Espesores estructurales del pavimento analizado.	160
Figura 58	Longitud de análisis para Estabilización.	162
Figura 59	Variación de costo de mejoramiento de subrasante.	167



ACRÓNIMOS

AASHTO:	American Association of State Highway and Transport Oficial.
ACU:	Análisis de Costos Unitarios.
ADTT:	Tráfico Diario Promedio de Camiones.
ASTM:	American Society for Testing and Materials.
CAPECO:	Cámara Peruana de Construcción.
CBR:	California Bearing Ratio.
CE:	Componentes Estructurales.
CH:	Arcilla de Alta Plasticidad.
CHO:	Contenido de Humedad Óptimo (OCH).
CMO:	Contenido de Materia Orgánica.
DMS:	Densidad Máxima Seca (MDS).
EC-10RAP:	Estabilización con 4% de Cal y 10% de RAP.
EC-15RAP:	Estabilización con 4% de Cal y 15% de RAP.
EG:	Especificaciones Generales.
E-MGR:	Estabilización con Material Granular.
E-MGR:	Estabilización con Material Pétreo.
EMS:	Estudio de Mecánica de Suelos.
FE:	Factor de Esponjamiento.
GH:	Habilitaciones Urbanas.
GPS:	Sistema de Posicionamiento Global.
GS:	Gravedad Específica de los Sólidos.
HH:	Hora Hombre.
HM:	Hora Máquina.
IG:	Índice de Grupo.



IP:	Índice de Plasticidad.
LL:	Límite Líquido.
LP:	Límite Plástico.
MN:	Muestra Natural.
MPSR:	Municipalidad Provincial de San Román.
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
PCA:	Portland Cement Association.
PU:	Precio Unitario.
RAP:	Residuos de Albañilería Particulado.
RNE:	Reglamento Nacional de Edificaciones.
SAC:	Sociedad Anónima Cerrada.
SC:	Arena Arcillosa.
SPPS:	Statistical Package for the Social Sciences.
SUCS:	Unified Soil Classification System.
SUNAT:	Superintendencia Nacional de Administración Tributaria.
UTM:	Universal Transverse Mercator.



RESUMEN

Los suelos expansivos son comunes en muchas regiones del mundo donde se planea construir edificios, carreteras y otras estructuras. Estos suelos suelen ser débiles y pueden causar fallas en las construcciones. Es por ello que el presente estudio propone analizar las propiedades físico - mecánicas de la subrasante con adición de cal y residuos de albañilería particulado en suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca - 2023. La metodología empleada para el estudio es del nivel explicativo, mediante un enfoque cuantitativo basada en un diseño experimental, considerando como población objetivo a la Av. Los Virreyes de la ciudad de Juliaca, la muestra se conforma por el tramo delimitado entre las progresivas del Km 0+000 hasta 0+715.50 km de la avenida en mención. Los resultados derivados de la incorporación de cal y residuos de albañilería particulado en distintas proporciones, en el comportamiento físico – mecánico de arcillas con potencial de hinchamiento, presentan una mejora proporcionalmente al aumento progresivo del contenido de agente estabilizante, también muestran un incremento de costos en relación al método convencional de estabilización. En conclusión, se demuestra que la aplicación de cal y RAP presentan un efecto positivo teniendo a la proporción MN + 4% Cal + 15% RAP como mejor desempeño, obteniendo una disminución del 39.284% respecto al valor inicial para el IP, así mismo, se evidencia una variación de 2.569 % respecto al valor inicial para la máxima densidad seca y finalmente para el CBR se evidencia una variación del 221.154% respecto a la muestra natural, y económicamente es viable hasta la proporción de MN + 4% Cal + 10% RAP con respecto al mejoramiento convencional, considerando el más favorable, en el contexto de la MPSR.

Palabras clave: Arcillas, Cal, Estabilización, Residuos de albañilería, Subrasante.



ABSTRACT

Expansive soils are common in many regions of the world where buildings, roads, and other structures are planned. These soils are often weak and can cause construction failures. Therefore, this study proposes to analyze the physical and mechanical properties of the subgrade with the addition of lime and particulate masonry waste in clayey soils of Av. Los Virreyes, Juliaca - 2023. The methodology used for the study is at the explanatory level, through a quantitative approach based on an experimental design, considering Av. Los Virreyes in the city of Juliaca as the target population. The sample is made up of the section delimited between the progressives from Km 0+000 to 0+715.50 km of the aforementioned avenue. The results derived from the incorporation of lime and particulate masonry waste in different proportions, in the physical - mechanical behavior of clays with swelling potential, show an improvement proportionally to the progressive increase in the stabilizing agent content, also show an increase in costs in relation to the conventional stabilization method. In conclusion, it is shown that the application of lime and RAP have a positive effect having the proportion MN + 4% Cal + 15% RAP as the best performance, obtaining a decrease of 39.284% with respect to the initial value for the IP, likewise, a variation of 2.569% is evident with respect to the initial value for the maximum dry density and finally for the CBR a variation of 221.154% is evident with respect to the natural sample, and economically it is viable up to the proportion of MN + 4% Cal + 10% RAP with respect to the conventional improvement, considering the most favorable, in the context of the MPSR.

Keywords: Clays, Lime, Stabilization, Masonry waste, Subgrade.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antes de la fase constructiva de un proyecto de ingeniería, se debe verificar el área o terreno del proyecto existente para ver si puede soportar la carga estructural de las estructuras proyectadas. Los edificios, las carreteras y otras estructuras suelen fallar debido al asentamiento por consolidación de los cimientos construidos sobre un suelo débil. En respuesta a la carga estructural y las fallas de los cimientos, se han desarrollado varias formas para superar o mitigar las consecuencias de las malas condiciones del subsuelo (West, 2015). Además, la construcción de pavimentos de carreteras o estructuras de gran altura sobre suelos con características expansivas siempre es una problemática (Durotoye, Akinmusuru, Ogbiye, & Bamigboye, 2016). Los daños o la destrucción ocasionada por los suelos débiles y expansivos no se originan por la ausencia de soluciones ingenieriles, sino se debe a la falta de identificación de la gravedad del asentamiento o del grado de su expansión en las etapas iniciales del proceso de planificación del proyecto; debido a que las arcillas poseen rigidez en estado seco, pero al saturarse sucede lo contrario (Firoozi, Guney, & Baghini, 2017). Así mismo, los suelos expansivos se encuentran abundantemente en la mayoría de los territorios a nivel mundial, estos tienen propiedades complejas de cambios de volumen a poca profundidad según cambie el grado de humedad presente en el suelo (Al-Taie, 2023).

Desde otra perspectiva, los materiales residuales de fase constructiva y de demolición constituyen uno de los mayores volúmenes de desechos a nivel global; y debido a la carencia de un plan de gestión de materiales residuales adecuado, una parte considerable son destinados a vertederos, lo que se convierte en una amenaza latente para



el desarrollo sostenible y la integridad ecológica, siendo clave para enfrentar el desafío ambiental (Islam, y otros, 2019).

De igual manera, según Huisa (2015) la región de Puno, primordialmente la ciudad de Juliaca dispone de abundantes recursos destinados a la actividad constructiva; sin embargo, se presta poca atención a la adecuada gestión de los residuos generados por estas actividades, los cuales suelen ser depositados en zonas periféricas y desatendidas, contribuyendo así a la contaminación ambiental. Este problema es particularmente evidente en la ciudad de Juliaca, donde durante los años más recientes se ha evidenciado un incremento de renovación de infraestructuras, como es el caso del Centro de Salud perteneciente a Cono Sur, el Jr. Moquegua, así como las salidas hacia Arequipa y Puno. Los residuos provenientes de estas obras son trasladados a sectores bajos de la ciudad, donde se dejan en abandono sin ningún tipo de tratamiento o disposición final apropiada.

Las nuevas urbanizaciones en Juliaca son autorizadas por el gobierno local sin realizar los estudios de impacto ambiental, lo que ha generado la desaparición paulatina de ecosistemas como es el caso de la laguna temporal y otros humedales, asimismo la afectación al río Torococha; los cuales, de acuerdo a la normativa vigente, deben ser protegidos. Un caso concreto es la Urbanización Ampliación Alfonso Ugarte, ubicado al noreste de la ciudad, a la altura de la salida a Huancané; donde existía una laguna con presencia de flora y fauna desarrollado por años y que hoy ha sido eliminado mediante rellenos para habilitar áreas de construcción (Huanca & Paredes, 2017). Estos rellenos son generados principalmente con desechos, residuos de construcción, de demolición y material de baja capacidad portante, sin los procedimientos técnicos apropiados como la compactación, lo que inevitablemente ocasionará problemas estructurales en las infraestructuras, tales como asentamientos y filtraciones por ascensión capilar, comprometiendo la seguridad y durabilidad.



En la ciudad de Juliaca, la tipología de suelo es variada; por lo que se encuentran suelos arcillosos, no necesariamente de mayor predominancia que son caracterizados por presentar resistencia inapropiada o inadecuada a nivel de subrasante, pérdida de rigidez e hinchamiento al contacto con el agua, plasticidad alta, baja permeabilidad, susceptibilidad a los asentamientos diferenciales. Por lo tanto, se incumple con los requerimientos y solicitudes geotécnicas para el diseño pavimento, lo que genera problemas estructurales, funcionales y económicas a lo largo de la vida operativa de la vía. De este modo, en la avenida Los Virreyes de la ciudad de Juliaca existen suelos con textura arcillosa, se evidencia debido a una información previa de los habitantes y por la observación directa de algunos pozos a cielo abierto, aledañas a la vía.

Por otro lado, en los últimos años se están renovando varias edificaciones como centros educativos y vivienda familiares a nivel de la ciudad Juliaca, lo que causa demolición de la construcción existente, por ende, estos residuos son transportados y depositados en las áreas bajas para relleno, incluyendo humedales o lagunas, y/o simplemente son abandonados en principales salidas de la ciudad, tal es caso de la salida a Arequipa, Huancané y Puno. De igual modo, en las empresas ladrilleras se generan desperdicios y residuos producto de la fabricación de la unidad de albañilería, que son acumulados por años dentro su jurisdicción o a nivel periférico propiamente dicho, tal es el caso de la ladrillera LAMAX S.A.C ubicada en el kilómetro 7+000 de la salida a Arequipa. Existe la ausencia de la gestión del reciclado, tratamiento y destino final de estos materiales residuales producto del ciclo constructivo, de fabricación y de desmantelamiento (destrucción); por lo que se contribuye a la contaminación ambiental, problemas ecológicos y un desarrollo sostenible inadecuado.

Los residuos de ladrillo, tras triturarse se puede transformar en un agente estabilizador, en ese entender, se pueden aprovechar en el mejoramiento de suelos



blandos y débiles, en esta circunstancia de tipo arcillosa, para incrementar la resistencia mecánica y mejorar las características físicas. Para que el comportamiento de estos residuos particulados se potencialice se debe usar en combinación de otro aditivo estabilizante conocido y normado.

Con el fin de reducir las problemáticas de la subrasante y mitigar la contaminación ambiental se usará la cal y residuos de albañilería particulado en combinación con las muestras del sustrato arcilloso. A partir de lo descrito en esta investigación se plantea y redacta las interrogantes que se detallan a continuación:

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es el efecto de la adición de cal y residuos de albañilería particulado en las propiedades físico – mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la incidencia de la adición de cal y residuos de albañilería particulado en la plasticidad del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023?
- ¿Cuál es la incidencia de la adición de cal y residuos de albañilería particulado en la máxima densidad seca del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023?
- ¿Cuál es el incremento de la capacidad de soporte CBR adicionando cal y residuos de albañilería particulado en las muestras de suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023?



- ¿Cuál es la variación de costo de la subrasante adicionando cal y residuos de albañilería particulado, con respecto al costo convencional en los suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

- Las propiedades físico – mecánicas con la adición de cal y residuos de albañilería particulado en suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca, tienen una mejora significativa.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La cal y los residuos de albañilería particulado inciden reduciendo el índice de plasticidad del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.
- La cal y los residuos de albañilería particulado inciden aumentando la máxima densidad seca del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.
- La cal y los residuos de albañilería particulado inciden significativamente incrementando la capacidad de soporte CBR de las muestras de suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023
- La cal y los residuos de albañilería particulado inciden variando el costo de la subrasante de manera benéfica, con respecto al costo convencional en los suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La potencialización del suelo usando materiales de desecho se están volviendo popular, económico y respetuoso con el medio ambiente donde muchos de estos que son



residuos de demolición de construcciones, subproductos de construcción y otros tipos de desechos han demostrado ser estabilizadores con altos valores de soporte. El uso de estos desechos desempeña un rol fundamental en la optimización de los gastos constructivos y la solución de la contaminación ambiental (Amena, 2021). Las investigaciones realizadas muestran que los desechos de ladrillos se pueden utilizar como agregados en diferentes capas de pavimento, en mezclas de concreto y como materiales de construcción (Raa B, 2016), también se demostró la idoneidad de los residuos de las piezas de albañilería para incrementar la capacidad de resistencia del suelo. Muchos investigadores han encontrado que la mezcla de desechos de albañilería particulado con otros aditivos muestra una mejora considerable en los lineamientos de resistencia de los suelos débiles (Disfani, Arulrajah, Haghghi, Mohammadinia, & Horpibulsuk, 2014). Así mismo, diferentes investigadores observaron que el sistema de estabilización con cal es mejor y una técnica ampliamente utilizada con éxito a lo largo de los años en comparación con otras técnicas que utilizan otros materiales estabilizadores (Anaokar & Mhaskar, 2019). Según Villalta & Chang (2020) indican que la inclusión de materiales residuales como ladrillo particulado fortalece las propiedades físicas - mecánicas del estrato arcilloso disminuyendo su índice de plasticidad e incrementando el grado de compactación.

El empleo de nuevas alternativas de agentes estabilizantes es importante y fundamental que permitan mejorar el comportamiento físico-mecánico de los suelos arcillosos, utilizándose así el material existente y no depender de material préstamo. La subrasante de la avenida Los Virreyes del núcleo urbano de Juliaca se conforma por suelos de tipología arcillosa en cierta proporción, donde el prisma vial se ve impactada negativamente en temporada de lluvias, presentando deficiencias como es el caso de baches, hundimientos, charcos y asentamientos; por lo que se reduce la vida útil de la vía,



afectando la transitabilidad e incrementan los costos asociados al mantenimiento y conservación.

Desde otra perspectiva, el reciclaje de restos de demolición y construcción nos lleva a decrementos importantes en el uso de energía, los recursos naturales, en las emisiones de CO₂ y los vertederos ilegales, por lo que se puede aprovechar en el tratamiento de suelos tipo blandos, con una buena gestión de residuos y desarrollo de manera aceptable (Islam, y otros, 2019). Los residuos de albañilería particulado vienen a ser un insumo obtenido a partir de la molienda de ladrillos reciclados, estos últimos se acumulan en grandes proporciones en las empresas ladrilleras durante años siendo desaprovechados y desperdiciados, lo cual pueden abastecerse. Al usar este insumo como agente estabilizador en el mejoramiento de vías, se promueve el reciclaje de residuos de construcción, fábrica y demolición generando así un efecto positivo en el entorno ambiental como también indicios de gestión de reciclado; además se reduce el uso de recursos provenientes del entorno natural tal es el caso de explotación de canteras, por ende, se generan menos emisiones de CO₂ incluyendo por los motivos de transporte. Asimismo, el aprovechamiento de estos residuos evita que se depositen en lugares no autorizados, lo que previene los problemas urbanos y la contaminación ambiental.

Se precisa tres maneras de estabilizar un suelo débil y arcilloso; uno de ellos es mediante la sustitución o reemplazo total del material, lo que implica costos elevados si no se cuenta con canteras cercanas a la zona requerida, también vendría a ser una técnica comúnmente usado en la ciudad de Juliaca. El segundo sistema es mediante el reemplazo parcial del material existente, utilizándose así material de préstamo, se realiza la combinación y el mezclado homogéneo; de igual modo implica mayores costos, por el proceso de mezclado, corte y trabajabilidad. La última alternativa es incorporando un agente estabilizante al material existente, tratándose de los residuos de albañilería



particulado, esta alternativa viene a ser la más conveniente y económica, si realmente mejora el comportamiento físico-mecánico de la subrasante significativamente y en una menor proporción. Al realizar el mejoramiento de la avenida en mención, se posibilita un mayor flujo comercial, puede facilitar el transporte urbano y peatonal en cualquier época del año y también el acceso a servicios básicos. Al usar estos residuos se representa una alternativa socialmente responsable, que contribuye al bienestar de la población fortaleciendo la conectividad entre las personas. Esta práctica nos permite disminuir la proliferación de escombros en espacios públicos, vertederos informales, áreas bajas, lotes baldíos y zonas periféricas; mejorando así la salubridad, fomentando la reutilización, el reciclado de materiales residuales y la concientización ambiental.

A raíz de lo expuesto, se efectuará un análisis de propiedades físico - mecánicas respecto a subrasante con cal y residuos de albañilería particulado en diferentes porcentajes con la finalidad de demostrar que estos materiales influyen favorablemente en suelo de estudio.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

- Analizar las propiedades físico mecánicas de la subrasante con adición de cal y residuos de albañilería particulado en suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca - 2023.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la incidencia de la adición de cal y residuos de albañilería particulado en la plasticidad del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.



- Determinar la incidencia de la adición de cal y residuos de albañilería particulado en la máxima densidad seca del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.
- Determinar el incremento de la capacidad de soporte CBR adicionando cal y residuos de albañilería particulado en las muestras de suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.
- Determinar la variación de costo de la subrasante adicionando cal y residuos de albañilería particulado, con respecto al costo convencional en los suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Según Amena (2021), menciona que en muchos lugares a nivel mundial existen suelos expansivos, este tipo de suelo es más débil, donde presenta características de baja resistencia a la carga, debido a su dificultad en la alteración de volumen cuando se expone al elemento hídrico. En la construcción de infraestructura civil, dicho suelo debe ser removido o mejorado para ser utilizado como suelo de cimentación. Sin embargo, la eliminación del suelo genera costos adicionales de construcción. Por otro lado, mejorar requiere aumentar la rigidez y la capacidad estructural de la carretera tratándola con estabilizadores, que ayudan a lograr un bajo costo y un buen rendimiento. Este estudio propone tratar dichos suelos con materiales desechados para potenciar la resistencia del sustrato de suelo a la presión y atenuar la contaminación. La metodología es experimental. Como resultados de las pruebas físicas - mecánicas al suelo en su contexto natural se logra un IP de 25.1%, una humedad de 49%, una DMS de 1.496 gr/cm³, un CHO de 24% y 2.68% de índice resistente y para el estado modificado con dosificaciones de tiras de plástico y residuos de ladrillo; 0.25%PWS + 20%PA, 0.25PWS% + 30%PA, 0.25%PWS + 40%PA, 0.5%PWS + 20%PA, 0.5PWS% + 30%PA, 0.5%PWS + 40%PA, 0.75%PWS + 20%PA, 0.75PWS% + 30%PA y 0.75%PWS + 40%PA, una DMS de 1.663, 1.669, 1.673, 1.659, 1.664, 1.671, 1.651, 1.661 y 1.665 en unidades de gr/cm³ según corresponda, un CBR de 3.64%, 4.29%, 5.23%, 4.72%, 5.37%, 7.08%, 5.92%, 6.92% y 8.86%. Se concluye que el



uso del plástico y los residuos de ladrillo particulado mejora las características del suelo expansivo minorando su índice plástico e incrementando la capacidad de soporte.

Citando a Srikanth et al (2018), los suelos de algodón negro son una bendición para la agricultura, pero también que son una seria amenaza para la construcción basada en ellos. Estos suelos presentan la propiedad de una gran hinchazón debido a la absorción de agua y la contracción debido a la evaporación del agua en las estaciones de verano. Debido a esta naturaleza de alta expansión y contracción, las estructuras construidas en estos suelos experimentan grietas, lo que los hace inapropiados para la cimentación. Por lo tanto, existe la necesidad de renovar el suelo de algodón negro para que sirva como material de base. La metodología es experimental. Como resultados de la prueba de CBR incorporando los residuos de ladrillo particulado en porcentajes de 20%, 40%, 60% y 80% se obtiene 20.07%, 7.81%, 4.67%, 11.82% respectivamente. Consecuentemente deduce que adicionando un 20% de restos de ladrillo particulado al suelo acrecienta significativamente el valor del CBR por lo que este material es apto para procesos de estabilización, ya que permite reforzar las condiciones de terreno.

De acuerdo a Vakili et al (2021), existen múltiples técnicas físicas y químicas para mejorar los suelos según las condiciones de los proyectos de construcción. Dentro de ellas, la estabilización mediante tratamiento químico siendo uno de los mecanismos más habituales para superar las características destructivas de los suelos. Se realizan varios estudios en relación al mejoramiento de suelos por medio del uso de cal, cemento, cenizas volantes y otros estabilizadores similares. En general, la aplicación de estos en el suelo contribuye



a alteraciones en los atributos geotécnicos del suelo, como su resistencia, el indicador de elasticidad y la capacidad de reacción de la subrasante ante las cargas; por lo que sostienen determinar las características geotécnicas de suelo tratado con cal. El enfoque metodológico corresponde a un diseño experimental. Como efecto de las evaluaciones al suelo en su aspecto natural se resalta el IP de 15.56%, DMS de 1.7 gr/cm^3 , OCH de 19.39%, un CBR de 7%, una capacidad resistiva a la compresión en la situación no confinada de 0.98 kg/cm^2 y con añadiduras de 2%, 5% y 8% de cal alcanza los siguientes indicadores para el CBR; 16.3%, 19.5% y 16.8% y la capacidad a la compresión simple, 1.97 kg/cm^2 , 2.04 kg/cm^2 y 2.4 kg/cm^2 relativamente. Se afirma que incrementando 2% de cal al suelo este logra resultados óptimos incrementando el CBR del suelo analizado.

Citando a Bello (2019), menciona que algunos residuos tanto solidos como líquidos producidos por la industria poseen propiedades fisicoquímicas que posibilitan su aprovechamiento en la estabilizacion de vías no pavimentados. Dentro de estos materiales sobresale el polvo de ladrillo, originado durante las fases de cocción y acopio en la industria ladrillera, que presenta actividad puzolánica debido a su contenido de óxidos de silicio y alúmina (SiO_2 , Al_2O_3) lo que genera la viabilidad técnica como estabilizante. Para evaluar el impacto ambiental de su producción, el investigador aplica un ACV (análisis de ciclo de vida) conforme a la ISO 14044 y la metodología propuesta por Vicente Conesa-Vítora. El estudio define los objetivos, alcance, límites del sistema y también la cuantificación del inventario de entradas y salidas. En el cual se establece 50 kg de estabilizante como unidad funcional, considerando 50 toneladas como base de cálculo para estabilizar 200m de vía. Para modelar los datos y valorar los impactos ambientales el autor utiliza la base Ecoinvent 99H y el software SimaPro,



mediante la integración de información tanto de laboratorio como pruebas de campo. Dentro de sus conclusiones afirma que, el polvo de ladrillo actúa como estabilizante con propiedades supresoras de polvo, logrando una eficiencia del 92%, superior al material agregado natural, cuya eficiencia se sitúa en 62%. Asimismo, la estabilización de una vía tipo terciaria usando polvo de ladrillo genera un impacto positivo al ambiente con -568pt respecto a la estabilización con agregado natural lo cual genera un impacto negativo al ambiente con 1463pt, esto debido al consumo de recursos naturales no renovables.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

De acuerdo a Villalta & Chang (2020), en el distrito de Huancavelica no se aplican suficientemente eficientes que contribuyan a potencializar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso. Ante esta situación, cobra relevancia profundizar en nuevas variantes de estabilización que aporten y ofrezcan soluciones viales tanto desde una dimensión ambiental y en el económico. Por ello, los autores plantean como objetivo evaluar la influencia de la puzolana de procedencia natural, la goma guar y los residuos de ladrillo particulado en la mejora del comportamiento mecánico, físico y resistencia de suelos arcillosos, desarrollando un estudio de nivel descriptivo con una visión de diseño experimental. Los resultados correspondientes al suelo sin tratamiento y a las combinaciones con incorporaciones de 5%, 10% y 15% de puzolana natural, junto con un 10% de material particulado proveniente de residuos de ladrillo reflejan; IP de 17.40%, 12.52%, 6.35% y 6.33%, una DMS de 1.94, 1.92, 1.90, 1.88 expresando en gr/cm^3 , del análisis de corte directo consiguen hallar los siguientes ángulos de fricción 31.5, 22.2, 26.7, 31.0 en grados y respecto a la cohesión, obtienen valores de 0.51, 1.15, 0.92 y 0.69 medido en kg/cm^2 . A partir de la



evidencia experimental se infiere que incorporando la puzolana natural con los residuos de ladrillo particulado potencializa el suelo en comparación al suelo en estado natural.

Según Ccansaya & Tello (2022), durante la implementación de proyectos vinculados a la ingeniería civil, específicamente en el ámbito de las infraestructuras viales, es frecuente la presencia de algunos suelos que no satisfacen las exigencias mínimas para soportar estructuras. Un ejemplo típico son las arcillas con altos índices de plasticidad, las cuales generan significativas variaciones de volumen a raíz de los cambios en su humedad. Estas alteraciones experimentan una reducción en los indicadores de cohesión del material y, por consiguiente, una disminución en su capacidad portante. Bajo esta perspectiva, el propósito central de este estudio es evaluar la efectividad de la cal como agente estabilizador sobre el suelo arcilloso seleccionado, con miras a su aplicación posterior como estrato de subrasante en el diseño del pavimento tipo flexible. Donde la metodología empleada está dividida en las diferentes actividades a realizar, siendo a nivel experimental. Los resultados obtenidos adicionando 0%, 5%, 10%, 20%, 30% y 40% obteniendo los siguientes IP 17.69%, 20.45%, 23.63%, 25.51% Y 29.85%, el CBR fue de 3.5%, 12.1%, 15.1%, 15.6% y 12.2%, la capacidad a compresión simple fue de 0.37, 9.1, 7.4, 11.8 y 13.6 en términos de kg/cm^2 . Las evidencias experimentales permiten concluir que la adición de cal impacta directamente en las características físico-mecánicas del suelo, generando una disminución en el IP y un aumento en la capacidad de soporte representada por el CBR.

Conforme a Guerrero & Velez (2024), los suelos expansivos representan una condición geotécnica desfavorable, debido a su alta susceptibilidad a la



fluctuación volumétrica inducida por las alteraciones en el contenido de humedad, lo cual conlleva a una limitada capacidad de soporte y genera inestabilidad estructural. Ante ello, se evalúan la viabilidad del uso de estabilizantes alternativos como la cal, los residuos de albañilería particulado (RAP) y restos de ceniza de aserrín de viruta de cedro, los cuales presentan propiedades puzolánicas y cementantes capaces de mejorar el comportamiento mecánico del suelo. Donde plantean determinar el efecto sinérgico de estos aditivos sobre un suelo de carácter expansivo, empleando procedimientos de laboratorio tales como el test proctor modificado (indicadores DMS y CHO) y la determinación del CBR, y utilizando muestras obtenidas en la región Lambayeque. Las probetas se trataron con una dosificación constante de 6% de cal, y dosificándolos en niveles variables de ceniza de aserrín (8,10, 12 %) y de residuos de albañilería particulado (10, 15, 20 %). De acuerdo con los resultados experimentales, la combinación más eficiente está compuesta por 6% de cantidad de aditivo cal, un valor de 10% de pulverizados de aserrín (combustión) y 15% de RAP, en relación al material base, por lo que produce un incremento del CBR no drenado en 327%, elevando su valor de 1.93% a 6.33%. Dicho incremento posibilita la reclasificación de la subrasante dentro de la categoría de capacidad portante regular, conforme a los lineamientos establecidos en el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014), dado que respalda su viabilidad para ser utilizada en el diseño de pavimentos flexibles.

Citando a Quispe & Rivera (2019), se enfocan en el análisis del tratamiento químico aplicado a suelos arcillosos utilizando cal viva, con el propósito de identificar la dosificación más eficiente que contribuya a incrementar significativamente la capacidad para soportar cargas de la subrasante destinada a



estructuras de pavimento flexible. Las extracciones de suelo se realizaron en Villa Rica, en el punto kilométrico 3+000 de la vía Oconal – Cedropampa. El elemento cal, al reaccionar con minerales arcillosos, induce reacciones puzolánicas y procesos de floculación-aglomeración, los cuales disminuyen el IP, reducen el potencial de expansión volumétrica y mejoran la resistencia mecánica del suelo. Los procedimientos experimentales incluyen límites de Atterberg, granulometría, gravedad específica, proctor modificado y CBR no drenado, aplicados al suelo en la situación natural y a combinaciones con contenidos de cal al 9%, 15% y 21%. Asimismo, se aplicaron las metodologías de clasificación AASHTO y SUCS, a fin de evaluar las características del suelo previo y posterior al proceso de estabilización. Los datos experimentales muestran que la adición de un 15% de cal incrementa el CBR de 3.3% a 5.9%, lo que materializa a una mejora considerable en el potencial de soporte de la subrasante, permitiendo reclasificar la subrasante conforme a los criterios del diseño estructural de pavimentos. Finalmente, efectúan un análisis comparativo de costos considerando dos escenarios diferenciados: uno con subrasante en estado natural y otro con subrasante estabilizada con la dosificación óptima, demostrando la viabilidad técnica y económica del tratamiento propuesto.

Según Quispe (2020), el desarrollo continuo del sector de la construcción implica la generación de importantes cantidades de materiales residuales, debido a la actividad constructiva y de demolición, sin embargo, estos no reciben un tratamiento adecuado y la población suele depositarlos en botaderos no controlados y/o informales. Con esta práctica se desaprovecha e implica la pérdida de materiales reciclables, además, afecta de forma negativa al sector ambiental. En distintos proyectos viales, el tipo de fundación encontrado presenta una calidad



deficiente y desfavorable, en consecuencia, un índice inadecuado de capacidad de soporte, dichos suelos no satisfacen las exigencias para desempeñarse como una subrasante. Donde se formula, evaluar el comportamiento de la subrasante al ser tratada con materiales residuales de construcción – demolición en la zona del jirón Amazonas, Chilca. La metodología adoptada sigue los principios del método científico, clasificada como aplicada, con un nivel de alcance explicativo y estructurada bajo un diseño experimental. Consecuentemente las evidencias del suelo natural con la prueba del análisis granulométrico la distribución del material presenta 1.94% de contenido de grava, 57.91% arena y un 40.16% de material fino, un IP de 22.58%, una DMS de 2.04 gr/cm³, un OCH de 10.47% y el CBR es de 5.82% y para las adiciones de 20%, 30% y 40% de residuos de ladrillo obtiene los siguientes IP de 8.44%, 8.09% y 8.19%, una DMS de 2.09, 2.06 y 2.04 en términos de gr/cm³, un CHO de 9.35 %, 10.11% y 10.42% el CBR de 9.40%, 12.80% y 11.45% correlativamente, por lo que deduce que la integración de desechos de ladrillo inciden mejorando las propiedades geotécnicas de la subrasante. El empleo de desechos de revestimiento en el proceso de estabilización en términos de subrasante resulta económicamente favorable, mientras los residuos de ladrillo y concreto incrementaron los costos, siendo menos rentables que el material de cantera.

De acuerdo a Tacca (2021) indica que, en el contexto peruano, existe un considerable número de carreteras que no reúnen las exigencias mínimas de calidad necesarias para su proceso de afirmado o pavimentación, situación atribuible especialmente a la influencia de suelos arcillosos en la zona, lo que afecta de manera significativa el desarrollo de los proyectos viales. Por tal motivo, propone estabilizar el sustrato de suelo de naturaleza arcillosa mediante la



añadidura de cal, con el fin de optimizar las condiciones de la subrasante concerniente a la vía de evitamiento, zonificado en Abancay – Apurímac, 2021. El estudio lo realiza mediante un enfoque cuantitativo, utilizando un método hipotético deductivo. Tal estudio se sitúa dentro de una investigación aplicada, implementando un nivel de experimentación, en donde se plantean hipótesis que luego se someten a prueba a través de experimentos. Los resultados demuestran que al agregar proporciones de cal del 4%, 8% y 12% potencializa la resistencia del suelo, por ende, estabilizando la subrasante. La muestra del suelo tratado con un 12% de cal alcanza un CBR (relativo al 95% y para 0.1") de 28.5%, seguido de un 8% de cal, que logra un CBR (relativo al 95% y para 0.1") de 24.95%, de igual forma, con un 4% de cal alcanza un CBR (relativo al 95% y para 0.1") de 19.2%, valores notablemente superiores al CBR (relativo al 95% y para 0.1") de la muestra natural de 9.4%. Por último, se infiere que potencializa la capacidad de soporte para incrementos de 4%, 8% y 12% de cal y consecuentemente estabiliza la subrasante del terreno. Además, se deduce que la mezcla óptima con cal es del 8%.

De acuerdo a Mendoza (2023), en su investigación señala como propósito realizar un análisis tipo comparativo de las propiedades físicas - mecánicas en relación a suelo arcilloso con tres prototipos de estabilizantes; ceniza de carbón, cal, cemento y en cantidad de 4%, 7, 10% y 13% con el objeto de determinar cuál de las proporciones con cal permite mejorar de manera significativa las características físicas - mecánicas del suelo, de modo que pueda ser utilizado como material estabilizado a nivel de la subrasante de un pavimento. Siendo la solución al problema de inestabilidad y baja capacidad de soporte de suelos arcillosos, con un bajo costo e impacto ambiental. La investigación utiliza técnicas



como observación, análisis de documentos y normatividad, que pertenece a lo cuantitativo. En ese entender, busca dar una solución práctica y eficiente en términos de costos y beneficios al problema de suelos inapropiados para la construcción de pavimentos. Finalmente se deduce que las tres combinaciones (suelo/cemento, suelo/cal y suelo/ceniza de carbón) mejoran las características del suelo arcilloso desde el 7% de incremento. Reducen plasticidad, su permeabilidad, mejoran la trabajabilidad y la capacidad resistiva. La dosificación suelo/cemento presenta una resistencia más notable de 13% de adición, resaltándose como el óptimo, ya que al agregar más la muestra adquiere elevada rigidez, aminorando la resistencia. La proporción suelo/cal, a diferencia de las otras dos, logra sus parámetros de estabilización con una respuesta rápida al interactuar con el suelo, activándose con la mínima humedad. Las combinaciones suelo/ceniza y suelo/cal, a distención de suelo/cemento, no dependen del tiempo de curado para su resistencia, necesitando solo 7 días, mientras en suelo/cemento la resistencia depende del curado.

Considerando a Bustamante (2022), realiza un estudio en el distrito de Chota con la finalidad de determinar la influencia de residuos de albañilería pulverizado en la capacidad resistiva de la subrasante concerniente a carretera San Mateo. En el cual aplica una metodología cuantitativa, de tipo básica, de nivel descriptivo y bajo un diseño experimental puro. El investigador toma muestras de las calicatas entre los km 0+000 y 3+000, analizando el suelo natural y en combinación con polvo de ladrillo al 10%, 14% y 18%. Después realiza procedimientos de granulometría, clasificación SUCS, límites de Atterbeng, proctor modificado y CBR, por medio del uso de un muestro no probabilístico, por juicio de expertos. Los resultados mencionan que los suelos in situ son arcillas



de plasticidad media (CL) para los tres puntos de exploración, los valores característicos promedios presentan un IP de 19.31%, un CHO de 21.93%, un DMS de 1.48 g/cm^3 , el CBR tanto al 95% como 100% son de 3.70% y 5.47%; con respecto al polvo de ladrillo describen que corresponden a arenas arcillosas (SL). Se consigue identificar la dosificación óptima perteneciente a 18% con un IP de 14%, CHO de 13.82%, un DMS de 1.92 g/cm^3 , un CBR de 10% y 17.40% respectivamente; por lo cual se logra reducir el contenido de humedad en 8.11%, incrementar la densidad seca en 0.44 g/cm^3 y se mejora el CBR en 6.30% (95% de compactación) y 11.93% (100% de compactación). El autor concluye que al agregar ladrillo tipo pulverizado mejora de forma significativa y notable la capacidad portante del suelo.

Según a Cortegana & Vega (2024), en la ciudad de Tingo María, se reportan constantes quejas debido al deterioro constante de las vías que conectan a Huánuco, agravado por lluvias que provocan hundimientos en varios tramos. Esta vía primordial para el transporte mercantil entre Lima, Huánuco, Tingo María y Ucayali, enfrenta elevados riesgos de accidentes, fundamentalmente por el tránsito frecuente de camiones cisterna encargados del combustible. El objetivo principal que plantean es la de evaluar el incremento del CBR de un suelo arcilloso en el sector Mapresa, específicamente en km 4+100 de la carretera Interoceánica, mediante la incorporación combinada de cenizas producto de las hojas de plátano (CHP) y ladrillo pulverizado (PL). Los autores se basan en una metodología a nivel explicativo bajo un diseño experimental verdadero, se rigen en el método científico. EL suelo corresponde a arcillas de tipo orgánica con plasticidad media (OL) según SUCS, donde presenta un CBR de 5.43% sin tratamiento alguno; para su estabilización ensayan tres proporciones de aditivos: 8% (2% CHP + 6% PL),



15% (5% CHP + 10% PL), 25% (7% CHP + 18% PL). A cada combinación aplican ensayos proctor y CBR, generando resultados comparativos. Se evidencia que al 8% de añadidura alcanzan obtener un CBR de 11.30%, al 15% un 12.40% y con el 25% logran un mayor valor de 13%. Finalmente concluyen que la dosificación optima es al 25% de adición, desempeñándose como la mejor situación para estabilizar, donde la subrasante se recategoriza de regular a buena, demostrando que la combinación de CHP y PL mejora significativamente la capacidad portante del terreno.

2.1.3. Antecedentes Locales

De acuerdo a Quispe, E. (2024), dentro de la problemática menciona sobre la inestabilidad a nivel de subrasante de la carretera lampa (desvío) hacia la Isla, referente a la progresiva 1+000 km hasta 4+000 km, además de estar abandono y con daños estructural, por falta de presupuesto. Plantean dentro de los objetivos, la de determinar la incidencia de la añadidura de polvo de ladrillos (reciclados) en el CBR de la subrasante en vías rurales, Puno. Utilizan una metodología a nivel cuantitativo con un diseño experimental referente a una dimensión interpretativa, la muestra es procedente del sector rural mencionado, y realizan ensayos de clasificación SUCS, IP, Proctor modificado y CBR, con incrementos de polvo de ladrillo en 10%, 15% y 20%. Dentro sus resultados indican la incorporación del estabilizante a suelos CL (arcilla de plasticidad media) y SC (arena arcillosa), el CL presenta un DMS y CHO de 1.47 g/cm^3 y 27.94%, y también un CBR de 3.70% al 100% de confianza. Concluyen que con la adición de 20% de polvo de ladrillo, dieron lugar a grandes incrementos favorables a nivel de CBR y reducción del IP del suelo CL; los valores de variabilidad en el punto de investigación critico (CL) con referente al IP es de 17.19% a 13.73%, a nivel de DMS y CHO es de



1.47g/cm³ y 23.35% a 1.91g/cm³ y 15.21% respectivamente, y referente a CBR al 95% es de 3.57% a 9.93%; cumpliendo los requerimientos mínimos de la normativa peruana.

Conforme a Huancoillo (2017), ciertos suelos de naturaleza arcillosa, debido a su baja o limitada resistencia estructural y propiedades inadecuadas, no satisfacen los estándares mínimos exigidos para su aplicación en proyectos y/o obras de pavimentación. El fin de la investigación es evaluar los parámetros físico-mecánicos y el costo asociado a la añadidura de ceniza volante (CV) y cal (C) en un suelo arcilloso (S), con el propósito de incrementar su resistencia y estabilidad volumétrica, permitiendo su uso como base. El material es de la cantera Yanahoco zonificado en el km 2+000 de la carretera Desvió Huancané a Chupa, que pertenece al grupo de arenas arcillosas SC según SUCS, con un IP de 12.44%, OCH de 10.45%, un DMS de 2.092 g/cm³, un CBR de 20% al 100% de la DMS y una expansión de 1.67%. El autor evalúa tres proporciones con fines de estabilización los cuales son: 90%S + 5%CV + 5%C, 90%S + 15%CV + 5%C, y 90%S + 25%CV + 5%C, siendo el primero el más conservador obteniendo un CBR de 103%, la plasticidad se redujo a 4.28% y la expansión a 0.13%, el CHO y DMS son de 10.12% y 1.837 g/cm³ respectivamente. Los resultados logran cumplir con los requisitos establecidos por las especificaciones técnicas del reglamento peruano (EG-2013); concluye que el uso de ceniza volante como estabilizante de suelos no solo es viable técnicamente, sino también económicamente favorable en la proporción de mayor desempeño.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Suelo

Para la ingeniería, la interpretación conceptual de suelo puede definirse como un depósito no consolidado de partículas tipo minerales que crea un mecanismo compuesto por diversas fases tales como sólida, líquida y gaseosa, donde se edifican múltiples obras ingenieriles. El suelo representa unos de los materiales de construcción más antiguos y complejos, empleados por la ingeniería. Sus propiedades físico, químicas y también mecánicas, así como la compresibilidad, resistencia, permeabilidad, estabilidad de volumen y la durabilidad, son fundamentales en la ingeniería, dado que la mayoría de las infraestructuras civiles están apoyadas sobre la superficie terrestre (Rivera, Aguirre, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020). El suelo bajo el pavimento debe ser capaz de soportar cargas estructurales y vehiculares, incluye tanto esfuerzos compresivos como fuerzas laterales; la capacidad portante evita hundimientos y garantiza estabilidad (Bustamante, 2022).

2.2.2. Tipo de material

En consonancia al Manual de carreteras (2014), nos menciona que en base a su tamaño en una porción determinada es la determinación de cantidad de partículas.

Tabla 1

Categorización de los materiales según sus características

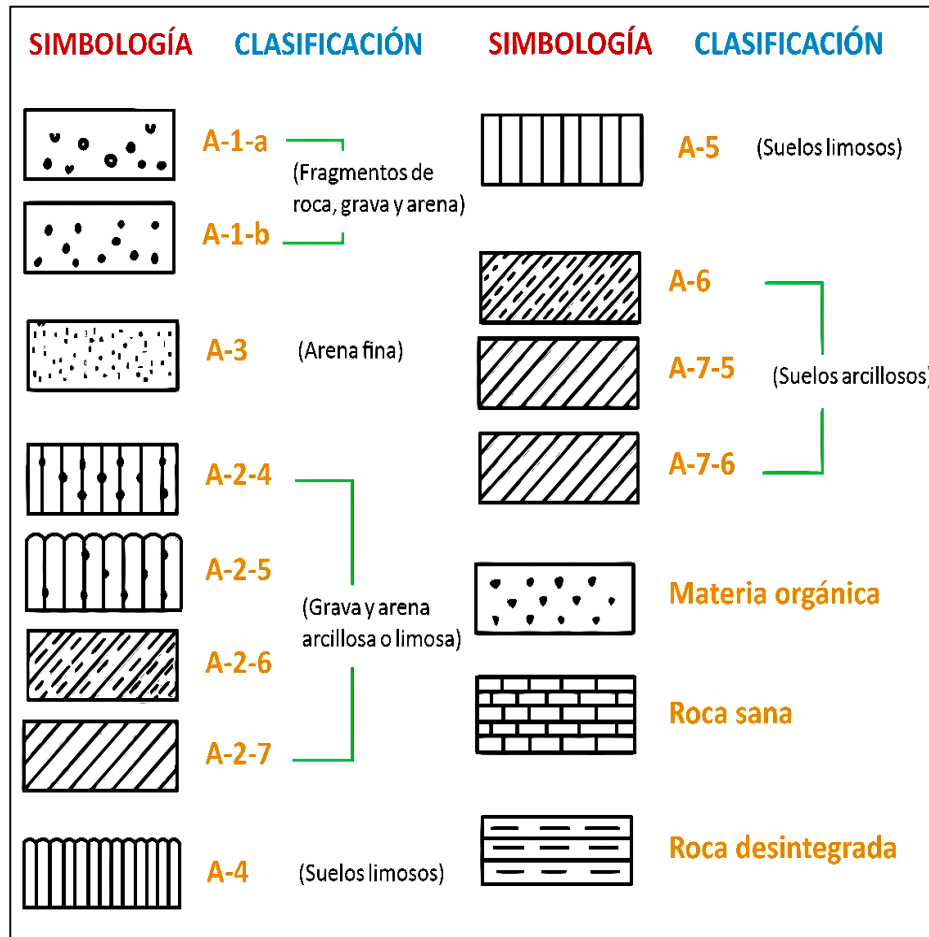
Tipología		Dimensión de las partículas
Material grava		Contempla de 75 mm a 4.75 mm
Material arena		Arena de contextura gruesa: 4.75 mm a 2.00 mm
		Arena de contextura media: 2.00 mm a 0.425 mm
		Arena de contextura fina: 0.245 mm a 0.075 mm
Materia Fina	Limo	Contempla 0.075 mm a 0.005 mm
	Arcilla	Inferior a 0.005 mm

Nota. Figura extraída de (MTC, Manual de carreteras suelos geología, geotécnia y pavimentos, 2014, pág. 33)

2.2.3. Clasificación de Suelos

Figura 1

Estructura de clasificación AASHTO



Nota. Figura extraída de (MTC, Manual de carreteras suelos geología, geotécnica y pavimentos, 2014, pág. 32)

Los suelos se pueden clasificar conforme a las normativas más relevantes y aceptadas en el campo ingenieril; Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como también la Asociación Americana de funcionarios de Carreteras Estatales (AASHTO). Según el Manual de Carretera, Sección de Suelos y Pavimentos (2014, pág. 35), la clasificación de suelos permite estimar su comportamiento, tras determinar las características de la granulometría, plasticidad e índice de grupo.

Consiste en el proceso técnico mediante el cual se agrupan y distinguen los distintos tipos de suelos en función de sus características físicas, mecánicas y granulométricas, con el objetivo de determinar su comportamiento y aptitud para su empleo en obras de ingeniería y construcción.

Figura 2

Estructura de clasificación SUCS

	Grava bien graduada, mezcla de grava con poco o nada de materia fina.		Materiales tipo fino sin plasticidad o con plasticidad bastante bajo.
	Grava mal granulada, mezcla de arena y grava con poco o nada de material fino.		Arena arcillosa, combinación de arena con arcilla.
	Grava limosa, combinación de grava, arena limosa.		Limo orgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa o limo arcilloso con ligera plasticidad.
	Grava arcillosa, mezcla de grava, arena y arcilla; grava con material fino de cantidad apreciable.		Limo orgánico de plasticidad baja o mediano, arcilla grava, arcilla arenosa, arena limosa, arcilla magra.
	Arena limpia poco o nada de material fino. Arena bien graduada, arena con grava, poco o nada de material fino.		Limo orgánico y arcilla limosa orgánica, baja plasticidad.
	Arena mal graduada con grava poco o nada de material fino.		Limo inorgánico, suelo fino gravoso o limoso, micacea o diatomeacea, limo elástico.
	Arcilla tipo inorgánica con alta plasticidad, arcilla con presencia de grava.		
	Arcilla tipo orgánica de plasticidad media y/o alta, limo orgánico.		
	Conocida como turba, suelo que generalmente se considera como orgánico.		

Nota. Figura extraída de MTC E 101 (2016, pág. 19)

El SUCS es un sistema que categoriza los suelos según su granulometría y plasticidad, permitiendo prever su comportamiento en obras de ingeniería.

Tabla 2

Asociación de tipo de suelos según AASHTO-SUCS

Clasificación Conforme AASHTO AASHTO M - 145	Clasificación Según SUCS ASTM D - 2487
Grupo A - 1 - a	GM, GP, GW, SM, SP, SW
Grupo A - 1 - b	GP, GM, SP, SM
Grupo A - 2	GC, GM, SC, SM
Grupo A - 3	Únicamente SP
Grupo A - 4	Solo ML y CL
Grupo A - 5	ML, MH, CH
Grupo A - 6	Solo CH y CL
Grupo A - 7	OH, CH, MH

Nota: Extraído del Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, p. 35)

2.2.4. Suelos Arcillosos

Esta tipología de suelo es reconocida por contener las partículas más finas respecto a todos los tipos de suelo. Su origen proviene de materias minerales y fragmentos diversos, con una gradación inferior a 0.002 mm, si bien en ciertas ocasiones también se estiman partículas de arcilla aquellas de hasta 0.005 mm. La clasificación de la arcilla se basa en su tamaño. Una de sus principales características es su comportamiento plástico al mezclarse con agua, siempre dentro de ciertos límites de humedad, Abd-Allah (2021). Las arcillas suelen caracterizarse debido a la baja resistencia respecto al corte, una alta susceptibilidad a la humedad y una alta compresibilidad, Ifediniru (2022).

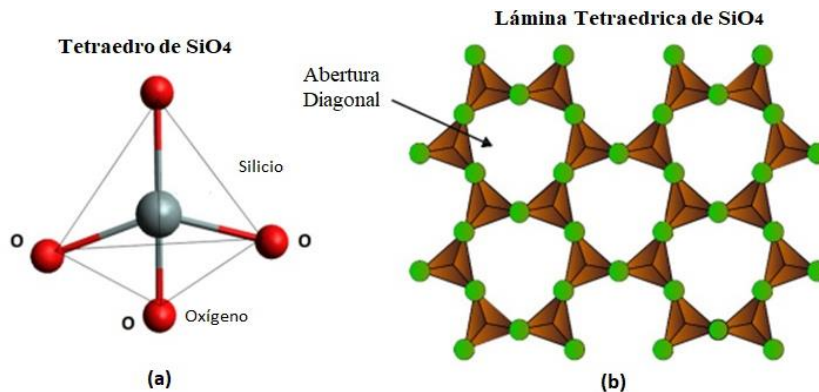
Las arcillas están compuestas por partículas de gradación fina originadas por la meteorización química de rocas, lo que les da una estructura laminar y una composición química específica. Su estado y comportamiento plástico depende

del contenido de humedad, y presentan muy baja permeabilidad debido a su estructura compacta, de acuerdo a Kufre (2021).

2.2.5. Estructura de las Arcillas

Figura 3

Estructura molecular de láminas silíceas



Nota. Figura extraída de (Sposito, 2008)

La estructura laminar de los minerales arcillosos con composición silícea se origina por la unión de átomos de silicio ubicados en la parte central de un tetraedro, átomos de oxígeno. Estos tetraedros forman entre sí, estructuras hexagonales. Cada tetraedro posee una forma piramidal con base triangular. Los minerales con base de silicio forman láminas debido a la unión entre cationes, oponiendo cargas y así, organizándose en estructuras hexagonales repetitivas (Torfi & otros, (2021)).

2.2.6. Subrasante

Las carreteras se conforman usualmente por diversas capas, como la base, subbase y la subrasante, dichos materiales son cuidadosamente seleccionados en función de sus propiedades físicas - mecánicas, Rahman (2021). La subrasante presenta, en comparación con las demás capas, los valores más bajos de CBR

(Relación de Soporte de California) y densidad seca máxima (DMS) y, asimismo, una plasticidad mayor, reflejada en su elevado índice de plasticidad (IP). Además, factores ambientales como un nivel freático elevado pueden afectar negativamente las condiciones de la subrasante, reduciendo su CBR, Amhadi & Assaf (2021).

Según el MTC (2014), para la selección y evaluación de materiales correspondiente a la construcción de la capa subrasante in situ, se debe considerar que el valor del CBR supere el 6%, caso contrario se clasifica al suelo como insuficiente - inadecuado. Será objeto de intervención mediante técnicas de estabilización, evaluando distintas técnicas aplicables como estabilización química, uso de geosintéticos y la elevación del nivel de la subrasante, con criterios de viabilidad económica; para que los materiales empleados sean funcionales como subrasante en pavimentos, es esencial que cumplan con los requisitos de durabilidad según Ahamefule (2014).

Tabla 3

Categorización de subrasante

CBR	Categorización de Subrasante
CBR inferior a 3%	S_0 : Corresponde a inadecuada
CBR \geq 3% hasta CBR $<$ 6%	S_1 : Corresponde a insuficiente
CBR \geq 6% hasta CBR $<$ 10%	S_2 : Corresponde a regular
CBR \geq 10% hasta CBR $<$ 20%	S_3 : Corresponde a buena
CBR \geq 20% hasta CBR $<$ 30%	S_4 : Corresponde a muy buena
CBR mayor o igual que 30%	S_5 : Corresponde a excelente

Nota. Adaptado según al Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, pág. 37)

De acuerdo a la norma Pavimentos Urbanos (2010), la humedad que se lleva durante la compactación a nivel de subrasante no deberá variar en \pm 2% del Contenido Optimo de Humedad con la finalidad de lograr las especificaciones y



el grado de compactación exigido al 95% de su DMS determinada con la prueba de Proctor Modificado. El espesor de compactación en subrasantes es mayor o igual a 25 mm para los diferentes tipos de pavimentos.

2.2.7. Propiedades físicas de la subrasante

2.2.7.1 Contenido de humedad

Braja (2013) define al contenido de agua y/o humedad (w), como el cociente del peso de cantidad de agua y el peso de los sólidos considerando en un entorno volumétrico dado de suelo. Citando al Manual de Carreteras (2014), concerniente al componente de suelos y pavimentos, la capacidad de resistencia del suelo a nivel de subrasante, esencialmente de los granos de contextura fina, es directamente relacionada con los factores de humedad y también con la densidad, que presenten los suelos en mención.

2.2.7.2 Granulometría

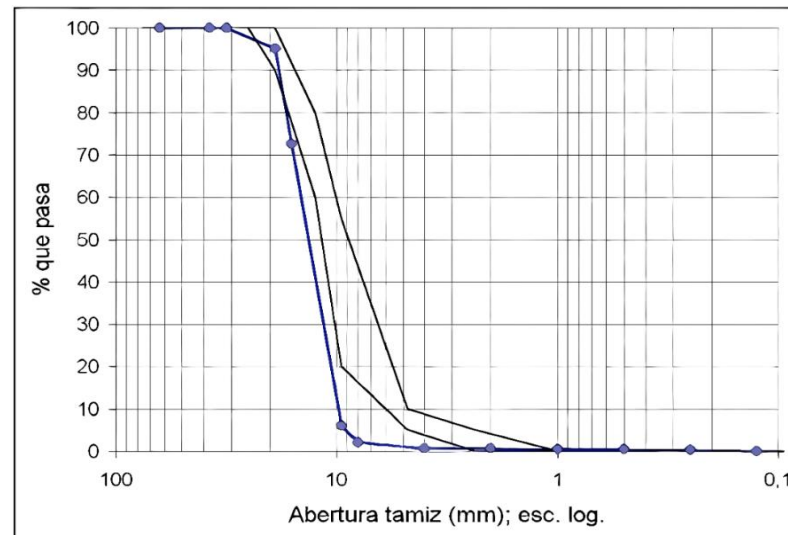
Es un método que se aplica para la elección de muestras de acuerdo al tamaño y/o dimensión de las partículas haciendo uso de mallas o se les conoce a estos instrumentos como tamices de distintos diámetros (Chacón, Ordoñez, & Varón, 2016). Tiene el objetivo de calcular la proporción y/o porcentaje de los elementos que la constituyen en función de la dimensión de sus partículas (Manual de Carreteras, 2014).

Su propósito es determinar la distribución granulométrica del material, usando una serie de tamices en orden descendente según el tamaño de sus aberturas, terminando en el tamiz N°200 equivalente a 0.074

mm donde se podrá valorar en la forma en que se gradúa el material (Saquina, 2019).

Figura 4

Curva granulométrica



Nota. Adaptado de Ortiz (2015, p. 352)

Clasificación según tamaño de partículas

Gravas

Son fragmentos que se formaron a partir de la desintegración natural de rocas y estas miden a partir de 2 mm de diámetro a más y debido a procesos de fracturamiento y transporte fluvial, se encuentran en las orillas de los ríos (Osorio, 2009).

Arenas

Las arenas son materiales que están conformadas por partículas con tamaños que oscilan entre 2 mm y 0.05 mm. Se originan debido a la fragmentación natural de rocas o también por procesos artificiales como la demolición y/o trituración, suelen encontrarse junto con gravas y, dentro

sus características es que cuando son limpias no presentan plasticidad ni retracción al secado, y el proceso de compactación es inmediata dado que su estructura es granular (Osorio, 2009).

Limos

Son los materiales donde se encuentran finos más que la contextura de arena que presentan plasticidad moderada, su diámetro oscila entre 0.05 y 0.005 mm, se sabe que se pueden encontrar dos tipos de limos que son orgánicos y también inorgánicos dependiendo de su origen, estas se encuentran comúnmente en canteras y lechos fluviales; presentan una de las limitaciones principales, siendo la baja resistencia antes a las cargas aplicadas y/o empleadas (Briones, 2015).

Arcillas

Son los materiales de granos más fina que existe, además debido al contacto con el agua se convierten plásticas y su tamaño son inferiores a 0.005 mm, la composición química corresponde a hidratados de silicatos de magnesio y también de hierro perteneciente a silicatos alúminicos. Esta estructuradas de cristalinas y pueden ser formadas laminares por sus átomos (García, Florez, & Medina, 2016).

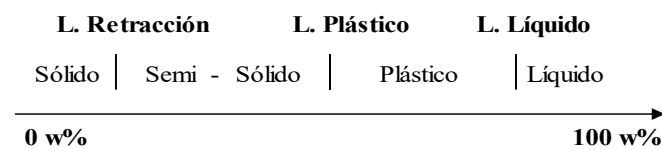
2.2.7.3 Límites de consistencia

Se conceptualiza para los suelos finos que se presentan y estos actúan por la influencia del agua cambiando de estados en sólidos, semisólidos, plásticos y líquidos y/o viscosos. Por decir, la arcilla e incorporando agua alcanza una consistencia la de una pasta y se sigue

incorporando más agua alcanza una consistencia más fluida, y cuando se seca se vuelve suelto (Ocon J. , 2013). Es la capacidad que posee un suelo hasta llegar a cierto límite de humedad sin disgregarse, según (MTC, Manual de carreteras suelos, geología, geotécnia y pavimentos, 2014).

Figura 5

Cambios en los Límites de Atterberg



Nota: Adaptado de Ocón (2013, p. 2)

Limite liquido

Figura 6

Cuchara de Casa Grande



Nota: Extraído de (Joe & Rajesh, 2015, p. 801)

Se refiere al contenido de agua presente en los suelos, y que estas siempre se encuentran en el punto de ser líquido - plástico, para determinar el límite líquido y/o plástico se utiliza un instrumento llamado casa grande, donde el suelo se coloca en una capsula pequeña, luego haciendo forma de una ranura, esta debe cerrarse a medida que se den golpes en la superficie del instrumento, por ende el suelo debe llegar a su límite liquido debido al

contenido de agua y esto hará que los bordes internos se unan tras dar los 25 golpes (Chavarry, Figueroa, & Reynaga , 2020).

Limite plástico

Estas se encuentran entre estado plástico y semisólido y por la humedad el suelo actúa siendo al límite de plasticidad o que no se comporta en estado plástico, y para determinar se realizan ensayos realizando el suelo en tipos cilíndricas haciendo rodar con la palma de la mano por una superficie tipo plana y si esta se agrieta esa será su límite plástico (Ocon I. , 2013).

Figura 7

Equipo para el ensayo LP



Nota: Extraído de (Joe & Rajesh, 2015, p. 801)

Índice de plasticidad

Posee parámetros que restringen la humedad, cuando el suelo obtiene su consistencia plástica y el índice de líquido alcanza al LL correspondiente al suelo natural, y estas muestran la originalidad y útil que es la característica del suelo (Junco & Tejeda, 2013).

Con el fin de hallar el IP es fundamental calcular el LP y también LL, a través de siguiente expresión:

$$IP = L_L - L_p$$

I_p = Se refiere al índice de plasticidad

L_L = Indica el límite líquido

L_p = Indica el límite plástico

Tabla 4

Clasificación de suelos conforme al IP.

IP	Plasticidad	Características
IP superior que 20	Categoría alta	altamente arcillosos
$IP > 7$, $IP \leq 20$	Categoría media	Arcillosos
IP inferior que 7	Categoría baja	Poco arcillosos
IP igual 0	No plástico (NP)	Extensos de arcilla

Nota: Extraído del Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, p. 34)

2.2.7.4 Índice de grupo

El Manual de Carreteras (2014) en la parte de suelos y pavimentos, señala al IG como índice normado por AASTHO comúnmente usado para clasificar los suelos, fundamentado en los límites de Atterberg. Por lo cual es definida a través de la siguiente expresión:

$$IG = 0.2 \times (a) + 0.005 \times (ac) + 0.01 \times (bd)$$

Donde:

a: F-35 (F = porción pasante al tamiz N°200) oscila de 1 a 40

b: F-15 (F = porción pasante al tamiz N°200) oscila de 1 a 40

c: LL-40 (LL igual a Límite líquido) comprende de 0 a 20

d: IP-10 (IC = Índice de plasticidad) comprende de 0 a 20, o más.

El Manual de Carreteras (2014), resalta que el IG es una cantidad positiva y entera, contemplado de 0 a 20 o más, en caso de un valor

negativo se define como cero. Teniendo presente ello, se describe la siguiente tabla señalando el IG.

Tabla 5

Clasificación de subrasante conforme al IG

Índice de grupo	Suelo de Subrasante
IG es superior a 9	Como inadecuado
IG comprende de 4 a 9	Como insuficiente
IG contempla de 2 a 4	Como regular
IG comprende de 1 a 2	Como bueno
IG oscila entre 0 a 1	Como muy bueno

Nota: Extraído del Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, p. 35)

2.2.7.5 Clasificación de suelos AASHTO

Figura 8

Clasificación de suelos basado en ASTM D 3282 - ASSHTO M 145

Clasificación	Materiales granulares (35% o inferior pasante tamiz N° 200)							Materiales limoso-arcilloso (más de 35% pasa a malla N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7: A-7-5, A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
% que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máximo				- - 36 mínimo			
Características de fracción pasante por tamiz N° 40 Límite líquido Índice plástico	-		-	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Material Constituyente	Fragmentos de roca, grava, arena		Arenas fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Estimacion como Subrasante	Excelente a bueno							Regular a insuficiente			

(1): Identificado como no plástico

(2): El IP perteneciente al subgrupo A-7-5 resulta igual o inferior al LL menos 30

El IP perteneciente al subgrupo A-7-6 resulta superior que LL menos 30

Nota: Extraído del Manual de Carreteras suelos geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos (2014, p. 36)

Tales clasificaciones se logran tomando en cuenta, el IP como la granulometría de un material seleccionado para su respectiva



caracterización, y para ello se establecieron parámetros y están agrupados en siete comenzando desde A-1 al A-7; la granulometría influye de manera determinante al ser evaluada en función de las fracciones que atraviesan los tamices N°10, N°40 y N°200, ya que estos parámetros condicionan las propiedades del material analizado, para la determinación de los límites de Atterberg se realiza sobre las fracciones del material que atraviesan el tamiz N°40, con el propósito de caracterizar su comportamiento plástico. En cuanto al material pasante del N°200 se definen en 2 grupos que será el patrón, referente a los suelos granulares; estas no deben superar el 35% de la muestra pasante la malla N°200, y la muestra que supera el 35% que pasa el tamiz N°200 se considera suelos limosos y arcillosos (Chacon, Ordoñez, & Varon , 2016).

2.2.7.6 Clasificación de suelos SUCS

Es definida como uno de los sistemas unificados que se emplea para la clasificación de suelos que esta fue propuesta en el año 1942 por el Casagrande y fue adoptada por Bureau of Reclamation cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, y este sistema se utiliza en los trabajos geotécnicos (Caro, 2018).

De acuerdo a Braja (2013), para clasificar suelos apropiadamente con este sistema, debe tenerse en conocimiento de lo siguiente:

- Cantidad porcentual de limo y como también arcilla, es decir, la fracción de material fino pasante a tamiz N° 200 (con sección de 0.075 mm).

- Cantidad de arena en porcentaje, en concreto, la fracción pasante al tamiz N° 4 (sección de 4.75 mm) y retenido en el tamiz N° 200 (0.075 mm)
- Cantidad porcentual de grava, dicho de otro modo, la fracción pasante al tamiz con abertura de 76.2 mm y retenido en tamiz N°4 (de 4.75 mm).
- Valores de LL e IP de la parte fraccionaria del suelo a analizar pasante al tamiz N° 40.
- Valores de coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_z).

Tabla 6

SUCS; simbología para grava

Simbología	Criterios a tomar en cuenta
GW	Inferior a 5% pasante malla N° 200; el C_u (D_{60}/D_{10}) resulta igual o mayor que 4; el $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ oscila de 1 a 3.
GP	Menor al 5% pasante malla N° 200; para GW no funciona ambos criterios.
GM	Mayor al 12% pasante malla N° 200; por debajo de la línea <i>A</i> , se debe graficar límites de Atterberg (figura 9); IP es inferior a 4.
GC	Superior a 12% pasante malla N° 200; se grafican debajo de la línea <i>A</i> , los límites de Atterberg (figura 9); IP es mayor a 7.
GC-GM	Mayor a 12% pasante malla N° 200; caen en el área sombreada marcada CL-ML, los límites de Atterberg (figura 9).
GW-GM	Cantidad porcentual pasante malla N° 200 contempla de 5 a 12; para GW y GM se satisface las condiciones.
GW-GC	Cantidad porcentual pasante malla N° 200 contempla de 5 a 12; GW y GC se satisface las condiciones.
GP-GM	Cantidad porcentual pasante malla N° 200 oscila de 5 a 12; para GP y GM se satisface las condiciones.
GP-GC	Cantidad porcentual pasante malla N° 200 oscila de 5 a 12; para GP-GC.

Nota: Adaptado de (Braja, 2013)

De acuerdo a Braja (2013), el Sistema Unificado de Clasificación se describe en tablas 6, 7, 8; manifiesta que los suelos se dan en 2 grandes categorías:

- Los suelos de contextura gruesa, tal es el caso de los materiales tipo gravas y arenas, se caracterizan por tener menos del 50 % de su masa traspasando por la malla N° 200. En esta clasificación, la simbología del grupo inicia con las letras G (para gravas o suelos gravosos) o S (para arenas o suelos arenosos).
- En cambio, los suelos con gradación fina contienen el 50 % o superior de su masa atravesando la malla N° 200. Sus símbolos de grupo inician con las letras C (arcilla inorgánica), M (limo inorgánico) u O (limo y arcilla orgánicos). Para suelos notablemente orgánicos tal es el caso de turbas y lodos, se emplea el símbolo Pt.

Tabla 7

SUCS; simbología para arenas

Símbolo de grupo	Criterios a tomar en cuenta
SW	El pasante en tamiz N° 200 es inferior al 5%; el $C_u (D_{60}/D_{10})$ resulta igual o mayor que 6; el $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ contempla de 1 a 3.
SP	El pasante en tamiz N° 200 es menor al 5%; para SW no se cumple.
SM	El pasante en tamiz N° 200 es mayor al 12%; se grafican debajo de la línea A, los límites de Atterberg (figura 9); el IP es inferior a 4.
SC	El pasante en tamiz N° 200 es mayor al 12%; se grafican arriba de la línea A, los límites de Atterberg (figura 9); el IP es superior a 7.
SC-SM	El pasante en tamiz N° 200 es mayor al 12%; en el área sombreada marcada CL-ML, caen los límites de Atterberg (figura 9).
SW-SM	Cantidad porcentual pasante tamiz N° 200 contempla de 5 a 12; para SW y SM satisface los criterios.
SW-SC	Cantidad porcentual pasante tamiz N° 200 oscila de 5 a 12; para SW y SC satisface los criterios.
SP-SM	Cantidad porcentual pasante tamiz N° 200 está dentro de 5 y 12; las condiciones para SP – SM se cumple.
SP-SC	Cantidad porcentual pasante tamiz N° 200 está dentro de 5 y 12; las condiciones para SP y SC se cumple.

Nota: Adaptado de (Braja, 2013)

Tabla 8

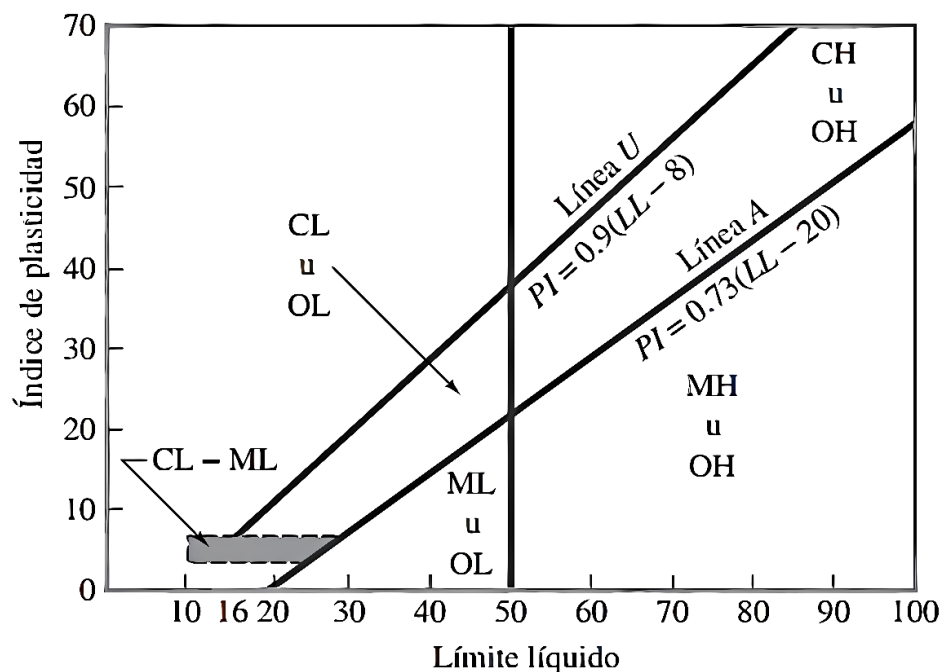
SUCS; simbología para limos y arcillas

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Origen inorgánico; LL menor a 50%; PI mayor a 7%; se debe graficar encima de la recta A (visualícese la región CL en la carta, figura 9)
ML	Origen inorgánico; LL menor a 50%; PI menor a 4%; o es graficado por debajo de la recta A (visualícese la región ML en la carta)
OL	Origen orgánico; $(LL - \text{secado al horno}) / (LL - \text{no secado})$; menor a 0.75; LL inferior a 50% (visualícese región OL en carta de plasticidad)
CH	Origen inorgánico; LL es superior o igual que 50%; PI se debe graficar arriba de la recta A (visualícese la región CH en la carta)
MH	Origen inorgánico; LL es mayor o igual que 50%; PI se debe graficar por debajo de la recta A (mire la región MH en la carta de plasticidad)
OH	Origen orgánico; $(LL - \text{secado al horno}) / (LL - \text{no secado})$; es inferior a 0.75; LL mayor o igual que 50% (visualícese región OH en la carta de plasticidad)
CL-ML	Origen inorgánico; se debe graficar en la región resaltada en la carta.
Pt	Denominada como turba, también lodos, otros notablemente orgánicos

Nota: Adaptado de (Braja, 2013)

Figura 9

Carta de plasticidad



Nota: Adaptado de (Braja, 2013)



Adicionalmente, se usan otras simbologías: W identificado como bien graduado, P que responde a mal graduado; L indica plasticidad de categoría baja (LL menor a 50%), y H señala plasticidad de categoría alta (LL superior a 50%).

2.2.8. Propiedades mecánicas de la subrasante

2.2.8.1 Proctor modificado

En base a la normativa ASTM – 1557 el procedimiento para proctor tipo modificado tiene un peso superior, en vista a que el pisón a usar es de 10 lb, mientras del ensayo Proctor tipo estándar es 5.5 lb; el cual se ensaya en un molde cilindro para hallar el contenido de humedad y su densidad. A tenor del ensayo de granulometría se elige la metodología a usar para realizarlo (Chirinos, 2016).

Humedad Optima

Tiene como finalidad de obtener el valor porcentual de humedad obtenida de la relación de pesos del agua y el sólido la cual se demuestra con la siguiente expresión (Revolorio , 2013).

$$w = W_w/W_s$$

Donde:

W: Cuantificación de humedad en porcentaje

W_w : Carga del agua

W_s : Carga de solidos

Peso especifico

Respecto al peso específico “Y” es el peso del suelo por unidad de volumen (Revolorio , 2013).

Figura 10

Equipo para densificación en Proctor Modificado



Nota: Recolectado de (Cordero-Vázquez, 2016, p. 188)

$$y = W/V$$

Donde:

y: Se refiere al peso específico

W: Carga del suelo

V: Unidad de volumen

2.2.8.2 California Bearing Ratio (CBR)

Parámetro ampliamente empleado en regiones (países) tropicales con el fin de dimensionar el pavimento tipo flexible. Para establecer el espesor de pavimento es fundamental hallar la capacidad de carga del suelo en relación a la subrasante. La sobredimensión del pavimento es por el valor de un CBR bajo o puede ser viceversa. Para hallar el valor de resistencia del suelo (CBR) se debe seguir los pasos de compactación de una muestra representativa del suelo con el CHO y DMS, también establecer la aplicación de energía para compactar el material del suelo.

De acuerdo a ello el CBR (en la prensa) se obtiene después del embebido por cuatro días (Katte, Souleyman, & Ludovic, 2019).

El CBR (California Bearing Ratio) es una prueba completa y común que es practicada actualmente para realizar diseños de los pavimentos con el cual se examina la medida de rigidez (módulo) y la resistencia al corte de la muestra de para subrasante con el cual se determina el espesor de cada estrato del pavimento suprayacente. Para construir carreteras, el número representativo del CBR es siempre complicado de encontrar por los ingenieros de ámbito civil. El CBR no solo tiene variación de acuerdo a la propiedad del suelo sino también depende de un parámetro muy importante que es el tipo del suelo. El CBR constituye un método normalizado de evaluación indirecta de la capacidad de resistencia de la muestra de la base, sub base y la subrasante con la de rocas trituradas estándar que se expresa por valores en porcentaje (Paudel, Prasad, & Bahadur, 2019).

Figura 11

Sistema automático para CBR



Nota: Recolectado de Yideti, Bitrgisson y Jelagin (2014, p. 103)



2.2.9. Estabilización de Suelos

Estabilizar, constituye una intervención geotécnica, con fin de acrecentar el esfuerzo a deformación, disminuir la humedad, mitigar la degradación por procesos de erosión, cambios en morfología; con el objeto de aprovechar zonas con subrasantes de categoría inadecuada, Careya & Howard (2022).

Según el Manual de Carreteras, Sección de Suelos y Pavimentos (2014), la estabilización consiste en proporcionar resistencia mecánica y durabilidad a las propiedades del suelo. Las técnicas de estabilización son diversas, y van desde el aditamento de otro suelo, a las añadiduras de uno o más agentes estabilizantes. Las estabilizaciones, generalmente se desempeñan en los suelos de subrasante insuficiente o inadecuado, donde la más conocidas son estabilización de suelo con cemento, suelo con cal, suelo con asfalto.

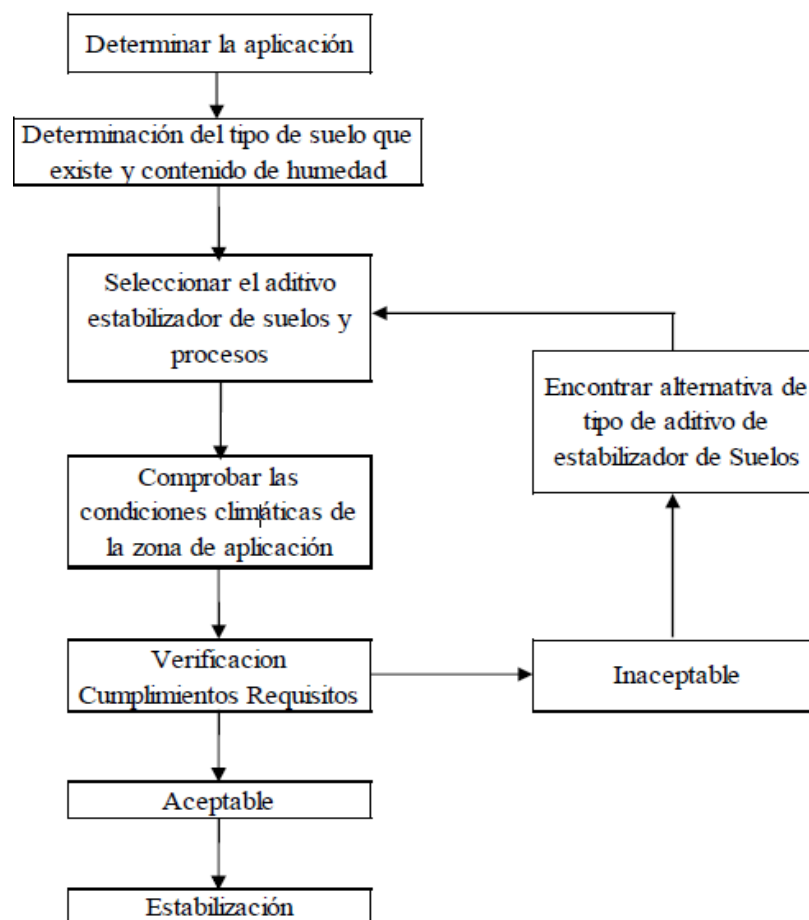
El Manual de Carreteras (2014) menciona algunos criterios geotécnicos de suma importancia para el ámbito de estabilización de suelos.

- Se consideran como apto a los materiales incidentes para estrato de subrasante a los suelos con un $CBR \geq 6\%$. En caso de ser inferior se considera como subrasante Insuficiente o sub rasante inadecuada, o se encuentren áreas blandas o zonas húmedas, es causal de un estudio especial para el reemplazo, combinación, mejoramiento y estabilización de suelos.
- Cuando el horizonte de subrasante sea de material limosa o arcillosa y, tras el humedecimiento, las partículas de estos suelos pueden contaminar y penetrar a las capas base granulares y/o superiores, por lo cual debe proyectarse una capa anticontaminante con un espesor de 10 cm.

- La superficie de la subrasante debe quedar por encima de la presencia del nivel freático; mínimamente a 0.60 m referente a una subrasante muy buena y extraordinaria; a 0.80 m referente a una subrasante regular y buena; a 1.00 m referente a una subrasante Insuficiente y, a 1.20 m cuando se refiera a una subrasante inadecuada.

Figura 12

Proceso de selección para estabilización



Nota. Adaptado del Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, pág. 91)

- En lugares por encima de los 4000 msnm, en los suelos se debe evaluar el comportamiento y la acción de las heladas. Generalmente, el congelamiento está relacionado con la cota del nivel freático y también la susceptibilidad del material de suelo al congelamiento. En caso que el



fondo del nivel freático sea superior a lo especificado previamente (1.20 m), la actividad del congelamiento no logrará llegar a la parte superior de subrasante. Por lo general, son suelos vulnerables o no susceptibles los que presentan menor al 3% de peso de un material con tamaño menor a 0.02 mm.

- Para seleccionar el tipo y método de estabilización de suelos es importante y necesario conocer el tipo de suelo natural y existente. Los suelos que destacadamente se predominan en este rubro son: las arcillas, los limos o las arenas arcillosas y limosas.
- Los factores, que se consideran al seleccionar como elegir el tipo y método de mayor conveniencia y adaptable de estabilización son: tipología de suelo natural a ser estabilizado, uso propuesto del suelo natural estabilizado, tipología del aditivo o agente estabilizador de suelos, la experiencia y destreza en el tipo de estabilización a aplicarse, disposición del tipo de agente o aditivo estabilizador, disposición del equipo apropiado y, viabilidad de costos.

2.2.10. Tipos de Estabilización de Suelos

Para el mejoramiento de las propiedades de un suelo encontrando, existen diversas metodologías mediante procedimientos mecánicos y a través de adición de productos sintéticos y químicos, a continuación, se menciona:

2.2.10.1 Estabilización Mecánica.

Consiste en la aplicación de esfuerzos, ya sea de forma estática o dinámica, con el propósito de incrementar su densidad, reducir porosidad, acrecentar su resistencia mecánica y también la permeabilidad. Para



obtener la especificación apropiada, se puede incluir anticipadamente la mezcla de suelos de diversa gradación. Los objetivos ingenieriles de dicho procedimiento son principalmente aumentar su capacidad portante, disminuir el asentamiento de las estructuras, controlar cambios volumétricos indeseables, reducir la permeabilidad al agua, y aumentar la estabilidad de los taludes (Braja, 2013). La compactación esta influenciada por la energía de compactación, gradación y tipo de suelo, y el grado de compactado es según el CHO y peso unitario en condición seca. El grado se determina en términos del DMS.

2.2.10.2 Estabilización con geosintéticos

Implica modificar ciertas propiedades con el fin de dotar nueva caracterización estructural. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran los; geotextiles, elaborados generalmente con fibras sintéticas como poliéster o polipropileno; las geomallas, estructuras tridimensionales que pueden ser mono o bi-orientadas, fabricadas en polietileno de alta densidad; las geomembranas, láminas impermeables fabricados de materiales poliméricos como PVC o polietileno (de alta o baja densidad); los geocompuesto, diseñados específicamente para estabilizar suelos cuando se necesita refuerzo y/o separación entre base granular y un subsuelo de textura fina, combinando un geotextil no tejido con una geomalla para mejorar la interacción con el suelo; y las geoceldas, siendo estructuras tridimensionales en forma de paneles hechas de polietileno o también de polipropileno, diseñadas para el confinamiento eficaz de cargas (Lin & otros, (2011))

2.2.10.3 Estabilización química

El Manual de carreteras (2014), manifiesta dos referencias fundamentales (guías) para la apropiada elección del tipo de agente estabilizante, que debe satisfacer las observaciones, condiciones y restricciones por cada tipología de muestra de suelo natural.

Figura 13

Guía de referencia para la elección de estabilizante

Área	Clase	Estabilizante Recomendado	Restricciones en LL e IP	Restricción en el porcentaje pasante malla 200	Observación
1 C	SM o SC o SM-SC	(1) Asfalto	IP sin exceder de 10	Sin exceder el 30% en pesaje	
		(2) Cemento tipo Portland	(b)		
		(3) Cal	IP no inferior a 12		
		(4) Cemento-cal Cenizas volantes	IP no inferior a 25		
3	CH o CL o MH o ML u OH o OL o ML-CL	(1) Cemento tipo Portland	LL no inferior a 40 IP no inferior a 20		Suelos orgánicos y/o fuertemente ácidos contenidos en esta parte no son susceptibles a la estabilización mediante métodos convencionales
		(2) Cal	IP no inferior a 12		
IP es igual al índice Plástico (b) IP: $20 \text{ mas } (50 - \% \text{ pasante tamiz N}^\circ 200) / 4$			Sin observación o restricción No hay necesidad estabilizante		Fuente: US Army Corps of Engineers

Nota. Tomado del Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, pág. 92)

La estabilización química es aplicable a todo tipo de suelos y busca la mejora de sus propiedades geotécnicas mediante la alteración de sus características fisicoquímicas originales; su propósito es mitigar problemas como la inestabilidad volumétrica y, al mismo tiempo, cualidades como la resistencia y la durabilidad del suelo tratado (Sharifah, Kamarudin, Mustafa Al Bakri, Binhussain, & Siti Salwa, 2013). Este método de estabilización implica el uso de sustancias químicas, tal es el caso del cemento y la cal, siendo los aditivos convencionales y más

tradicionalmente empleados en el mejoramiento de suelos; No obstante, también se utilizan otros materiales de acuerdo a la viabilidad como sales (por ejemplo, cloruro de sodio y también cloruro de calcio), así como subproductos o residuos industriales, entre ellos la escoria de alto horno y las cenizas volantes, donde se presenta la sustitución de iones metálicos que se involucran en el proceso para obtener una mejora en las propiedades en el caso de su comportamiento y la manejabilidad del suelo siendo considerados para la construcción de vías (Alfonso, 2010).

Figura 14

Guía adicional de referencia para elección de estabilizante

Estabilizante Recomendado	Normativa Técnica	Suelos ⁽¹⁾	Dosificación ⁽³⁾	Curado (Tránsito) ⁽⁵⁾	Observación
Cemento	AASHTO M85 ASTM C150 EG-CBT-2008 Sección 3068	A-1,2,3,4,5,6,7 LL mayor a 40%; IP ≥ 18% CMO ⁽²⁾ menor al 1.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) menor a 0.2% Abrasión menor a 50% Durabilidad SO ₄ Ca ⁽⁴⁾ - AF menor o igual al 10%	Oscila 2 - 12%	Tras 7 días	Diseño de mezclas según las recomendaciones de Portland Cement Association (PCA)
Emulsión	AASHTO M208 o ASTM D2397	A-1, A-2 y A3 Pasante malla N° 200 ≤ 10% IP menor o igual al 8% Equivalente Arena ≥ 40% CMO ⁽²⁾ menor al 1.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.6% Abrasión menor a 50%	Oscila 4 - 8%	Un mínimo 24 horas	Cantidad de aplicación, definida según a resultados de la prueba Marshall modificado (Illinois)
Cal	AASHTO M216 ASTM C977 EG-CBT-2008 Sección 3078	A-2-6, A-2-7, A-6 y A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMO ⁽²⁾ menor al 3.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) menor a 0.2% Abrasión menor a 50%	Oscila 2 - 8%	Un mínimo 72 horas	IP mayor a 50%, se podrá aplicar cal en 02 etapas (Diseño de mezcla según la Norma ASTM D 6276)

- 1) Espesor de tratado por capas o estratos de 6 a 8"
El tamaño máximo: 2", sin presencia de residuos vegetales
Los suelos en estado natural, materiales de préstamo o combinación de ambos con fines de estabilización, estarán definido y descritos en el Expediente Técnico.
- 2) CMO: Contenido y/o presencia de materia orgánica
- 3) Las dosificaciones deben señalar: fórmula de trabajo, tipología de suelo, cantidad de estabilizante, agua en volumen, valor de resistencia a compresión simple o valor de CBR o resultados de Marshall modificado (Illinois).
- 4) Para altitudes superiores a 3000 msnm
- 5) Tras finaliza el proceso de compactado.

Nota. Extraído del Manual de Carreteras: Sección suelos y pavimentos (2014, pág. 93)



2.2.10.4 Estabilización con cal

La estabilización de suelos con cal ha sido utilizada en otros países con gran éxito, logrando aumentar la vida útil de rutas no pavimentadas, disminuyendo la frecuencia en el mantenimiento que al mediano y largo plazo resultan ser soluciones competitivamente económicas, ofreciendo mejores superficies de ruedo y que indiscutiblemente presentan un mejor desempeño ante condiciones de lluvia y humedad extrema (Elizondo, Navas, & Sibaja, 2010). La adición de cal o cemento en suelos arcillosos, en mayor y menor grado, provoca un aumento en su límite líquido como también un aumento en su límite plástico para poder obtener una disminución en su índice plástico; de manera que aumenta la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos como también la resistencia a la compresión simple y el CBR (Rezabala & Ortiz, 2023).

Como señala el Manual de Carreteras (2014), La cal que se usa es el óxido cálcico (cal viva o cal anhidra), adquirido por la calcinación de hidróxido cálcico o materiales calizos (cal apagada o cal hidratada). También se llaman aéreas.

A través de la experiencia se demuestra que el resultado de la hidratación de cemento puede ser generados mezclando dos o más constituyentes primarios de este resultado, así como: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 en las proporciones apropiadas y con la presencia del agua. Como generalmente los suelos se estructuran de sílice y aluminio silicatos, la adición de cal viva (CaO) o de cal apagada (Ca(OH)_2) y agua apropiadamente se puede conseguir la composición deseada (MTC,2014).



De acuerdo al Manual de carreteras – EG (2015), el material a estabilizar con la cal puede ser de tipo afirmado o procedente, producto de la escarificación de la capa o parte superficial que ya existe o ser un suelo en estado natural derivado de movimiento de tierras, a nivel de excavaciones, agregados locales y mezcla de estos. El material a ser empleado, debe estar sin presencia de materia con origen orgánico o cualquier sustancia perjudicial.

2.2.11. Residuos de Albañilería

Se refiere a los residuos generados durante los trabajos de construcción, restauración, rehabilitación, demolición o remodelación de edificaciones e infraestructuras. Estos desechos, comúnmente conocidos como escombros, pueden producirse en diversas etapas del proceso constructivo y de diferentes formas, dado que surgen a lo largo de todas las fases que componen la ejecución de una obra (Silva & Delvasto, 2021). Los residuos de construcción y demolición presentan una composición variada de componentes, que en su gran mayoría está constituido por concreto (alrededor del 40 %) y cerámicos (alrededor del 30 %). (Chávez, Kanno, Rojas, & Vargas, 2019).

Según Quispe (2020) se describe a las unidades de ladrillos, como materiales de construcción, presentándose en una forma de paralelepípedo rectangular, siendo la combinación y/o mezcla de silicatos hidratados de alúmina, illita, caolín y entre otros minerales. Los residuos de albañilería se refieren a aquellos desechos de ladrillos, tejas, bloquetas, cerámicos y entre otros; producto de las demoliciones de módulos estructurales y desperdicios durante la fabricación y almacenamiento en planta.



Los desechos de ladrillos (material residual) comprenden los subproductos sólidos generados durante las distintas etapas del proceso de fabricación, manipulación, almacenamiento, transporte o demolición de elementos de mampostería utilizados en la construcción, principalmente ladrillos. Estos fragmentos, polvo o partículas, al ser triturados o molidos, adquieren características granulométricas y atributos químicos que permiten su aprovechamiento como material de aporte en la estabilización de suelos, mejoramiento de subrasantes, rellenos estructurales o como insumo alternativo en la industria de la construcción, contribuyendo a la sostenibilidad y a la reducción de impactos ambientales asociados a los desechos de obra.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación

El estudio se realiza específicamente en la Avenida Los Virreyes de la ciudad de Juliaca en la región de Puno – Perú, ubicada a 3825 m.s.n.m, lo que lo convierte en una ciudad de altura; por ello se consigna lo siguiente:

Ubicación política

País : Perú
Región : Puno
Provincia : San Román
Distrito : Juliaca

Ubicación geográfica

Tabla 9

Ubicación geográfica de la Av. Virreyes

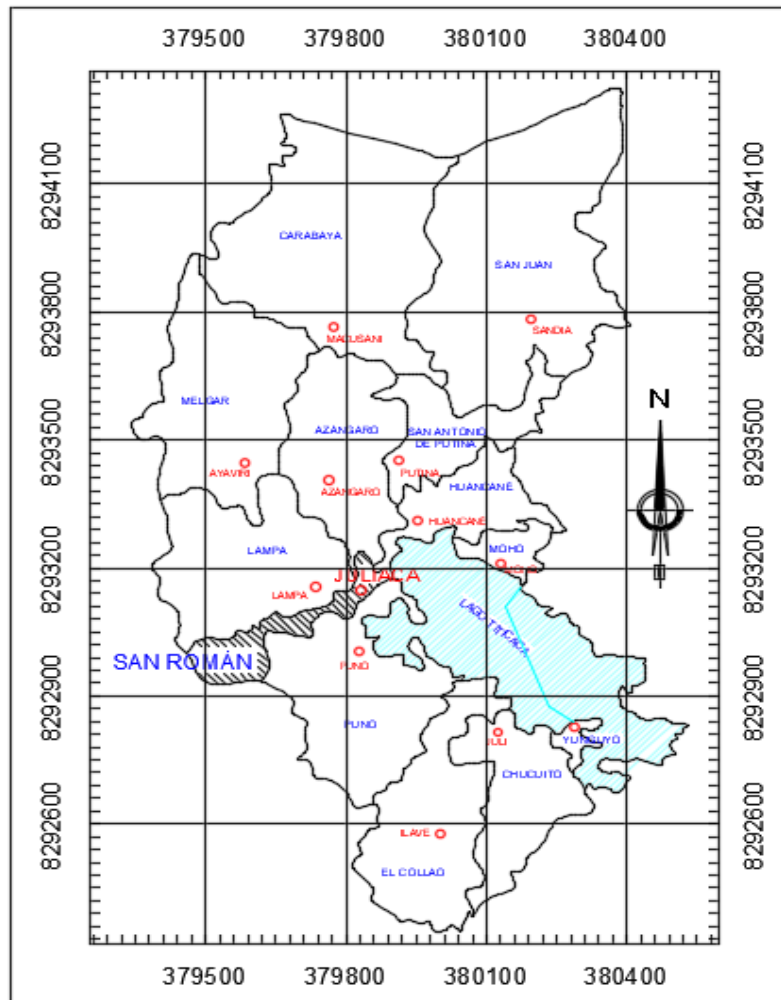
PROGRESIVA	COORDENADAS	
	NORTE	ESTE
0 + 000 km	8289454.00 m S	377185.00 m E
0 + 715.50 km	8289538.00 m S	377896.00 m E

Nota. Elaboración propia

En seguida, se evidencia el número de exploraciones realizadas, etiquetado con siglas adecuadas y la ubicación correspondiente en valores UTM.

Figura 16

Ubicación política a nivel provincial del sector de análisis



Nota. Adaptado de Civil 3D (Elaboración propia)

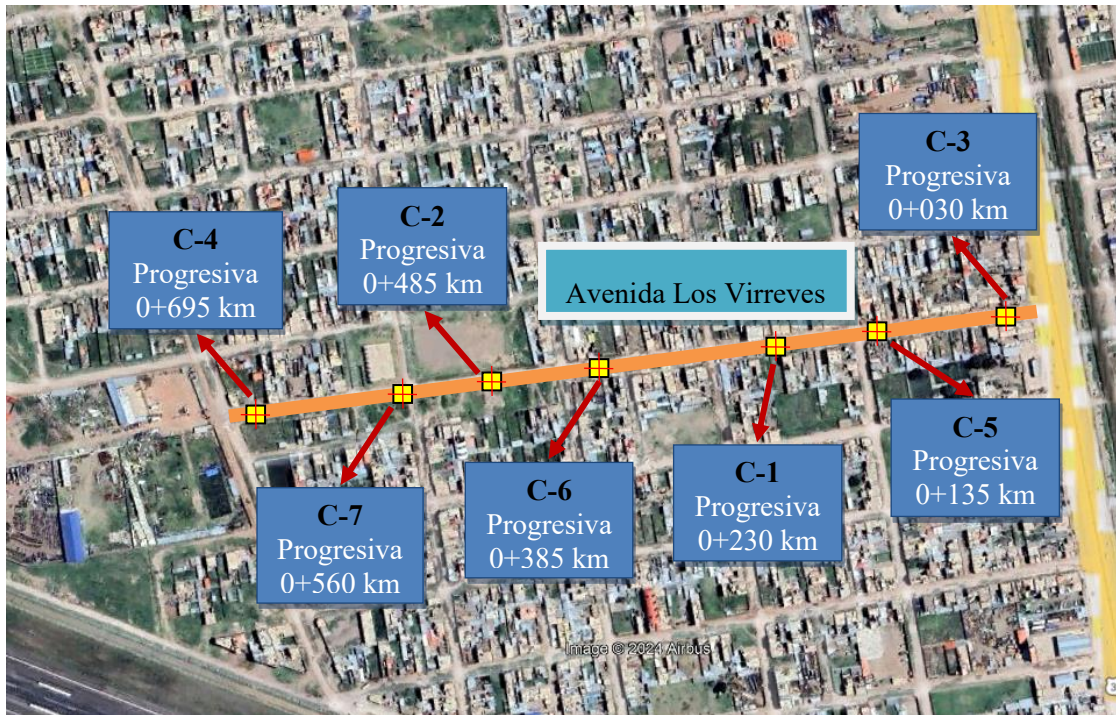
En figura 17 se evidencia la ubicación exacta de la Av. Virreyes - Juliaca para el desarrollo del presente trabajo de investigación, detallando el inicio y el final de la vía y la localización de las calicatas a nivel progresivas.

La extracción de la muestra de suelo (material base a nivel de subrasante) y material estabilizante se realizó en el mes de agosto del año 2023, mediante exploraciones directas (calicatas) y/o in situ respectivamente, con el fin de analizar el estudio de mecánica de suelos en laboratorio. Por otro lado, se ha complementado con más exploraciones directas con fines de estudiar y verificar

la tipología de suelos a mayor detalle, que se encuentran en el área de influencia de la avenida Los Virreyes, Juliaca.

Figura 17

Localización de la Av. Virreyes – Juliaca



Nota. Adaptado de Google Earth (Elaboración propia)

3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Nivel de Investigación

El nivel de investigación explicativa, encargada de indagar el porqué de los hechos, estableciendo relación entre causa y efecto. En tal contexto, el estudio explicativo puede ocuparse tanto de determinar aquellas causas de investigaciones post tacto como de los efectos (investigación experimental) realizando la prueba de hipótesis. El resultado y su conclusión constituye el nivel más profundo del conocimiento (Fidias, 2012).



La investigación tiene un nivel explicativo debido a que se describe el problema del suelo en estado natural a nivel de subrasante en la vía de estudio con la finalidad de darle una solución mejorando las propiedades físico - mecánicas adicionando cal y residuos de albañilería particulado.

3.2.2. Diseño de investigación

El diseño experimental se basa en la manipulación deliberada de una variable aun no comprobada, dentro de un contexto estrictamente controlada. Su objetivo es describir de qué modo y por qué causa se produce o puede producirse un fenómeno (Palella & Martins, 2010).

La presente investigación se desarrolla bajo un diseño experimental donde las variables son manipuladas, así mismo se realiza un seguimiento con el fin de lograr los objetivos planteados y determinar si la cal y residuos de albañilería particulado tienen efecto sobre las características físico mecánicas del suelo.

3.2.3. Enfoque de investigación

La investigación bajo el enfoque cuantitativo se denomina así porque trata con fenómenos que se pueden medir (esto es, que se les puede asignar un número, como, por ejemplo: número de hijos, edad, peso, estatura, cociente intelectual, entre otros) a través de la utilización de técnicas estadísticas para el análisis de los datos recogidos, su propósito más importante radica en la descripción, explicación, predicción y control objetivo de sus causas (Sánchez, 2019).

La investigación pertenece a un enfoque y/o análisis cuantitativo en vista de que se recolecta y analiza los datos de manera que las hipótesis planteadas puedan probarse empleando el análisis estadístico con el cual también se



determinará cual es el comportamiento del suelo natural adicionando cal y residuos de albañilería particulado.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.3.1. Población

Es el conjunto total de individuos, objetos o medidas, que poseen algunas características comunes observables en un lugar y en un momento determinado, además cuando se vaya a llevar a cabo alguna investigación debe de tenerse en cuenta algunas características esenciales al seleccionarse la población bajo estudio (Rojas, 2017).

La población está constituida por la Av. Los Virreyes de la ciudad de Juliaca – Puno.

3.3.2. Muestra

Se puede definir a la muestra como una porción de la población que por lo tanto tienen las características necesarias para la investigación, es suficientemente clara para que no haya confusión alguna, la muestra se elige con la finalidad de investigar ciertas características de la población (Ñaupas, Valdivia, Palacios, & Romero, 2018).

La muestra está constituida por las progresivas 0+000 hasta 0+715.50 km de la Av. Los Virreyes – Juliaca. Por lo consiguiente, el muestro es no probabilístico por conveniencia.

Según la Norma CE.010 (2010), la Av. Virreyes se clasifica como una vía colectora (20m de ancho promedio) a partir de la evaluación de tráfico vehicular.

El diseño de la avenida se refleja de acuerdo a la Norma GH. 020, con la que se diseña según a la incidencia del tipo de vía, tratándose de vías locales principales y uso a nivel de viviendas; definiendo dos calzadas de 6 metros (dos carriles de 3.00m por cada una), distanciados por un separador central (jardín y caminera) y considerando una cuneta de 0.50m por calzada como diseño preliminar, en la que se obtiene un ancho bruto de 13 metros, con fines de exploración de suelos correspondiente.

Tabla 11

Cantidad de ensayos base para análisis

% de incorporación	Propiedades Físicas			Propiedades Mecánicas	
	Humedad	Granulometría	Límites de consistencia	Proctor modificado	CBR
0%	2	2	2	2	2
0% RAP + 4% Cal	---	---	2	2	2
5% RAP + 4% Cal	---	---	2	2	2
10% RAP + 4% Cal	---	---	2	2	2
15% RAP + 4% Cal	---	---	2	2	2
TOTAL	2	2	10	10	10

Nota: Elaboración propia

En cumplimiento de la Norma CE.010 (2010), se determina 07 puntos de investigación (calicatas) referido a la exploración y muestreo de suelos. Tratándose de suelos arcillosos como suelo representativo y de sección de características homogéneas para la estabilización; donde, con el fin de determinar y evaluar el desempeño físico – mecánico del suelo tanto en su estado normal como modificado se plantea en la tabla 11, la cantidad de ensayos como mínimo que se requieren, interviniéndose 02 puntos con fines de investigación.

Los aditivos estabilizantes que se incorporarán a la fase natural de los suelos arcillosos son la cal y los residuos de albañilería particulado (RAP). En

concordancia al Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos MTC (2014), la dosificación de la cal como agente estabilizador se encuentra en un rango de 2 – 8 % en peso, por lo cual la incorporación de cal será constante como 4% (la norma menciona sobre la experiencia americana con referencias a los resultados de excelencia; que en suelos altamente arcillosos como capa inferior, utilizando una dosificación de 1 a 3 % en peso para cal, y como capa granular y/o superficial, de 5 a 10 % en peso). Se precisa analizar el comportamiento físico – mecánico de las diferentes incorporaciones de RAP (5%, 10%, y 15%) en combinación con la cal y suelo natural representativo, con la finalidad de mitigar la contaminación ambiental y determinar su incidencia como agente estabilizador.

Tabla 12

Cantidad de ensayos especiales a realizar

% de incorporación	Ensayos Especiales	
	Gravedad Especifica	Durabilidad (Humedecimiento)
0%	2	2
0% RAP + 4% Cal	---	2
5% RAP + 4% Cal	---	2
10% RAP + 4% Cal	---	2
15% RAP + 4% Cal	---	2
TOTAL	2	10

Nota: elaboración propia

La tabla 12, se refiere a los ensayos adicionales que se pretende analizar, la gravedad específica como apoyo en la obtención de las exigencias mecánicas del suelo en su estado sin modificar y el ensayo de durabilidad para las diferentes proporciones de suelo, cal y RAP. El Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos MTC (2014) indica a la durabilidad como una variable en el ámbito de estabilización de suelos.



3.4. DISEÑO ESTADÍSTICO

3.4.1. Prueba de Hipótesis

Hay dos enfoques distintos en el análisis estadístico para evaluar hipótesis: los análisis no paramétricos y paramétricos. Estos enfoques tienen suposiciones características que los respaldan. La decisión sobre cuál usar recae en el investigador y depende de las suposiciones específicas que desee investigar, según resalta Mayorga & otros (2022).

3.4.2. Correlación

La correlación es un indicador de estadística que describe el grado en que dos variables sostienen una relación lineal entre sí. La medición de la correlación es a través del coeficiente de correlación de la muestra está representado por la letra "r", la misma que está sometida a pruebas y ensayos a fin establecer el nivel de significancia. (Velásquez, 2013).

Vinuesa (2016) menciona que la correlación es esencialmente una manera estandarizada de medir la relación o covariación lineal entre dos variables. Este índice de correlación, denotado como "r", puede variar entre -1 y +1, donde valores extremos indican correlaciones perfectas, ya sea negativas o positivas respectivamente. Un valor de $r = 0$ señala que entre las variables no hay una relación lineal. La correlación positiva sugiere que ambas variables cambian en la misma dirección, mientras que una correlación negativa indica que varían en direcciones opuestas. Lo notable del coeficiente de correlación es que su magnitud, por sí misma, actúa como una medida del tamaño del efecto. Esta magnitud generalmente se interpreta de acuerdo a las indicaciones de la tabla 13.

Tabla 13*Interpretación del coeficiente de correlación*

VALOR	SIGNIFICADO
Igual a -1	Negativa perfecta y grande
Dentro de -0.9 a -0.99	Negativa muy alta
Dentro de -0.7 a -0.89	Negativa alta
Dentro de -0.4 a -0.69	Negativa moderada
Dentro de -0.2 a -0.39	Negativa baja
Dentro de -0.01 a -0.19	Negativa muy baja
Igual a 0	Nula
Desde de 0.01 a 0.19	Positiva muy baja
Desde de 0.2 a 0.39	Positiva baja
Desde de 0.4 a 0.69	Positiva moderada
Desde de 0.7 a 0.89	Positiva alta
Desde de 0.9 a 0.99	Positiva muy alta
Igual a 1	Positiva perfecta y grande

Nota: Obtenido de Fernández, Quintero & Orejuela (2019)

3.4.3. Significancia

La importancia estadística se evalúa mediante niveles de significancia, expresados como probabilidades (0.05 y 0.01), y la distribución muestral también se interpreta en términos de probabilidad (donde el área total es igual a 1.00). Para determinar si podemos confiar en las generalizaciones realizadas, recurrimos a la distribución muestral, utilizando una probabilidad apropiada para la investigación, que varía según si escogemos un nivel de significancia de 0.05 o 0.01. Es decir, evaluamos si nuestro valor estimado en la muestra cae dentro del área de riesgo, asegurándonos de mantenernos alejados del valor crítico de la distribución muestral, que se acerca mucho al valor poblacional. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

3.5. VARIABLES

3.5.1. Variable independiente

- Cal y residuos de albañilería particulado.

3.5.2. Variable dependiente

- Propiedades físico - mecánicas de la subrasante.

3.5.3. Variable interviniente

- Análisis de costos.

3.5.4. Operacionalización de variables

Tabla 14

Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Variable independiente Cal y residuos de albañilería particulado.	Porcentajes de dosificación	5%RAP + 4%C 10%RAP+ 4%C 15%RAP + 4%C	%
Variable dependiente Propiedades físico mecánicas de la subrasante.	Propiedades físicas - Propiedades mecánicas	Granulometría Contenido de humedad Límites de consistencia Optimo contenido de humedad Densidad máxima seca (gr/cm ³) Capacidad de soporte	% % %
Variable interviniente Análisis de costos	Costos	Costo convencional Costo de Estabilización Variación de costos	S/. S/. %

Nota. Se muestra la operacionalización de las variables del estudio (Elaboración propia)



En la tabla 14, se muestra la variable independiente y dependiente de la presente investigación.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Técnicas

Las técnicas de recolección de datos son procedimientos y actividades que permiten comprobar el problema planteado de la variable estudiada en la investigación, por lo tanto, el tipo de investigación determinará la técnica a emplear (Bavaresco, 2001).

Las técnicas que se emplearon son la revisión bibliográfica, observación directa, exploraciones directas (calicatas), ensayos de laboratorio, análisis y procesamiento de resultados.

3.6.2. Instrumentos

Los instrumentos son las herramientas que se emplean para obtener los datos de la realidad que se estudia (Bavaresco, 2001).

Los instrumentos que se usaron en el estudio fueron las normas vigentes, las fichas de recopilación y registro de datos, planillas de cálculo para procesar información cuantitativa, Autodesk Civil 3D con fines de diseño, Presupuestos.pe para análisis de costos, software SPSS para analizar e interpretar los resultados.

3.7. PROCEDIMIENTO

Para el presente proyecto, respecto a los ensayos de mecánica de suelos, se debe cumplir exclusivamente para determinar y analizar las propiedades físico - mecánicas de los suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, ubicado en la ciudad de Juliaca; tanto en su



estado natural como modificado, con cal y residuos de albañilería particulado (RAP), por lo que son utilizados como material de investigación, a fin de obrar el estudio de mecánica de suelos (EMS) respectivo e interpretación de los resultados de acuerdo a los antecedentes y las normas vigentes.

3.7.1. Etapa preliminar

Antes de comenzar la fase de adquisición de materiales, se lleva a cabo una observación previa y el acondicionamiento del área de estudio. Asimismo, se seleccionan y alistan las herramientas que deben ser utilizados posteriormente en campo, laboratorio y gabinete. Se enfoca en la adecuada preparación de los recursos y medios necesarios, con el propósito de garantizar un procesamiento de datos eficiente y una base sólida para los resultados.

3.7.2. Trabajo en campo

3.7.2.1 Obtención de material base (Suelo arcilloso)

Dentro del campo, primeramente, se realiza el reconocimiento y acondicionamiento de cada punto de investigación a considerar para el presente proyecto, por lo que se procede a ubicar con un GPS las coordenadas de cada calicata y también en función de progresivas para evidenciar su posición nominal a lo largo de la vía identificada.

Conforme a la Norma CE.010 (2010), de pavimentos urbanos, se determina la cantidad de puntos de investigación (calicatas) para la Av. Virreyes de acuerdo al tipo de vía, en función al estudio de tráfico y área de intervención (ver la tabla 15).

La longitud del eje de la Av. Virreyes es de 715.50 m, siendo determinado en Autodesk CIVIL 3D (uso del plano catastral y levantamiento topográfico). Según la Norma GH. 020 (2011), de componentes de diseño urbano, tratándose de vías locales principales que constituyen acceso a viviendas; la avenida se diseña para dos carriles (una calzada) a cada lado del separador central (cada carril de 3 metros). Adicionalmente, se diseña una cuneta de 0.50 metros por calzada; obteniéndose un ancho bruto de 13 metros con fines de pavimentación.

Los volúmenes de tráfico para la avenida en mención es para vías tipo colectora, que se encuentran en el rango de 1000 a 8000 vehículos por día (Vpd), con aproximadamente 50 a 800 de tráfico diario promedio de camiones (ADTT) según a las especificaciones de la Norma CE.010 (2010). Por ende, según la tabla 15, se determina 07 puntos de investigación (calicatas).

Figura 18

Apertura de calicatas C – 1 y C – 2 en la avenida Virreyes Juliaca



Nota: La imagen muestra la exploración a considerar para la presente investigación

Con la ayuda de personal obrero y utilizando herramientas (pico, barreta, pala) se realiza la apertura de cada calicata con medidas trabajables de 1.20 m. x 1.50 m. La exploración se lleva a una profundidad mínima de

investigación de 1.50 m. por debajo de la rasante de la vía, según la Norma CE.010 (2010).

Tabla 15

Cantidad de puntos de exploración según la tipología de vía

TIPO DE VÍA	N° DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN	ÁREA (m ²)	VOLUMEN DE TRÁFICO	
			Vpd	ADTT
Expresas	1 cada	1000	11000 - 17000	400 - 700
Arteriales	1 cada	1200	4000 - 30000	300 - 1500
Colectoras	1 cada	1500	1000 - 8000	50 - 800
Locales	1 cada	1800	≤ 1000	≤ 50

Nota: Adaptado de (Pavimentos Urbanos CE.010, 2010)

Una vez alcanzado el fondo requerido en cada una de las calicatas se lleva un registro de los estratos encontrados en el suelo, en el que se anota una breve descripción estratigráfica tanto sobre el espesor del estrato como sus características mediante símbolos y palabras, a través de procedimientos manuales y visuales. Posterior a ello, se extraen muestras representativas de los estratos de cada calicata las que deben ser identificadas, detalladas y etiquetadas con la ubicación de la perforación (según coordenadas UTM - WGS84), número de muestra, nivel de fondo y si existe la presencia de nivel freático, para luego ser almacenadas en bolsas de muestreo y trasladadas al laboratorio para luego clasificarlos según el análisis granulométrico y límites de consistencia.

Se toma en cuenta 02 puntos de investigación (calicatas) por tratarse de suelos arcillosos con sección de características homogéneas para la presente investigación, además no se detectan presencia del nivel freático a una profundidad de 1.50 metros, ni cambio de topografía significativa durante la exploración y muestreo. Según la Norma CE.010



(2010), menciona la determinación de 01 CBR por cada cinco puntos de investigación y también especifica de por lo menos 01 CBR para cada tipo de representación (suelos que se constatan en el perfil estratigráfico y con ayuda de los planos de diseño) de subrasante; por lo cual se procede a analizar 02 calicatas.

Consecuentemente, se extraen muestras representativas alteradas e inalteradas respecto a la humedad, de suelos arcillosos a nivel de subrasante de cada una de las calicatas. Se emplea bolsas herméticas en las muestras inalteradas, especialmente para cuantificar el contenido de humedad natural y para las muestras alteradas se utiliza sacos de muestreo con el fin de realizar los ensayos físico – mecánicos.

Con el objetivo de reducir la humedad natural se expone al sol y se deja airear o secar las muestras representativas en una manta de lona, y también siendo perturbadas en el momento de la disgregación del material de suelo a partículas más pequeñas con una comba de goma sobre una superficie rígida, para su mayor comodidad y trabajabilidad en laboratorio. Finalmente, tras el cuarteo del material base se transporta al laboratorio de mecánica de suelos debidamente etiquetadas, siendo almacenados en sacos de muestreo para efectuar las diferentes pruebas.

3.7.2.2 Procedencia de residuos de albañilería particulado

Para la obtención de los residuos de albañilería particulado se tuvo que seguir un proceso que consistió básicamente en identificar un proveedor de materiales de construcción. LAMAX-A S.A.C. (2023), empresa dedicada a proveer ladrillos mecanizados en la ciudad de Juliaca,

ubicada en la Carretera Salida Arequipa Km. 7+000; actualmente, nominado como JULIACA LADRILLOS S.A.C (2025).

Figura 19

Identificación de los residuos de albañilería particulado



Nota: La imagen muestra los residuos de albañilería a utilizar en la presente investigación

La empresa mencionada, incorpora a la materia prima principal arcilla (proveniente de canteras locales) un porcentaje de arena como aditivo con fines de reducir la plasticidad; en su ciclo de elaboración de unidades de albañilería, a una temperatura de cocción de 900 a 980°C y en un tiempo, de 3 horas aproximadamente por tramo.

Con la autorización correspondiente del personal a cargo se realizó la visita a sus instalaciones para poder identificar y adquirir los residuos de albañilería para llevar a cabo la investigación.

Para esta investigación, utilizamos los desechos de ladrillos (ladrillos Hércules, King Kong, pandereta, pirámide) proveniente debido a la falta de control de calidad durante su fabricación (cocción), acumulado en el patio central de la planta durante 5 años. La potencia de los residuos de ladrillo (150m x 8m x 3m) de la empresa, es más que suficiente para abastecer la vía de estudio.



Tras la recolección de una muestra representativa se procede a un proceso de triturado y/o molienda hasta obtener un material particulado y/o fino (polvo), siendo un procedimiento mecanizado o no mecanizado. Luego se lleva a cabo, el respectivo cuarteo en una manta de lona, después se toma y almacena una fracción en sacos de muestreo, para así seguidamente sean llevados al laboratorio de mecánica de suelos y materiales. El material considerado para los ensayos de laboratorio es pasante al tamiz N°20.

Tabla 16

Análisis químico de los residuos de albañilería particulado

PARÁMETROS QUÍMICOS	UNIDAD	RESULTADOS
1.-Contenido de humedad	%	0.94
2.-Oxido de Silicio SiO ₂	%	51.35
3.-Oxido de Sodio Na ₂ O	%	0.005
4.-Óxido de Hierro Fe ₂ O ₃	%	0.05
5.-Oxido de Potasio K ₂ O	%	0.002
6.-Oxido de Calcio CaO	%	0.08
7.-Oxido de Magnesio MgO	%	0.07
8.-Oxido de Aluminio Al ₂ O ₃	%	36.95

Nota: se muestran los diferentes parámetros que se obtuvieron en el ensayo químico

Por otra parte, paralelo a la ejecución de los ensayos de EMS se realiza un análisis químico de los residuos de albañilería particulado en las instalaciones del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano, recabando los siguientes resultados:

3.7.2.3 Procedencia de la cal

En nuestro país, la cal viva y cal hidratada están sujetas por la SUNAT mediante el DECRETO SUPREMO N° 268-2019- EF, donde se indica que “La concentración de hidróxido de calcio (comprende cal

hidratada), óxido de calcio (comprende cal viva), o la combinación de estas, que posean una composición mayor al 40% deben ser sometidas al registro, seguimiento y fiscalización en el Perú para la inspección de Bienes Fiscalizados”. Por tal razón, las sustancias que contienen cal no superan el porcentaje en mención dentro del régimen mercantil y solo se halla en la mayoría, productos con cal hidratada.

Tabla 17

Regulación de las características de cal de obra

Caracterización	Cal de obra	Cal hidratada
COMPONENTES	Trazas de hidróxido de calcio, carbonato de calcio o combinación de carbonato de calcio y partículas de rocas desmenuzadas.	Es la combinación de partículas desintegradas de calizas con carbonato de calcio
Ca(OH) ₂	Contempla entre 3 y 15 %	Oscila entre 21 y 39 %
FINALIDAD	Revestimientos y albañilería. Estabilización de suelos. Como complemento de mortero.	Plasticidad, durabilidad y compactibilidad. Para construcciones.
APLICACIONES	Mejoramiento de suelos sódicos y ácidos. En el sector de construcción y también en marcado de campos.	En elaboración de morteros con fines de albañilería Para tarrajeo, asentado de ladrillos.

Nota: Adaptado de Mejoramiento de un suelo arcilloso tratado con cal de obra, Ccansaya y Tello (2022)

Para la presente investigación se utiliza cal de obra (contiene hidróxido de calcio Ca(OH)₂), adquirido de la reconocida tienda PROMART en la ciudad de Juliaca, siendo de color blanco contenidas en bolsas a nivel de 20 kg, que también es utilizada para tratado y mejoramiento de suelos como base para la construcción. En la tabla 17 se resalta algunas consideraciones relevantes.

3.7.3. Ensayos de laboratorio



El EMS realizados en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales en las instalaciones del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura de la Universidad Nacional del Altiplano, con el fin de determinar y analizar las propiedades tanto físicas como mecánicas del suelo, tanto en su estado normal y/o natural como modificado, con cal y residuos de albañilería particulado, son:

3.7.3.1 Contenido de humedad

El ensayo de contenido de humedad se procede conforme a los procedimientos estandarizados en la norma ASTM D2216 y MTC E108 (2016), donde el objetivo es cuantificar la cantidad de agua de una muestra representativa de suelo en condiciones porcentuales.

Materiales y equipos

- Horno tipo eléctrico controlado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Una balanza de precisión. Con sensibilidad de 0.01 g.
- Capsulas para especímenes (taras).
- Cucharon y/o espátula metálica.
- Aparato punzo-cortante (cuchillo).
- Ficha de apuntes y guantes de seguridad.

Procedimiento de ensayo

Antes de empezar con el desarrollo del ensayo, las muestras se mantienen en envases herméticos no corrosivos a una temperatura no menor a 3°C ni mayor a 30°C y evitando el contacto directo con el sol.

Tabla 18*Cantidades mínimas de material húmedo seleccionado*

Máximo tamaño de granos (traspasa el 100%)	Dimensión de malla estándar	Masa mínima sugerida de testigo de ensayo húmedo para contenidos de humedad reportados	
		Con $\pm 0.1\%$	Con $\pm 1\%$
2mm o menor	2.00mm (N°10)	A partir de 20 g	20 g *
4.75mm	4.760mm (N°4)	A partir de 100 g	20 g *
9.5mm	9.525mm (3/8")	A partir de 500 g	50 g
19.0mm	19.050mm (3/4")	A partir de 2.5 kg	250 g
37.5mm	38.100mm (1 1/2")	A partir de 10 kg	1 kg
75.0mm	76.200mm (3")	A partir de 50 kg	5 kg

Nota. Extraído de la guía del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC, Manual de ensayo de materiales, 2016, pág. 51)

Se procede con el pesaje de tres capsulas (taras) debidamente identificadas, luego se toma muestras representativas según indica la tabla 18 para cada una respectivamente y se registra el peso húmedo de suelo más la capsula. Posterior a ello, se lleva las muestras al horno para ser deshumedecidas y/o secadas a 110 ± 5 °C de temperatura hasta ser constante, por lo que generalmente se requiere de 16 horas como mínimo. Finalmente se extrae las muestras secas del horno, siendo enfriadas hasta que los recipientes puedan ser maniobrados cómodamente, para luego registrar el peso de la muestra en condiciones secas más la capsula en la misma balanza de precisión.

3.7.3.2 Granulometría

El ensayo granulométrico se efectúa conforme a la norma (ASTM D422, 2007) y MTC E107 (2016), que el objetivo es obtener los diversos tamaños de las partículas del suelo y con esto la tipología y/o clasificación del suelo. Para lo cual se utilizan diversos tamices estandarizados por la ASTM de la siguiente manera:



Materiales y equipos

- Serie de Tamices
- Horno tipo eléctrico y controlado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de precisión. Con 0.01 g de sensibilidad.
- Recipientes (taras y bandejas).
- Cucharon y/o espátula metálica.
- Guantes de seguridad.
- Cepillo apropiado para limpiar las mallas.

Tabla 19

Conformación de tamices estandarizados

Descripción	
Tamiz	Abertura (mm)
3"	Equivale a 75.00 mm
2"	Equivale a 50.80 mm
1 ½"	Equivale a 38.10 mm
1"	Equivale a 25.40 mm
¾"	Equivale a 19.00 mm
3/8"	Equivale a 9.50 mm
(N° 04)	Equivale a 4.76 mm
(N° 10)	Equivale a 2.00 mm
(N° 20)	Equivale a 0.84 mm
(N° 40)	Equivale a 0.43 mm
(N° 60)	Equivale a 0.26 mm
(N° 140)	Equivale a 0.106 mm
(N° 200)	Equivale a 0.075 mm

Nota. Extraído de la guía del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC, Manual de ensayo de materiales, 2016, pág. 44)

Procedimiento de ensayo

Antes de empezar con el ensayo se realiza el respectivo cuarteo de la muestra secada y/o aireada al sol, para luego adquirir una fracción del

cuarteo y se registra el peso total del suelo secado al aire, de esta manera se obtiene la muestra representativa de suelo.

Durante este procedimiento, también se considera la humedad higroscópica; para lo cual se pesa una porción de muestra representativa de los cuarteos que se realiza anteriormente y se lleva con fines de secado a 110 ± 5 °C al horno durante 24 horas. Se vuelven a pesar de nuevo para luego registrarlos.

A continuación, se sitúa la muestra base en un recipiente adecuado, remojándola con agua hasta que en su totalidad los terrones se desintegren y ablanden, luego se lava y limpia la muestra sobre la malla N°200, con abundante agua, teniendo en consideración de que ninguna partícula retenida se desaparezca de él. Posteriormente se procede con el horno a una temperatura establecida de 110 ± 5 °C. durante 16 horas.

Figura 20

Ensayo del análisis granulométrico



Nota: Tamizado del suelo natural para su posterior clasificación



Seguidamente, se dispuso a tamizar el material lavado, retenido y secado, siendo netamente una fracción fina, es decir material pasante al tamiz N°4; agitándola violentamente con un movimiento rotatorio horizontal y vertical durante un tiempo apropiado. Después, mediante un juego de tamices situados en forma decreciente, se pesa y registrar en las fichas - formatos de recopilación el material retenido en los diferentes tamices utilizando una misma balanza de precisión. El porcentaje de material retenido en los tamices se calcula con la siguiente expresión mencionada:

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

Finalmente tomando en cuenta la humedad higroscópica se realiza el cálculo de porcentaje de grava, arena, y material fino para respectiva clasificación de suelos.

3.7.3.3 Límites de Atterberg

La prueba de límites se realiza conforme a los parámetros de la norma (ASTM D 4318, 2005) y MTC E110,111 (2016), la cual consiste en obtener la humedad contenida, la cual delimita los estados en las que tiene diferentes comportamientos el suelo y estos son: semilíquido, plástica y semisólida.

Materiales y equipos

- Cuchara de Casagrande (incluye acanalador)
- Placa de vidrio
- Tamiz N°40



- Horno tipo eléctrico y controlado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de precisión. Con 0.01 g de sensibilidad.
- Pipeta (con agua destilada).
- Recipientes (taras).
- Cucharon y/o espátula metálica.
- Guantes de seguridad

Procedimiento de ensayo

Limite liquido

Definido como el contenido de humedad, donde el suelo se encuentra en el límite entre la fase líquida y plástica, en términos de porcentaje. Se determina el LL tanto en su estado normal como modificado (con la añadidura de cal y RAP en peso seco).

Se prepara una porción representativa de la muestra total disponible, suficiente como para lograr 150 a 200 g de material pasante al tamiz N°40. Luego se humedece con agua destilada hasta conseguir una mezcla uniforme, suave y trabajable, lo cual se deja saturado por un periodo de 16 horas, siendo especificado para suelos arcillosos.

Transcurrido el periodo, la muestra saturada se remueve y amasa en el recipiente de porcelana hasta lograr una mezcla uniforme y de consistencia pegajosa; para después trasladar del recipiente a la copa de Casagrande, rellenando hasta un tercio del total próximamente.

Seguidamente, la masa húmeda se distribuye y se nivela con la espátula, originando una pasta circular de 1 cm de espesor en el fondo

central de la cuchara de Casagrande. Luego se atraviesa con el acanalador por la parte central de la cuchara para fraccionar la pasta en dos partes iguales, apreciándose la ranura de manera clara.

Figura 21

Ensayo de LL usando una copa de Casagrande



Nota: Preparación, amasado y colocación de pasta

A continuación, se gira la manivela con una frecuencia de dos revoluciones por segundo hasta que se logre cerrar la ranura de la pasta. Se registra la cantidad de golpes generados en la cazuela y luego se toma una porción de la parte central de la cuchara para la cuantificación del contenido de humedad.

Este procedimiento se repite como mínimo para tres contenidos de humedad, establecidos en los siguientes rangos: uno de 15 a 25 golpes, otro de 20 a 30 golpes y por último, de 25 a 35 golpes.

Limite plástico

Para la prueba del LP se trabaja con el material preparado para LL, obteniéndose una porción de 20 gr. aproximadamente, se reduce la humedad amasando la pasta hasta que se fricciona o rueda sobre la superficie de la placa de vidrio esmerilado sin que se adhiera a la mano.

Se moldea una masa de forma elipsoidal con las manos para luego formar rollitos con un diámetro de 3.2 mm (1/8"). Se prosigue con la elaboración de rollitos hasta que estos tiendan a rajarse y/o desmoronarse.

Finalmente se pesa una muestra de rollitos no menor a 6 gramos, para después colocarlo en el horno, tras el secado se pesa y se apuntan los datos obtenidos. De igual forma para el cálculo del LP, se sigue este procedimiento para muestra en su estado natural como modificado con añadiduras de cal y RAP en todas las dosificaciones.

Figura 22

Muestras ensayadas para determinar el IP



Nota: Obtención de muestras húmedas para LL y LP

Índice de plasticidad



El IP se determina tanto en su estado natural como modificado (con la adición de cal y RAP en peso seco) a través de la siguiente expresión:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de plasticidad

LL: Límite líquido

LP: Límite plástico

3.7.3.4 Proctor modificado

Esta prueba se determina de acuerdo a la norma estandarizada (ASTM D1557, 2007), y MTC E115 (2016), donde nos indica que el método consiste en obtener la relación de la humedad contenida y el peso unitario seco del suelo, con el fin de conocer el punto óptimo.

Materiales y equipos

- Molde Proctor 4" (101.6 mm de diámetro int. y 116.4mm de alt.)
- Pisón compactador 10 Lb (4.5364 kg y 50.8mm de diámetro)
- Extractor de especímenes
- Horno tipo eléctrico y controlado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de precisión. Con 0.01 g y 0.1 g de precisión.
- Vernier digital
- Tamiz N°04
- Probetas graduadas (1000 ml), incluye pipeta
- Enrasador de platina metálico
- Recipientes (taras y bandejas)



- Herramientas de preparación y mezcla
- Implementos de seguridad

Procedimiento de ensayo

Existen tres metodologías alternativas que son empleados para diversos casos. Utilizamos el método A, tratándose de suelos arcillosos, siendo material pasante al tamiz N°4 y, por ende, empleamos el molde Proctor de 4 pulgadas

Para comenzar con el ensayo en estado natural se requiere al menos una porción representativa de 15 kilogramos de suelo húmedo por ensayo, lo cual deberá ser secado y/o aireado conjuntamente con las otras muestras, usados en estado modificado (con cal y RAP). Antes del aireado se desmenuza los terrones aun presentes con una comba de goma sobre una manta de lona.

Tras el secado natural se tamiza la muestra total, utilizándose la malla N°04. En seguida, se reúne el material pasante al tamiz en mención y luego se realiza el mezclado utilizándose el cuarteo manual, para su posterior almacenaje en bolsas de polietileno y consecuentemente en sacos de muestreo.

También, empleando un vernier se realiza el dimensionamiento del molde Proctor, así como el diámetro, altura y peso sin el collarín (incluye base del molde), el cual debe ser obtenido y registrado con fines de cálculos.

Empleamos aproximadamente 2,3 kg del suelo seleccionado para cada molde a ser compactado por la metodología A. Añadimos la cantidad de agua necesaria a la muestra, siempre y cuando, el contenido de humedad sea lo más cercano al óptimo. El tiempo de humedecimiento para suelos arcillosos es de 16 horas en bolsas herméticas. Este proceso se repite para otros 4 especímenes, variando el contenido de agua en 2% tanto para valores inferiores al óptimo como superiores.

Figura 23

Preparación y humedecimiento de mezcla de suelo para molde proctor



Nota: Saturación de la muestra suelta en bolsas herméticas

Transcurrido el tiempo de saturación de la muestra, en un recipiente se divide en cinco partes iguales. Se coloca una fracción de suelo suelto en el molde, distribuyéndola de manera uniforme y apisonando suavemente con el pisón, y se prosigue a compactar con el apisonador en cinco capas, generando 25 golpes por capa (usamos un cuchillo para recortar las muestras excedidas en las paredes del molde después de la compactación

de cada una de las capas). La última capa se expande levemente dentro del collarín, sin exceder en 6 mm (1/4") de la cima del molde y/o espécimen.

A continuación, se aparta el collarín del molde con el fin de enrasar con la regla metálica la muestra compactada. En seguida se registra el peso del espécimen húmedo más el molde.

Después se emplea el extractor de muestras para desmoldar el espécimen compactado con el fin de obtener una porción de la parte central del espécimen en mención, para calcular el contenido de humedad luego de ser secada en el horno. Se debe repetir este proceso para los 4 puntos restantes y así determinar el contenido de humedad óptima (CHO) para una máxima densidad seca (DMS).

Figura 24

Compactado del espécimen para proctor modificado



Nota: Colocación y compactación de la muestra suelta en el molde

El ensayo se realiza tanto en su estado natural como modificado (con las adiciones de cal y residuos de albañilería particulado), con el



objetivo de determinar el CHO y DMS para cada curva de compactación, es decir en todas las dosificaciones que se mencionan a continuación:

Suelo CH en calicata N°01:

- MN 1: Suelo natural.
- MN 1 + 4% Cal + 0% RAP: Modificado con cal.
- MN 1 + 4% Cal + 5% RAP: Mas residuos de albañilería.
- MN 1 + 4% Cal + 10% RAP: Mas residuos de albañilería.
- MN 1 + 4% Cal + 15% RAP: Mas residuos de albañilería.

Suelo CH en calicata N°02:

- MN 2: Suelo natural.
- MN 2 + 4% Cal + 0% RAP: Modificado con cal.
- MN 2 + 4% Cal + 5% RAP: Mas residuos de albañilería.
- MN 2 + 4% Cal + 10% RAP: Mas residuos de albañilería.
- MN 2 + 4% Cal + 15% RAP: Mas residuos de albañilería.

En referencia a la curva de compactación, se calcula el CHO y DMS, para ello se debe determinar el peso unitario seco (densidad seca) para cada espécimen en función a su respectivo contenido de humedad, por lo cual primero se debe calcular el peso unitario húmedo (densidad húmeda), todo ello a través de las siguientes ecuaciones:

$$\rho_m = 1000 \times \frac{(M_t - M_{md})}{V}$$

Donde:

ρ_m : densidad húmeda de lo compactado (kg/m³)



M_t : muestra húmeda en espécimen (kg)

M_{md} : espécimen para compactado (kg)

V: volumen del espécimen (m³)

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{W}{100}}$$

Donde:

ρ_d : densidad seca del espécimen compactado (kg/m³)

W: cantidad de agua (%)

$$\gamma_d = 62.43 \rho_d \text{ en } \frac{ldf}{pie^3}$$

$$\gamma_d = 9.807 \rho_d \text{ en } kN/m^3$$

Donde:

γ_d : peso unitario seco del espécimen compactado

Para obtener la curva de 100% de saturación del peso unitario seco en todos los puntos, se selecciona y determina los valores de cantidad de agua correspondientes a la condición de 100% de saturación, a través de la siguiente ecuación:

$$W_{sat} = \frac{(\gamma_w)(G_s) - \gamma_d}{(\gamma_d)(G_s)} \times 100$$

Donde:

W_{sat} : contenido de agua para una saturación completa (%)

γ_w : peso unitario del agua 9.807 Kn/m³



G_s : gravedad específica del suelo

3.7.3.5 California Bearing Ratio (CBR)

Según a los estándares de la norma (ASTM D1883, 2005) y MTC E132 (2016) en este ensayo se determina el índice resistente de los suelos, también conocida como el valor de relación de soporte, nombrado CBR, para las condiciones de humedad y densidad controlada.

Material y equipos

- Molde CBR 6" (152.4 mm diámetro interior y 177.8 mm de altura).
- Disco espaciador (150.8 mm de diámetro y 61.37 mm de espesor).
- Pisón compactador 10 Lb (4.5364 kg y 50.8mm de diámetro).
- Prensa CBR (incluye diales digitales, pistón, diámetro 49.63 mm).
- Placa metálica circular y perforado con vástago.
- Sobrecargas anulares y/o ranuradas (peso total mayor a 4.54 kg).
- Trípode de dial con deformímetro (aproximación de 0,025mm).
- Extractor de especímenes de moldes de 6".
- Horno tipo eléctrico controlado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de precisión. Con precisión de 0.01 g y 0.1 g.
- Balanza con capacidad mayor a 20 kg.
- Estanque de agua (deposito para inmersión).
- Vernier digital.
- Papel filtro perforado.
- Tamiz N°04.
- Probetas graduadas (1000 ml), incluye pipeta.
- Enrasador de platina metálico.

- Recipientes (taras y bandejas).
- Herramientas de preparación, mezcla, colocación y extracción.
- Implementos de seguridad.

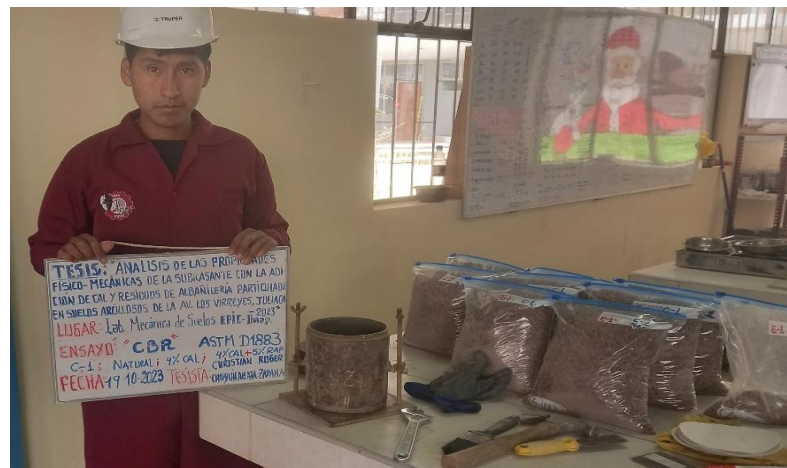
Procedimiento de ensayo

Antes de empezar con el ensayo en estado natural se necesita al menos una muestra representativa de 20 kilogramos de suelo húmedo por ensayo (10, 25 y 56 golpes), lo cual deberá ser secado y/o aireado conjuntamente con las otras muestras, usados en estado modificado (con la adición de cal y RAP). Antes del aireado se desmenuza y desintegra los terrones aun presentes con una comba de goma sobre una manta de lona.

Tras el secado natural se tamiza la muestra total, utilizándose la malla N°04. Por lo que después se reúne el material pasante al tamiz en mención y luego se realiza el mezclado utilizándose el cuarteo manual, para su posterior almacenaje en bolsas de polietileno y consecuentemente en sacos de muestreo.

Figura 25

Preparación y humedecimiento de mezcla de suelo para CBR



Nota: Saturación de muestras natural y/o modificado en bolsas herméticas



Empleamos aproximadamente 5 kg del suelo tamizado por cada molde CBR a ser compactado. Añadimos la cantidad de agua necesaria a la muestra representativa de acuerdo al contenido de humedad óptima, ensayadas en el molde Proctor anteriormente. El tiempo de saturación para suelos arcillosos es de 16 horas y deben ser almacenadas en bolsas herméticas (figura 25). Este proceso se realiza para los diferentes especímenes (10, 25 y 56 golpes).

Por otra parte, con la ayuda de un vernier debemos obtener las medidas del molde CBR de 6" así como su diámetro, altura y peso sin el collarín (incluye base del molde), el cual debe ser registrado y anotado para los cálculos correspondientes.

Una vez transcurrido el tiempo de saturación se procede a alistar e instalar el disco espaciador en la parte inferior del molde CBR y también colocar el papel filtro del mismo diámetro sobre el mismo.

A continuación, se prepara la muestra suelta y se divide en 5 partes iguales en un recipiente. Se coloca una fracción de suelo suelto en el molde CBR, distribuyéndola de manera uniforme y apisonando suavemente con el pisón, y se prosigue a compactar con el apisonador en cinco capas, generando una energía de 10, 25 y/o 56 golpes por capa (se utiliza un cuchillo para recortar las muestras excedidas en las paredes del molde luego de la compactación de cada una de las cuatro primeras capas y también generar ranuras entre capa). La última capa se extenderá ligeramente a nivel collarín, pero no deberá exceder en 6 mm (1/4") de la cima del molde CBR.

Paralelamente se debe tomar una muestra representativa entre 100 a 500 gramos del material sobrante con el fin de determinar el contenido de humedad, este proceso se realiza para todos los especímenes a considerar.

Terminada con el proceso de compactación, se quita el collarín y se enrasa el espécimen con una regla metálica recta y apropiada. Cualquier depresión generada al momento de eliminar partículas gruesas durante el enrasamiento, se procede a rellenar con material sobrante (sin gruesos), así comprimiéndolo con la ayuda de la espátula.

Figura 26

Compactación de especímenes en moldes CBR



Nota: Preparación, colocado y yaponado de muestras de suelos

A continuación, se desmonta el molde CBR y se vuelve a montar de forma invertido, excluyendo el disco espaciador, luego se coloca un papel filtro del mismo diámetro entre el molde y la base. Se registra el peso del espécimen húmedo más el molde CBR (incluye la base).

Tras el pesaje húmedo se alista, coloca y ajusta las placas metálicas perforadas con vástago y anillos graduables (mínimo 4.54 kilogramos en total) sobre el espécimen ensayado, luego el molde CBR es sumergido en un depósito de agua. Se realiza el ensamblaje del soporte dial con la finalidad de registrar la lectura inicial en deformímetro (se deja identificado la posición inicial del trípode dial).

Figura 27

Inmersión de especímenes y lectura inicial en deformímetro



Nota: Sumergido de moldes CBR durante 4 días y registro de hinchamiento en dial

Terminado el tiempo de inmersión, siendo cuatro días, se debe registrar la lectura de expansión final en deformímetro con el soporte dial (se lectura cada día). Después se extrae el molde del depósito con agua y se deja escurrir el molde CBR durante 15 minutos aproximadamente.

Posteriormente se pesa el molde CBR (sin incluir el peso de la placa perforada con vástago ni los anillos graduados), registrando como peso saturado del espécimen.

Para la etapa de penetración se coloca nuevamente los anillos graduados en molde CBR, y se coloca sobre el soporte de carga de la

prensa hidráulica, ajustándose de manera que el pistón se ubique en la parte central del molde, y hasta que se produzca contacto directo entre el pistón y el espécimen.

Seguidamente se computa en cero los diales digitales, luego se aplica la carga sobre el pistón mediante el mecanismo (manivela) correspondiente de la prensa hidráulica, a una velocidad de penetración de 1,27 mm (0,05") por minuto uniformemente y controlándose con la ayuda de un cronometro.

Se van registrando las lecturas del dial de carga para las penetraciones de especificadas en la tabla 20. Tras llegar a una penetración superior a los 10 minutos se procede a retirar el molde de la prensa hidráulica, desmontándose los anillos graduados.

Tabla 20

Estándares de lecturas de penetración y presión patrón

Penetración (mm)	(in)	Tiempo (min)	Carga Patrón (Kgf/cm²)
0		00:00	
0.64		00:30	
1.27		01:00	
1.91		01:30	
2.54	0.1"	02:00	70.31
3.18		02:30	
3.81		03:00	
4.45		03:30	
5.08	0.2"	04:00	105.46
6.35		05:00	
7.62		06:00	
10.16		08:00	
12.70		10:00	

Nota. Adaptado de la guía del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC, Manual de ensayo de materiales, 2016, pág. 256)



- MN 1 + 4% Cal + 5% RAP: Más residuos de albañilería.
- MN 1 + 4% Cal + 10% RAP: Más residuos de albañilería.
- MN 1 + 4% Cal + 15% RAP: Más residuos de albañilería.

Suelo CH en calicata N°02:

- MN 2: Suelo natural.
- MN 2 + 4% Cal + 0% RAP: Modificado con cal.
- MN 2 + 4% Cal + 5% RAP: Más residuos de albañilería.
- MN 2 + 4% Cal + 10% RAP: Más residuos de albañilería.
- MN 2 + 4% Cal + 15% RAP: Más residuos de albañilería.

A continuación, se muestra la ecuación con el fin de determinar la humedad de compactación, en términos de porcentaje.

$$\% \text{ de agua a añadir} = \frac{H - h}{H + 100} \times 100$$

Donde:

H: Humedad prefijada

h: Humedad natural

La expansión, se determina mediante la diferencia entre las lecturas del deformímetro antes y después de ser sumergido. Este valor se calcula en función a la altura del espécimen en el molde CBR, que en un promedio es de 127 mm (5"). Deduciendo la siguiente expresión:

$$\% \text{ expansion} = \frac{L_2 - L_1}{127} \times 100$$



Donde:

L1: Lectura inicial en mm

L2: Lectura final en mm

Se grafica una curva que relacione las presiones y las penetraciones (ordenadas y abscisas), y se observa si en esta curva se estima un punto de inflexión para realizar las correcciones (para 10, 25 y 56 golpes). Luego se determina las presiones que corresponden a 2,54 y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración, dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia 6,9 MPa (70.31 kgf/cm²) y 10,3 Mpa (105.46 kgf/cm²) respectivamente, a la vez multiplicando por 100.

Finalmente se dibuja una curva en la que se relacione el valor de relación de soporte (CBR) con la máxima densidad seca (DMS) para las diferentes energías de compactación (10, 25 y 56 golpes), obteniéndose el índice CBR para el 95% y 100% de la máxima densidad seca (DMS).

3.7.3.6 Ensayo de durabilidad con método de humedecimiento y secado de mezclas de suelo – cal - rap compactadas.

De acuerdo a los estándares de la norma ASTM D559 (2015) y MTC E 1104 (2016), en este ensayo se determina las pérdidas del suelo-cal-RAP, como resultado de ciclos de humedecimiento y secado reiterativo de los testigos de control (especímenes), con el fin de examinar la variabilidad volumétrica (expansión y contracción) y cambios de



contenido de humedad. Estos testigos de control son compactados a nivel de un peso unitario seco máximo y contenido de humedad óptima.

Materiales y equipos

- Molde Metálico 4" (101.6 mm diámetro interior, 116.4mm altura).
- Pisón compactador 10 Lb (4.5364 kg y 50.8mm de diámetro).
- Horno termostáticamente controlado a $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Cámara húmeda controlada a temperatura de $21 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$.
- Baño de agua para inmersión de especímenes.
- Cepillo de cerdas de alambre N°26 (de 1.6mm x 50mm x 0,5mm).
- Extractor de especímenes de moldes de 4".
- Horno eléctrico controlado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de precisión. Con sensibilidad de 0.1 g y 0.01 g.
- Balanza con capacidad mayor a 20 kg.
- Vernier digital.
- Tamiz N°04.
- Probetas graduadas, incluye pipeta.
- Enrasador de platina metálico.
- Escarificador para remover la 1° y 2° capa del espécimen.
- Recipientes (taras y bandejas).
- Herramientas de preparación, mezcla, colocación y extracción.
- Implementos de seguridad.

Procedimiento de ensayo

Para empezar con el ensayo se requiere por lo menos una muestra representativa de 30 kilogramos de suelo húmedo en total (6 kilogramos

por dosificación, es decir para dos testigos de control), lo cual deberá ser secado y/o aireado conjuntamente con las otras muestras, usados en estado natural y/o modificado (con la adición de cal y RAP). Antes del aireado se desmenuza los terrones aun presentes con una comba de goma sobre una manta de lona.

Tras el secado natural se tamiza la muestra total, utilizándose la malla N°04. En seguida, se reúne el material pasante al tamiz en mención, para así realizar el mezclado utilizándose el cuarteo manual, para su posterior almacenaje en bolsas de polietileno y consecuentemente en sacos de muestreo.

Figura 29

Preparación, humedecimiento y mezclado de suelo – cal- RAP



Nota: Preparación y mezclado uniforme de muestras sueltas con aditivos

Asimismo, con la ayuda de un vernier debemos obtener las medidas del molde Proctor, así como el diámetro, altura y peso sin el collarín (incluye base del molde), el cual debe ser registrado y anotado para los cálculos correspondientes.



Empleamos aproximadamente 2,3 kg del suelo tamizado para cada espécimen a ser compactado por el Método A de acuerdo a la norma establecido para el ensayo de Proctor Modificado (ASTM D 1557). Añadimos la cantidad de agua necesaria a la muestra, a nivel de contenido de humedad optima. Según el MTC E 115 (2014), el tiempo de humedecimiento para suelos arcillosos es de 16 horas siendo almacenadas en bolsas herméticas. Este proceso se repite para todos los especímenes de las dosificaciones a realizar.

Transcurrido el tiempo de saturación dosificado de la muestra, en una bandeja se debe dividir en cinco partes iguales. Según la Norma ASTM D1557 (2007), se coloca una fracción de suelo suelto en el molde, distribuyéndola de manera uniforme y apisonando suavemente con el pisón, y se prosigue a compactar con el apisonador en cinco capas, generando 25 golpes por capa. De acuerdo al ASTM D 559(2015), se escarifica las partes superiores de la primera y segunda capa para así romper los planos lisos de apisonado, previo al colocado y compactado de las subsiguientes capas; formándose ranuras en ángulos rectos una de otra con medidas de 3,2 mm de ancho, 3,2 mm de profundidad y de 6,4mm de separación aproximadamente. Usamos un cuchillo para recortar las muestras excedidas en las paredes del molde luego de la compactación de cada una de las cuatro primeras capas. La última capa se extenderá levemente dentro del collarín, pero no deberá exceder en 6 mm (1/4”) de la cima del molde.

Por otro lado, se debe tomar una muestra representativa no menos de 100 gramos de material sobrante con el fin de verificar el contenido de



humedad optimo (CHO), este proceso se realiza para todos los especímenes a considerar.

A continuación, se retira el collarín del molde con el fin de enrasar con la regla metálica la muestra compactada. Se registra el peso de la muestra compactada húmeda más molde, y luego se desmonta el molde con el extractor de especímenes. Todo ello, con la finalidad de calcular el peso unitario seco del espécimen en función al contenido de humedad, comparándola con la densidad seca de diseño.

Se identifica el testigo de control con un membrete metálico o un marcador adecuado como N°01, juntamente con otros acrónimos de identificación necesarias, empleándose para obtener datos sobre cambios volumétricos y de humedad durante el ensayo. Conjuntamente se dimensiona la altura y diámetro promedio del espécimen N°01, calculándose el volumen inicial y el peso respectivo.

Se moldea un segundo espécimen rápidamente, determinándose así el porcentaje de contenido de humedad y el peso unitario secada en el horno para su verificación. identificamos este testigo de control como el N°02 conjuntamente con otros acrónimos necesarios de reconocimiento, para después emplearse con el fin de obtener datos sobre las pérdidas del suelo – cal – RAP durante la prueba.

Posteriormente de acuerdo al ASTM D 559 (2015) se coloca e instala los especímenes de ensayo en dispositivos adecuados en la cámara húmeda, protegiéndose del agua durante un plazo de 7 días. Pesamos y

Figura 31

Inmersión de especímenes de variaciones de suelo – cal- RAP



Nota: Sumergido de los testigos de control en el depósito de agua durante 5 horas

Acotación: El ensayo de durabilidad experimentado anteriormente según los estándares y los procedimientos de la norma ASTM D559 (2015) y MTC E 1104 (2016), no se adapta para mezclas compactadas de suelo – cal – residuos de albañilería particulado; producto al desmoronamiento del espécimen o testigos de control durante la inmersión tanto en su estado natural como modificado.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Resultados de los valores característicos de la subrasante natural.

Se manifiestan los resultados que caracterizan las propiedades de la subrasante en su estado natural. Asimismo, se procede con la clasificación del material conforme a los estándares establecidos por las bases SUCS y AASHTO, sustentándose en los parámetros obtenidos mediante los ensayos de laboratorio.

Tabla 21

Valores característicos de la subrasante en C – 1

DESCRIPCIÓN	VALORES CARÁCTERÍSTICOS
Clasificación AASHTO	A - 7 - 6 ⁽²⁰⁾
Clasificación SUCS	CH
Humedad	32.551 %
% de grava	0.000 %
% de arena	4.450 %
% pasa N° 200	95.450 %
LL	64.774 %
LP	27.357 %
IP	37.417 %
Gs	2.703
DMS	1.629 gr/cm ³
CHO	20.200 %
CBR (al 95 % DMS)	2.490 %
CBR (al 100 % DMS)	3.210 %
Tipo de Subrasante	Inadecuada

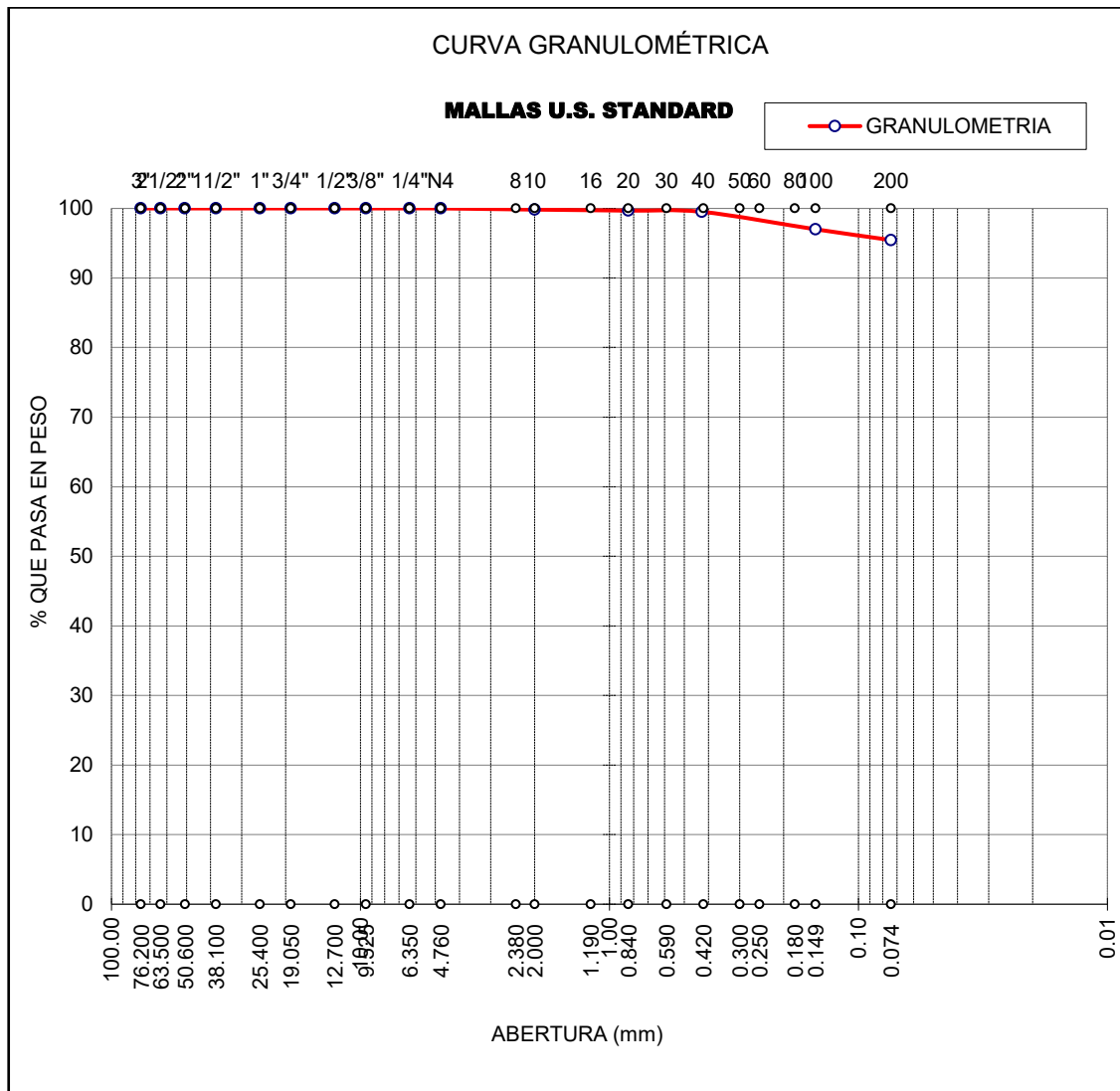
Nota. Elaboración Propia

Los valores característicos descritos en la tabla 21 corresponde al punto de investigación C – 1; tomando, ensayando y analizando exclusivamente muestras del estrato 2. En consonancia al cuadro anterior, se corrobora que de acuerdo a la

clasificación SUCS, en los ensayos ejecutados y analizados en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la FICA – UNA, la muestra patrón compete al grupo de arcilla de alta plasticidad (CH) y mediante la estructura AASHTO esta pertenece al conjunto A – 7 – 6 (20). Conforme a los valores característicos en estado natural, la tipología de la subrasante es inadecuada o insuficiente por presentar un CBR menor al 6 %, mínimo requerido acorde al Manual de Carreteras y perteneciente a suelos muy arcillosos conforme al IP.

Figura 32

Curva de gradación de partículas para C – 1



Nota. Elaboración Propia

En la figura 32, se visualiza la curva de gradación de partículas elaborada en función a los datos determinados en la zona de investigación C – 1, correspondiente exclusivamente a las muestras del estrato 2. Oriundo de la zona natural del punto kilométrico 0+250 km margen izquierdo de la Av. Virreyes - Juliaca. Se cuantifican las fracciones que atraviesan los tamices, correspondientes al suelo en su condición natural, siendo las proporciones de 0.00% para gravas, de 4.55% para las arenas y 95.45% atraviesa la malla N° 200, constituyendo esta una porción predominante y de gradación fina; lo cual lo establece como un material arcilloso.

Tabla 22

Valores característicos de la subrasante en C – 2

DESCRIPCIÓN	VALORES CARÁCTERISTICOS
Clasificación AASHTO	A - 7 - 6 (20)
Clasificación SUCS	CH
Humedad	29.252 %
% de grava	0.000 %
% de arena	3.180 %
% pasa N° 200	96.820 %
LL	61.055 %
LP	25.918 %
IP	35.137 %
Gs	2.692
DMS	1.640 gr/cm ³
CHO	19.600 %
CBR (al 95 % DMS)	2.710 %
CBR (al 100 % DMS)	3.520 %
Tipo de Subrasante	Inadecuada

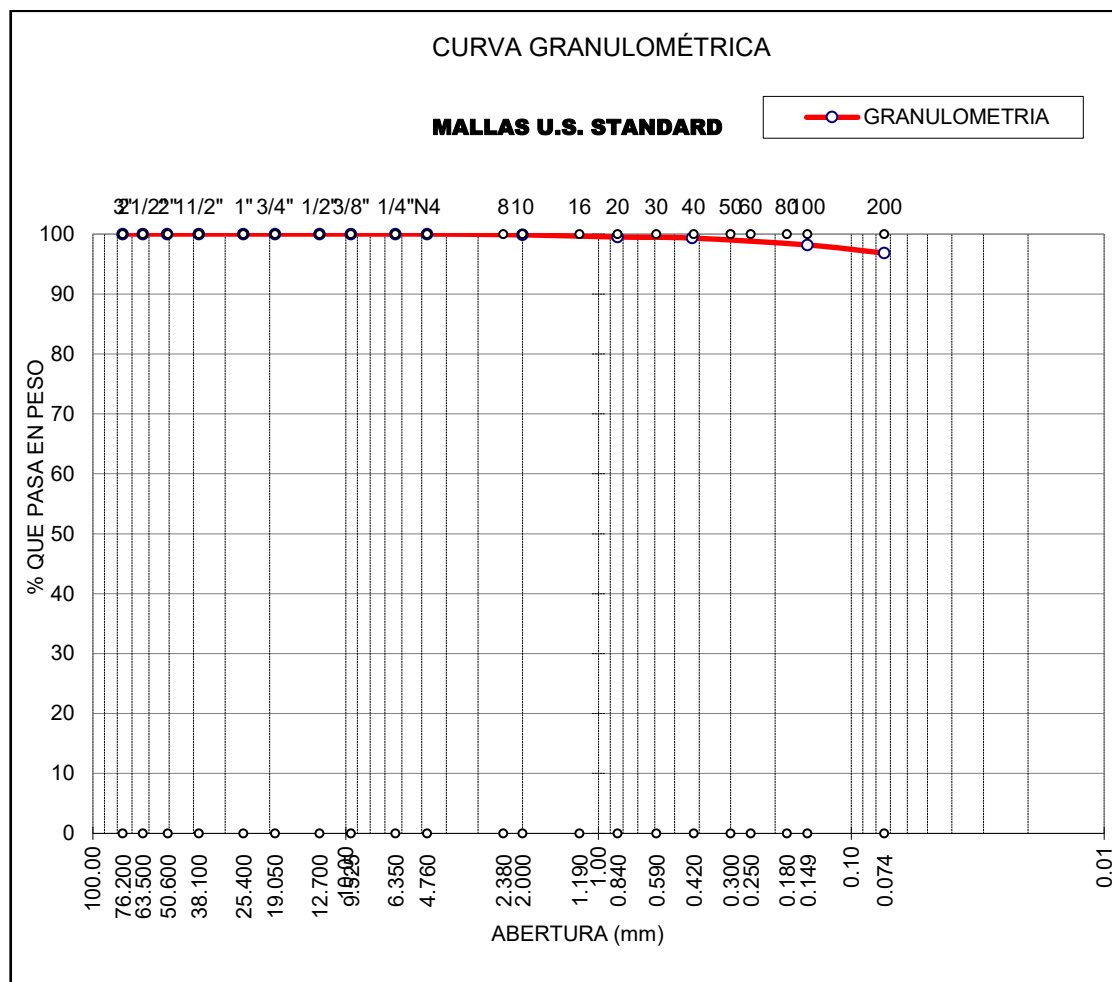
Nota. Elaboración Propia

Considerando la tabla 22, datos que pertenecen al punto de investigación C – 2, correspondiente exclusivamente a las muestras del estrato 2, se corrobora que de acuerdo a la clasificación SUCS en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la FICA – UNA, el patrón compete al grupo de una arcilla de alta

plasticidad (CH) y tomando en consideración la tipificación de AASHTO esta pertenece al grupo A – 7 – 6 (20). Según los valores característicos en estado natural, la tipología de la subrasante es inadecuada o insuficiente por presentar un CBR menor al 6 %, mínimo requerido tal como establece el Manual de Carreteras y perteneciente a suelos muy arcillosos conforme al índice de plasticidad. La estratigrafía de los puntos de investigación se adjunta y detalla en los anexos.

Figura 33

Curva gradación de partículas para C – 2



Nota. Elaboración Propia

En la figura 33, se visualiza la curva de gradación de partículas graficada en función a los datos obtenidos en la posición de investigación C - 2. Proveniente

de la zona natural del punto kilométrico 0+500 km margen derecho de la Av. Virreyes - Juliaca. Se cuantifican las fracciones que atraviesan los tamices, correspondientes al suelo en su condición natural; las porciones son de 0.00% para gravas, de 3.18% para las arenas y 96.82% atraviesa a la malla N° 200, este último compete a una porción predominante de gradación fina, lo cual lo establece como un material arcilloso.

Alternativas de Mejora de las Propiedades de la Subrasante

De acuerdo al Manual de Carreteras (2014), dentro de la Sección de Suelos y Pavimentos, describe que los principales aditivos estabilizantes son asfalto, cemento Portland y cal, además, indica que un suelo natural dentro la subrasante con clasificación CH (arcilla de alta plasticidad) según SUCS, se debe estabilizar mediante la adición de cemento o cal, aditivos que reaccionan con gradación fina.

Tabla 23

Selección de Aditivo estabilizante

Estabilizador	Tipo de suelo	IP	Dosificación	Observación
Muestra natural	A-7-6 (CH)	IP = 36.28%	-----	-----
Asfalto	A-1 hasta A-3	IP ≤ 8%	4 – 8%	No cumple
Cal	A-6, A-7	10% ≤ IP ≤ 50%	2 – 8%	Cumple
Cemento	A-1 hasta A-7	IP ≥ 18%	2 – 12%	Cumple

Nota. Adaptado de (MTC, Manual de carreteras suelos geología, geotécnica y pavimentos, 2014)

En referencia a la Norma CE 020 de suelos y taludes, menciona que se debe verificar que el pasante al tamiz N°200, se mantenga dentro del rango del 5% al 35%, antes de proceder la dosificación con cemento, por lo cual se descarta el uso de este aditivo al no cumplir con las exigencias de gradación.

MTC (2014), alude que los suelos que reflejan mejores condiciones orientado a ser estabilizados con cemento son granulares A-1,2,3 siempre que



contengan un % controlado de finos con media o baja plasticidad (LL menor a 40%, IP menor a 18%).

Justificación del Agente Estabilizador

Desde la perspectiva anterior, para la presente investigación, se utiliza la cal como sustancia estabilizadora química, donde el valor de plasticidad correspondiente a la subrasante sin tratamiento está comprendido entre 10 y 50% (MTC-EG, 2015). Además, la dosificación de este aditivo se encuentra en un rango de 2 - 8%, y la concentración de materia orgánica debe ser menor al 3% para cal, siendo más permisible que el de cemento Portland con una dosificación que oscila de 2% a 12% y con una concentración de materia orgánica menor a un valor de 1% (MTC, 2014).

Con el propósito de reducir los umbrales de una contaminación ambiental y fomentar la adopción de prácticas sostenibles que contribuyan al cuidado del entorno, también se usa los residuos de albañilería particulado (RAP) como agente estabilizador, compuesta generalmente de sílice y alúmina al igual que un suelo arcilloso.

La combinación de la cal (compuesta principalmente de óxido de calcio o hidróxido de calcio), residuos de albañilería particulado o ladrillo pulverizado (compuesta en gran proporción de óxido de silicio y de igual manera aluminio), suelo arcilloso (compuesta principalmente de sílice) y una cantidad de agua, se puede obtener una composición deseada tras un intercambio iónico y una reacción de floculación de carácter rápido, seguida de otra despaciosamente de naturaleza puzolánica, con la generación de nuevas sustancias o productos químicos;



consecuentemente una hidratación parecida a la hidratación del cemento (MTC, 2014).

Propuesta de Proporciones del Aditivo Estabilizador

De acuerdo al Manual de Carreteras (2014), las restricciones de cantidad de incorporación de cal esta dado entre el 2 a 8% de contenido en peso, por lo cual se dosifica una proporción constante de 4%. Por otro lado, para el agente estabilizador RAP se propone proporciones de 5; 10 y 15% en peso en combinación de la cal. Con el fin de obtener un buen comportamiento de este estabilizante se realiza estas variaciones consecutivas de incorporación y también se toma como guía, los antecedentes.

Con la intención de potencializar las propiedades físico – mecánicas respecto a la subrasante encontrada, se presenta una propuesta de proporciones con adiciones de estabilizante, para cada punto de investigación incidente conforme a la norma de Pavimentos Urbanos y tomadas a criterio del investigador. Según el Documento Técnico, Soluciones Básicas en Carreteras No Pavimentadas (2015), menciona que se debe emplear como mínimo 4 dosificaciones diferentes. Por lo consiguiente, las dosificaciones siguientes se realiza para la subrasante natural de las calicatas 1 y 2.

- MN: Suelo o Muestra natural
- MN + 4% Cal + 0% RAP: Modificado con cal.
- MN + 4% Cal + 5% RAP: Con cal y residuos de albañilería particulado
- MN + 4% Cal + 10% RAP: Con cal y residuos de albañilería particulado
- MN + 4% Cal + 15% RAP: Con cal y residuos de albañilería particulado

Con el fin de atenuar el índice de plasticidad de forma significativa se analiza las proporciones anteriores adicionando más porcentaje de contenido de cal, para la subrasante natural de C-1 y C-2., ambos perteneciendo al 2° estrado.

- MN: Suelo o Muestra natural
- MN + 8% Cal + 0% RAP: Modificado con cal.
- MN + 8% Cal + 5% RAP: Con cal y residuos de albañilería particulado
- MN + 8% Cal + 10% RAP: Con cal y residuos de albañilería particulado
- MN + 8% Cal + 15% RAP: Con cal y residuos de albañilería particulado

4.1.2. Resultados para el Índice de Plasticidad.

Límites de Atterberg

En la cuadro 24 se presenta y exponen los resultados de limite plástico, limite liquido e IP tanto en condición normal y/o natural como modificado (con cal y RAP) de acuerdo al incremento de aditivo RAP en múltiplos de cinco y con un valor constante de 4% de cal en todas variaciones (muestra patrón, una dosificación solo con cal, y tres dosificaciones con cal y RAP), todo ello analizadas y determinadas con las muestras de la calicata N°01, perteneciente al segundo estrato de la calicata de inspección.

Tabla 24

Resultados de plasticidad con 4% cal para C-1

DOSIFICACIONES	L.L (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	% RAP
Muestra Natural 1 (MN 1)	64.774	27.357	37.417	-----
MN 1 + 4% Cal + 0% RAP	61.217	26.797	34.420	0.000
MN 1 + 4% Cal + 5% RAP	57.148	25.861	31.287	5.000
MN 1 + 4% Cal + 10% RAP	52.358	24.868	27.490	10.000
MN 1 + 4% Cal + 15% RAP	48.389	23.981	24.407	15.000

Nota. Elaboración Propia

Tabla 25*Resultados de plasticidad con 4% cal para C-2*

DOSIFICACIONES	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	% RAP
Muestra Natural 2 (MN 2)	61.055	25.918	35.137	-----
MN 2 + 4% Cal + 0% RAP	57.584	25.115	32.496	0.000
MN 2 + 4% Cal + 5% RAP	52.616	24.469	28.147	5.000
MN 2 + 4% Cal + 10% RAP	47.731	23.899	23.832	10.000
MN 2 + 4% Cal + 15% RAP	43.026	23.381	19.645	15.000

Nota. Elaboración Propia

De la misma forma en el cuadro 25 se presenta los datos de los resultados de limite plástico, limite liquido e IP tanto en su situación normal o natural como modificado (con cal y RAP) de acuerdo al incremento progresivo de aditivo RAP en múltiplos de cinco y con un valor constante de 4% de cal en todas variaciones (muestra patrón, una dosificación solo incorporando cal, y tres dosificaciones con añadiduras de cal y RAP), todo ello analizadas y determinadas con las muestras de la calicata N°02, perteneciente al segundo estrato de la calicata de inspección.

Por otro lado, con el propósito de conseguir efectos eficientes y mejoras notables se realiza ensayos sobre IP; las evidencias se muestran en los próximos cuadros.

Tabla 26*Resultados de plasticidad con 8% cal para C-1*

DOSIFICACIONES	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	% RAP
Muestra Natural 1 (MN 1)	64.774	27.357	37.417	-----
MN 1 + 8% Cal + 0% RAP	53.137	23.847	29.290	0.000
MN 1 + 8% Cal + 5% RAP	47.558	22.287	25.271	5.000
MN 1 + 8% Cal + 10% RAP	42.261	21.357	20.904	10.000
MN 1 + 8% Cal + 15% RAP	36.513	20.368	16.146	15.000

Nota. Elaboración Propia

En la tabla 26 se evidencia los resultados de limite plástico, limite liquido e IP tanto en la condición natural (muestra patrón) como modificado

(incorporando cal y RAP) de acuerdo al aumento progresivo de aditivo RAP y con valor constante de 8% de cal en todas las variaciones, todo ello analizadas y determinadas con las muestras de la C-1, perteneciente al segundo estrato de la calicata de inspección.

Tabla 27

Resultados de plasticidad con 8% cal para C-2

DOSIFICACIONES	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	% RAP
Muestra Natural 2 (MN 2)	61.055	25.918	35.137	-----
MN 2 + 8% Cal + 0% RAP	47.950	22.437	25.513	0.000
MN 2 + 8% Cal + 5% RAP	42.858	21.391	21.467	5.000
MN 2 + 8% Cal + 10% RAP	38.120	20.501	17.619	10.000
MN 2 + 8% Cal + 15% RAP	32.534	19.838	12.696	15.000

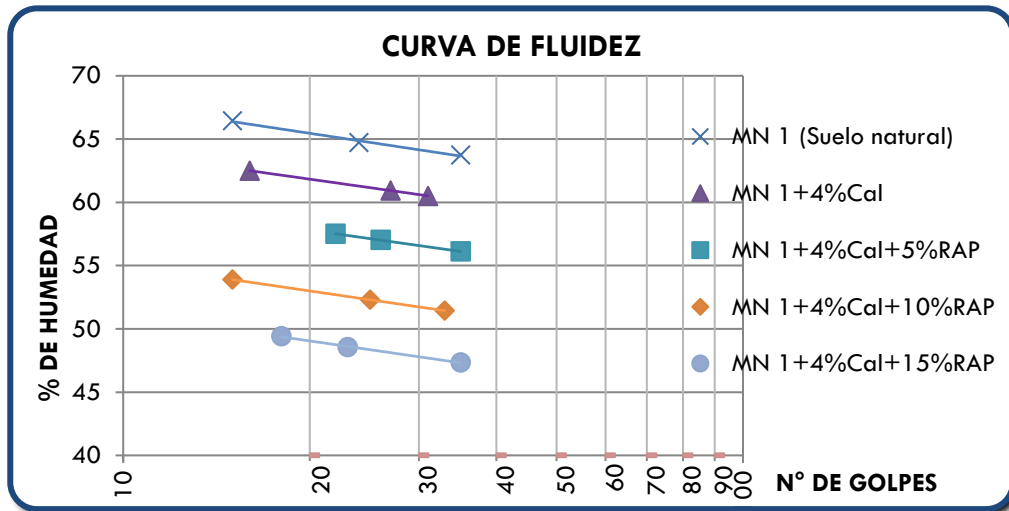
Nota. Elaboración Propia

De la misma forma, en el cuadro 27 se evidencia los resultados de limite plástico, limite liquido e IP tanto en la situación natural (muestra patrón) como modificado (con 8% de cal y con distintas fracciones porcentuales de RAP) de la calicata N°02, perteneciente al segundo estrato de la calicata de inspección.

Se manifiesta el LL para las distintas dosificaciones ensayadas, considerando un 4% de contenido de cal en peso de forma constante en todas las proporciones, y en combinación de aumentos progresivos de RAP en múltiplos de cinco (en un rango de 0% a 15%). En función a las muestras sin modificar de la calicata C – 1 (correspondiente al segundo estrato), en la figura 34 se detecta una reducción proporcional de las magnitudes de limite liquido de acuerdo al incremento progresivo del aditivo RAP. Consecuentemente la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP presenta un mayor desempeño y una mejora notable en relaciona al resto.

Figura 34

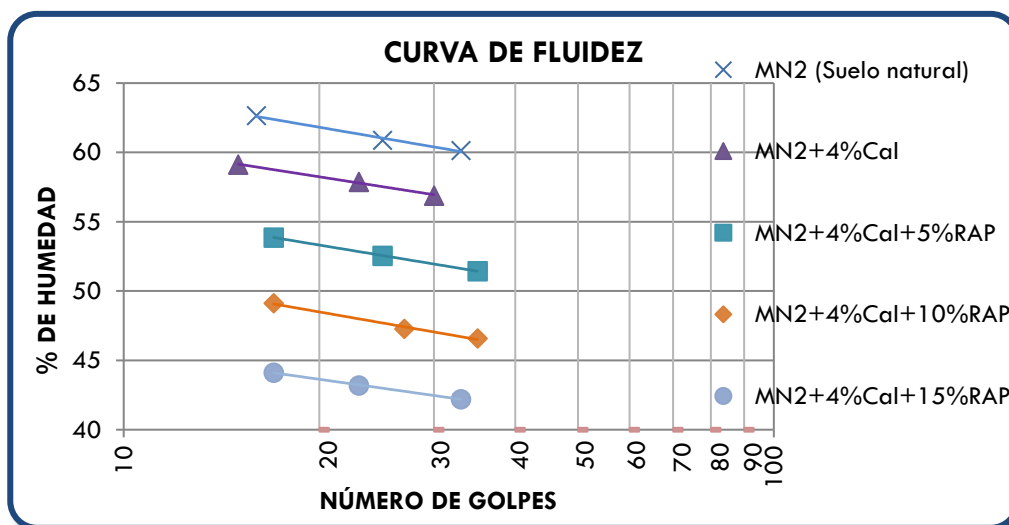
Familia de curva de fluidez para 4% de cal constante en C-1



Nota. Elaboración Propia

Figura 35

Familia de curva de fluidez para 4% de cal constante en C-2



Nota. Elaboración Propia

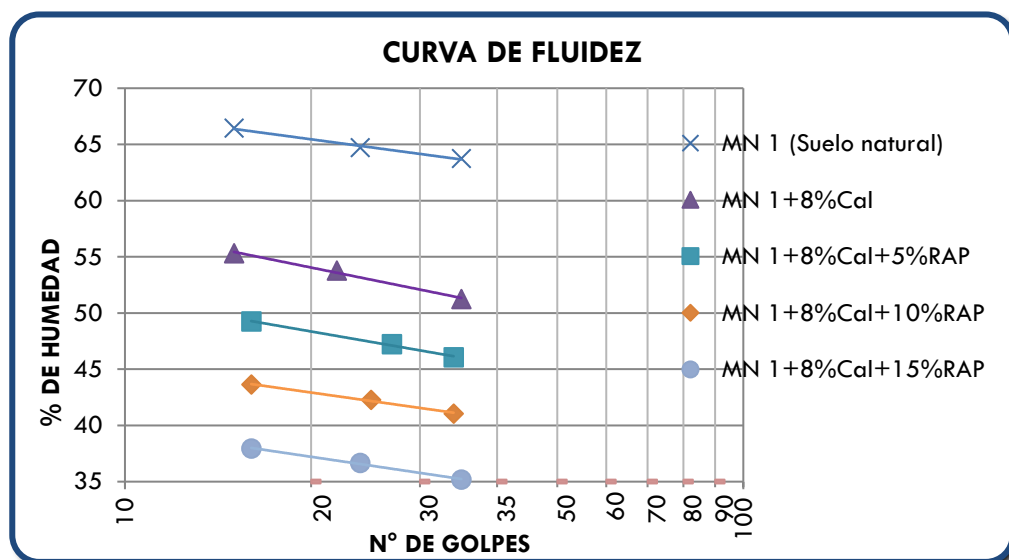
A la par, también se evidencia el LL para las distintas dosificaciones ensayadas, considerando un 4% de contenido de cal en peso de forma constante en todas las proporciones, y en combinación de aumentos progresivos de RAP en múltiplos de cinco (en un rango de 0% a 15%). En función a las muestras sin modificar de la calicata C – 2 (correspondiente al segundo estrato), en la figura 35

se detecta una reducción proporcional de las magnitudes de limite liquido de acuerdo al incremento progresivo del aditivo RAP. Consecuentemente la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP presenta un mayor desempeño y una mejora notable en relaciona al resto.

De la misma manera el LL para las distintas dosificaciones ensayadas, esta vez considerando un 8% de contenido de cal en peso de forma constante en todas las proporciones, y en combinación de aumentos progresivos de RAP en múltiplos de cinco (en un rango de 0% a 15%). En combinación a las muestras sin modificar de la calicata C – 1 y C – 2 (correspondiente al segundo estrato), en la figura 36 y 37 se nota una reducción proporcional de las magnitudes de limite liquido de acuerdo al incremento progresivo del aditivo RAP respectivamente. Consecuentemente la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP presenta un mayor desempeño para muestras de ambos puntos de investigación, siendo una mejora más notable en relación al incorporar un 4% de cal.

Figura 36

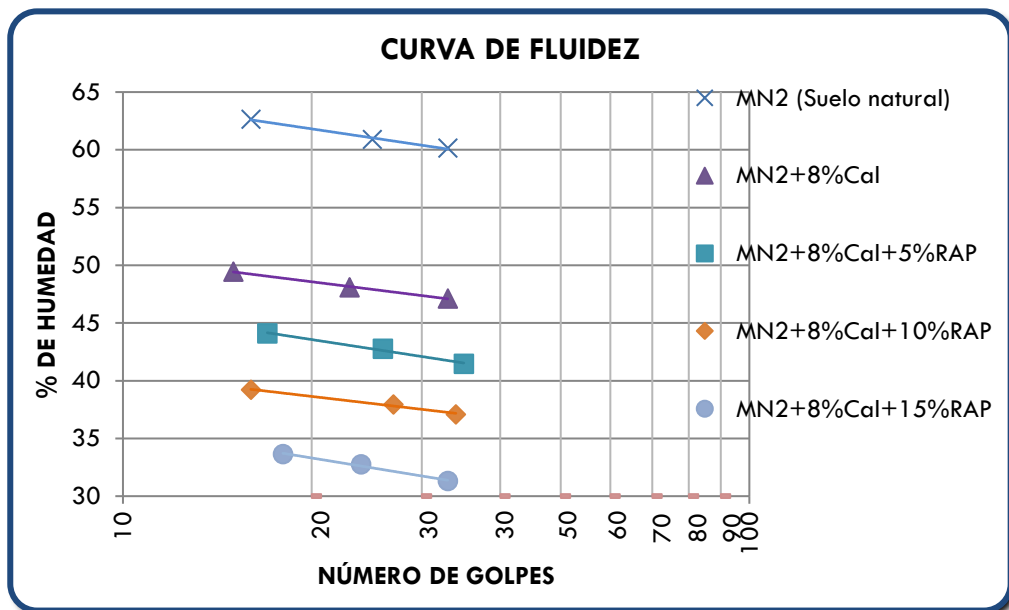
Familia de curva de fluidez para 8% de cal constante en C-1



Nota. Elaboración Propia

Figura 37

Familia de curva de fluidez para 8% de cal constante en C-2



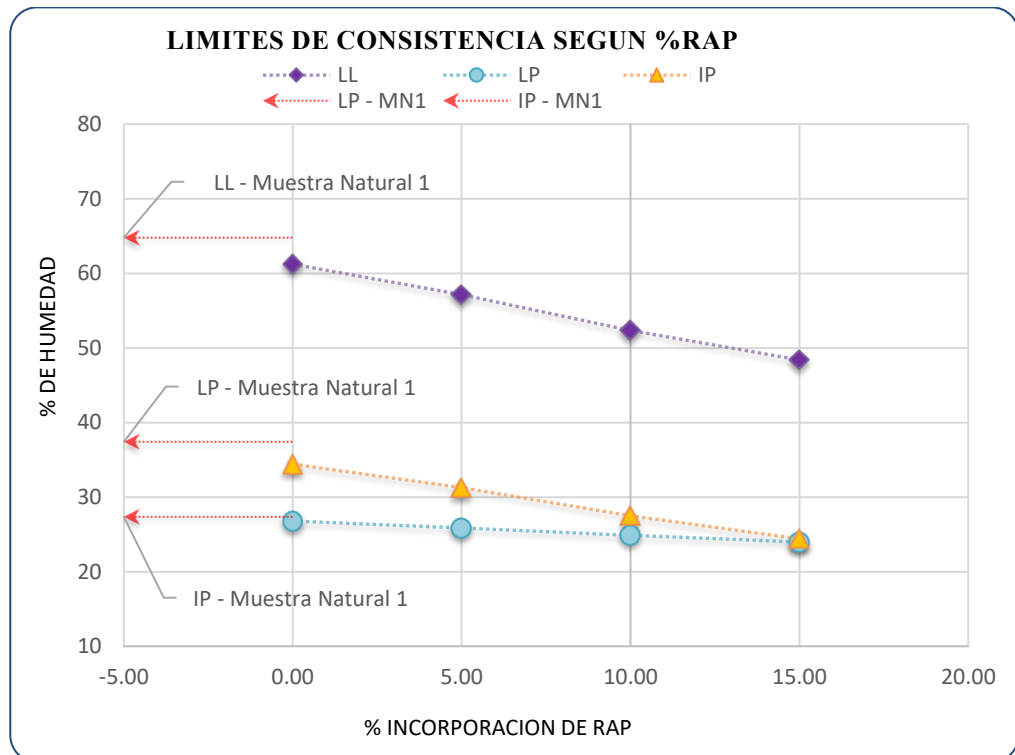
Nota. Elaboración Propia

Acto seguido, en los graficas 38 y 39 se representa la diversidad de los límites de consistencia (LL, LP e IP), evidencias obtenidas al combinar: un valor constante de 4% de cal en todas las variaciones, incrementos progresivos del aditivo RAP en múltiplos de cinco (rango de 0% a 15%) y muestras en condición natural tanto C – 1 como para C – 2 respectivamente (correspondiente al segundo estrato del muestro). En las ilustraciones, las rectas constantes son idealizados en relación a las muestras en la condición natural (MN).

Paralelamente, las rectas lineales con pendiente negativa representan los decrementos de LL, LP e IP acorde a los aumentos progresivos de RAP; en la que se puede apreciar la reducción de IP especialmente. De tal modo, se deduce que la dosificación de mayor incidencia a favor es MN + 4% Cal + 15% RAP, tras evidenciar los decrementos de plasticidad.

Figura 38

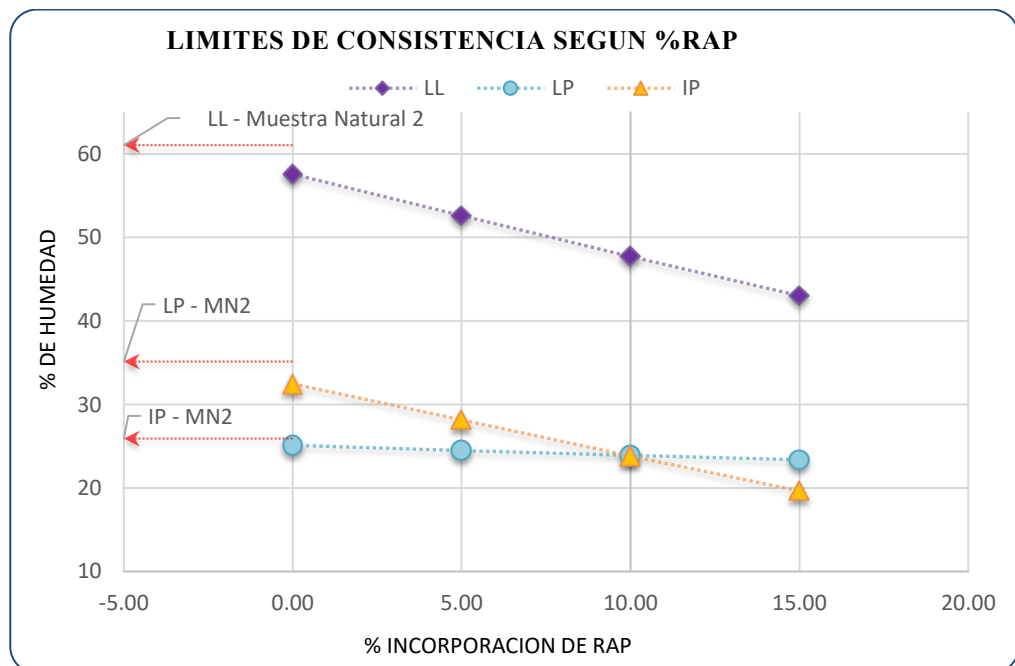
Compilado de plasticidad según el % RAP con 4% cal en C-1



Nota. Elaboración Propia

Figura 39

Compilado de plasticidad según el % RAP con 4% cal en C-2

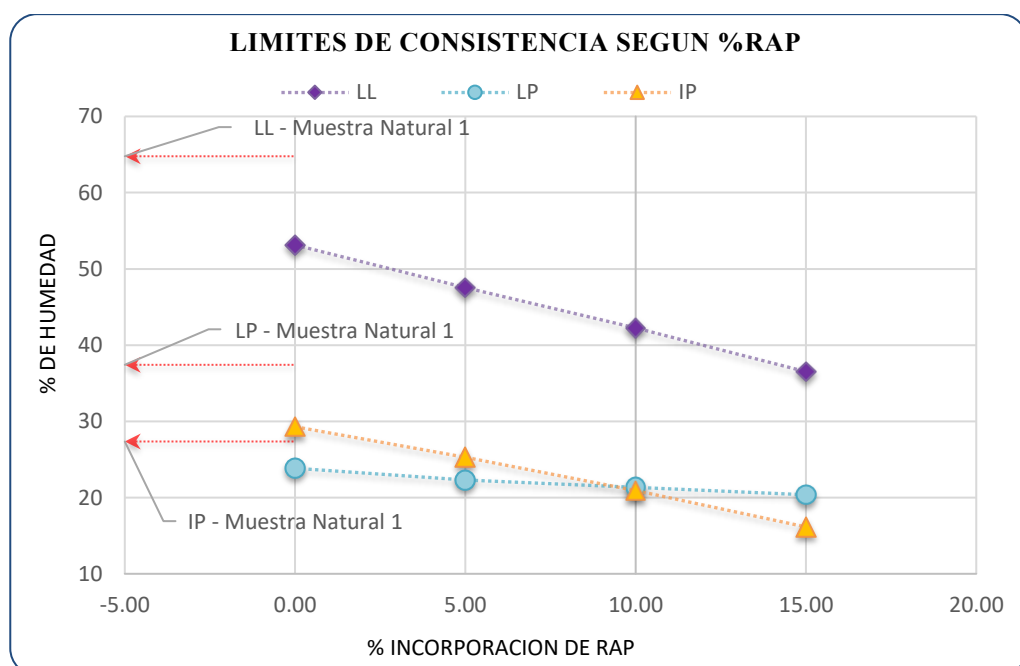


Nota. Elaboración Propia

En las figuras precedentes se muestran efectos de mejora utilizando 4% de contenido de cal, por lo que debido a la interpretación se pretende conocer los efectos al incrementar más % de contenido de cal. A continuación, en las graficas 40 y 41 se representa la fluctuación de límites de consistencia (LL, LP e IP), evidencias obtenidas al combinar: un valor constante de 8% de cal en todas las variaciones, incrementos progresivos del aditivo RAP en múltiplos de cinco (rango de 0% a 15%) y muestras en condición natural tanto C – 1 como para C – 2 respectivamente (correspondiente al segundo estrato del muestro). En las ilustraciones, las rectas constantes son idealizados en relación a las muestras en la condición natural (MN). Paralelamente, las rectas lineales con pendiente negativa representan los decrementos de LL, LP e IP acorde a los aumentos progresivos de RAP. De tal modo, se infiere que la dosificación de mayor incidencia a favor es MN + 8% Cal + 15% RAP, tras evidenciar los decrementos de IP.

Figura 40

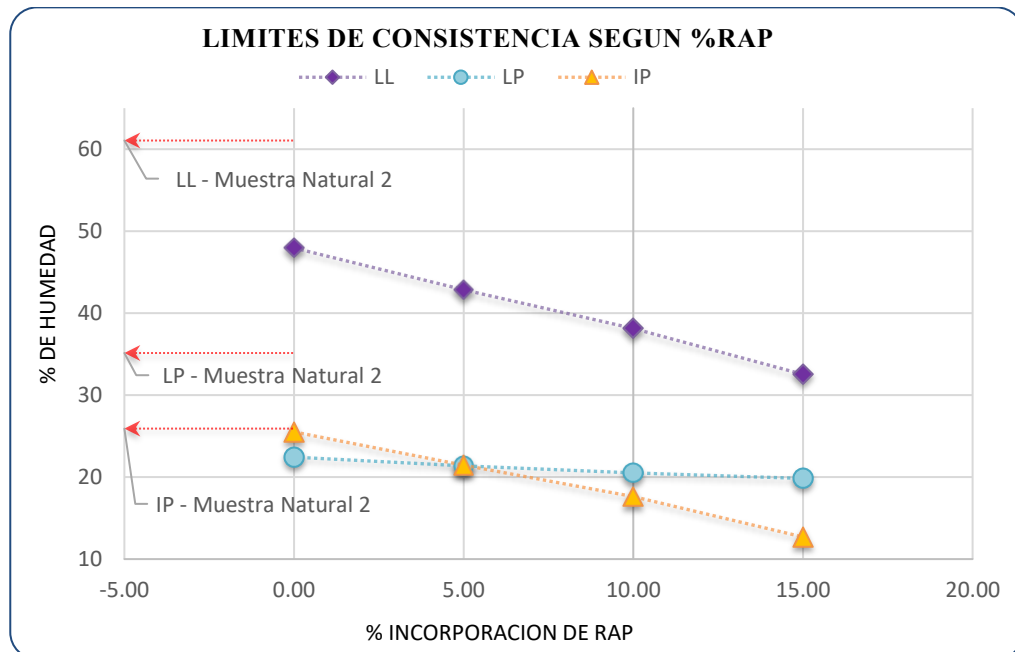
Compilado de plasticidad según el % RAP con 8% cal en C-1



Nota. Elaboración Propia

Figura 41

Compilado de plasticidad según el % RAP con 8% cal en C-2



Nota. Elaboración Propia

Índice de plasticidad

Tabla 28

Variación porcentual de IP con 4% constante de cal

DOSIFICACIONES	C - 1	C - 2	Promedio	Variación
	IP	IP		
Muestra Natural (MN)	37.417	35.137	36.277	
MN + 4% Cal + 0% RAP	34.420	32.469	33.445	-7.807%
MN + 4% Cal + 5% RAP	31.287	28.147	29.717	-18.083%
MN + 4% Cal + 10% RAP	27.490	23.832	25.661	-29.264%
MN + 4% Cal + 15% RAP	24.407	19.645	22.026	-39.284%

Nota. Elaboración Propia

Conforme al recuadro comparativo 28, se observa los valores hallados de IP tanto del punto de exploración C – 1 y C – 2 en los que se determina la variación porcentual en relación a los valores promedio de la muestra en condición natural del suelo (MN), teniendo para la dosificación de MN + 4% Cal + 0% RAP una

variación de -7.807%, para la dosificación MN + 4% Cal + 5% RAP una variación de -18.083%, para la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP una variación de -29.264% y finalmente para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP una variación de -39.284% todos ellos respecto al registro inicial de la muestra en situación natural. Estos valores de IP son con la añadidura de 4 % de estabilizante cal en forma constante para todas las proporciones de incidencia. La dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP nos evidencia un mejor desempeño y reducción notable de IP en relación al resto de dosificaciones

Según el recuadro 29, se refleja los valores cuantificados para IP tanto de la calicata C – 1 y C – 2 en los que se determina la dispersión porcentual respecto a los valores promedio de la muestra natural del suelo (MN), teniendo para la dosificación de MN + 8% Cal + 0% RAP una variación de -24.465%, para la dosificación MN + 8% Cal + 5% RAP una variación de -35.582%, para la dosificación MN + 8% Cal + 10% RAP una variación de -46.903% y finalmente para la dosificación MN + 8% Cal + 15% RAP una variación de -60.248% todos ellos respecto al registro inicial de la muestra natural. Estos valores de IP son con la incorporación de 8 % de estabilizante cal, donde se obtiene la dosificación de MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP en su mejor desempeño.

Tabla 29

Variación porcentual de IP con 8% constante de cal

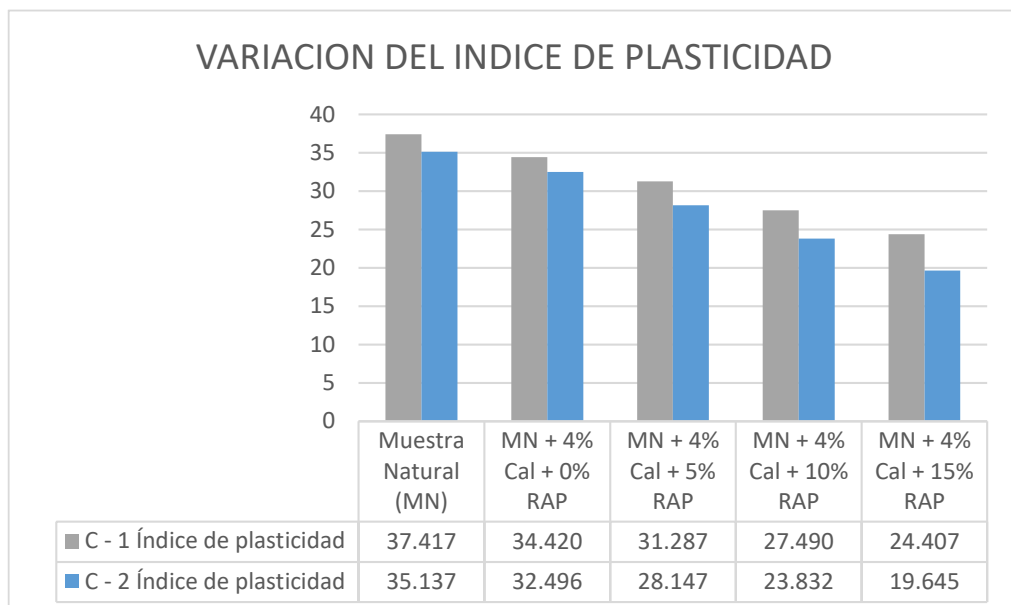
DOSIFICACIONES	C - 1	C - 2	Promedio	Variación
	IP	IP		
Muestra Natural (MN)	37.417	35.137	36.277	
MN + 8% Cal + 0% RAP	29.290	25.513	27.402	-24.465%
MN + 8% Cal + 5% RAP	25.271	21.467	23.369	-35.582%
MN + 8% Cal + 10% RAP	20.904	17.619	19.262	-46.903%
MN + 8% Cal + 15% RAP	16.146	12.696	14.421	-60.248%

Nota. Elaboración Propia

La ilustración 42, se constata que con la adición de 4% CAL y residuos de residuos de albañilería particulado (RAP) en diferentes dosificaciones, los valores del IP tanto de la calicata C – 1 y C – 2 (correspondiente a segundo estrato) reflejan una reducción proporcional de los valores conforme varían las dosificaciones, siendo las proporciones de MN + 4% Cal + 15% RAP quienes alcanzaron valores mínimos de 24.407% y 19.645% respectivamente; en relación a la muestra patrón con registros de 37.417% y 35.137% correlativamente. En concordancia al Manual de carreteras, Sección de Suelos y Pavimentos (2014) los IP que se caracterizan como plasticidad alta son valores mayores a 20% y como plasticidad media refieren a los valores menor o igual a 20% y mayor a 7%; por lo que el IP en su mejor desempeño de la subrasante en C-1 aún se caracteriza como plasticidad alta y el IP en su mejor desempeño de la subrasante en C-2 se caracteriza como plasticidad de rango medio.

Figura 42

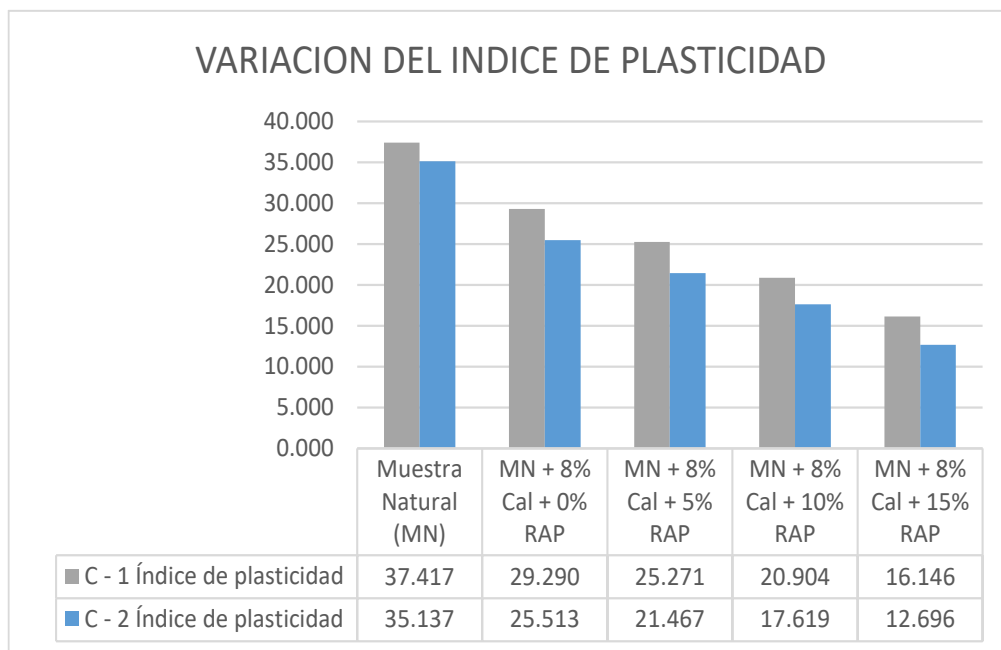
Diagrama de barras de la fluctuación de IP con 4% cal



Nota. Elaboración Propia

Figura 43

Diagrama de barras de la fluctuación de IP con 8% cal



Nota. Elaboración Propia

En la representación gráfica 43, se observa que con la adición de 8% CAL y residuos de residuos de albañilería particulado (RAP) en diferentes dosificaciones los valores del IP tanto de la calicata C – 1 y C – 2 reflejan una reducción proporcional de los valores conforme varían las dosificaciones, siendo las proporciones de MN + 8% Cal + 15% RAP quienes alcanzaron valores mínimos de 16.146 y 12.696 respectivamente, en relación a la muestra patrón con registros de 37.417% y 35.137% correlativamente. Considerando el Manual de carreteras, Sección de Suelos y Pavimentos (2014) los IP que se caracterizan como plasticidad alta son valores mayores a 20% y como plasticidad media a los valores menor o igual a 20% y mayor a 7%; por lo que el IP en su mejor desempeño de la subrasante en C-1 se caracteriza como plasticidad media y el IP en su mejor desempeño de la subrasante en C-2 también se caracteriza como plasticidad de rango medio. Por lo tanto, de este diagrama se puede inferir que la integración de

aditivos cal y RAP en procesos de estabilización no potencializa notablemente con las dosificaciones analizadas, para cumplir con IP bajo.

4.1.3. Resultados de la Máxima Densidad Seca.

Tabla 30

Valores de DMS y CHO para la calicata N°01

DOSIFICACIONES	DMS (g/cm ³)	CHO (%)
Muestra Natural 1 (MN 1)	1.629	20.200
MN 1 + 4% Cal + 0% RAP	1.641	19.700
MN 1 + 4% Cal + 5% RAP	1.657	19.050
MN 1 + 4% Cal + 10% RAP	1.666	18.750
MN 1 + 4% Cal + 15% RAP	1.673	18.450

Nota. Elaboración Propia

En el recuadro 30 se destacan los resultados de DMS y el CHO tanto en su condición natural como modificado (con cal y RAP) de acuerdo al incremento progresivo del aditivo RAP en múltiplos de cinco y con 4% de cal en forma constante en todas variaciones, todo ello analizadas y determinadas con las muestras de la C-1, correspondientes al segundo estrato de la inspección. En un principio la muestra patrón registra un CHO de 20.20% y una DMS de 1.629 g/cm³, por lo que seguidamente se ensaya determinando así los nuevos parámetros con las proporciones establecidos. Además, se deduce que la combinación de MN 1 + 4% Cal + 15% RAP presenta un CHO de 18.50 % y un DMS de 1.673 g/cm³, por lo que se produce un efecto decreciente y ascendente respectivamente, todo ello a partir de la muestra patrón hasta la dosificación más variada, al añadir cada vez más porcentaje de RAP.

De la misma manera, en el cuadro 31 se evidencia los resultados de DMS y el CHO tanto en su condición natural como modificado (con cal y RAP) de

acuerdo al incremento progresivo del aditivo RAP en múltiplos de cinco y con 4% de cal en forma constante en todas variaciones, todo ello analizadas y determinadas con las muestras de la C-2, perteneciente al segundo estrato de la exploración. La muestra patrón registra un CHO de 19.60% y una DMS de 1.640 g/cm³, por lo que seguidamente se ensaya determinando así los nuevos parámetros con las proporciones establecidos. Además, se deduce que la combinación de MN 2 + 4% Cal + 15% RAP presenta un CHO de 17.80 % y un DMS de 1.681 g/cm³, por lo que se produce un efecto decreciente y ascendente respectivamente, todo ello a partir de la muestra patrón hasta la dosificación más variada, al añadir cada vez más porcentaje de RAP.

Tabla 31

Valores de DMS y CHO para la calicata N°02

DOSIFICACIONES	DMS (g/cm ³)	CHO (%)
Muestra Natural 2 (MN 2)	1.640	19.600%
MN 2 + 4% Cal + 0% RAP	1.648	19.200%
MN 2 + 4% Cal + 5% RAP	1.664	18.800%
MN 2 + 4% Cal + 10% RAP	1.670	18.200%
MN 2 + 4% Cal + 15% RAP	1.681	17.800%

Nota. Elaboración Propia

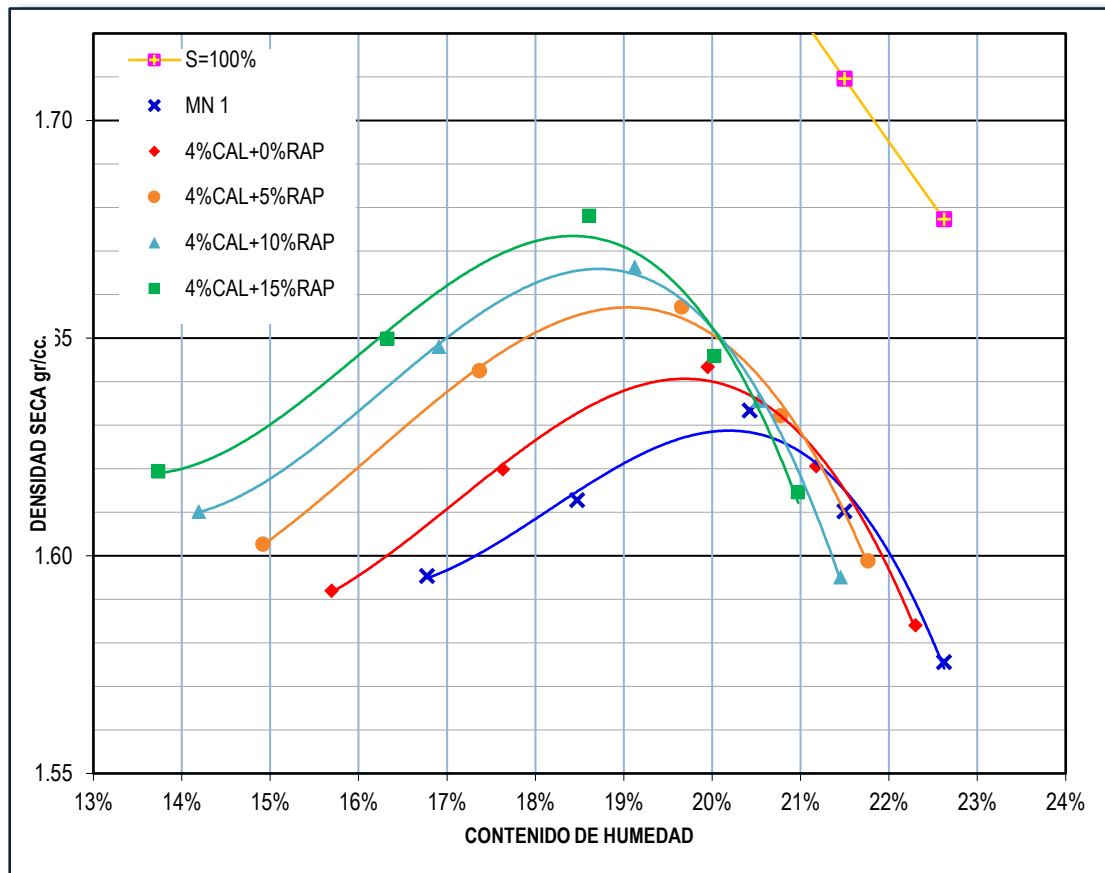
Familia de curvas de compactación

En el gráfico 44 se representa las curvas de compactación tanto en su estado natural como modificado (con cal y RAP); es decir, a nivel de muestra natural y las dosificaciones de MN + 4% Cal + 0% RAP, MN + 4% Cal + 5% RAP, MN + 4% Cal + 10% RAP y finalmente para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP, en relación a la calicata de exploración C-1, correspondiente al segundo estrato. Se considera la curva de saturación para muestra natural, en

función de la gravedad específica de las partículas sólidas (con abreviatura Gs y con valor de 2.703). En esta representación, se refleja el punto máximo correspondiente al DMS para la composición MN + 4% Cal + 15% RAP y a la vez una notable disminución de CHO.

Figura 44

Familia de curvas de compactación para muestras de C-1



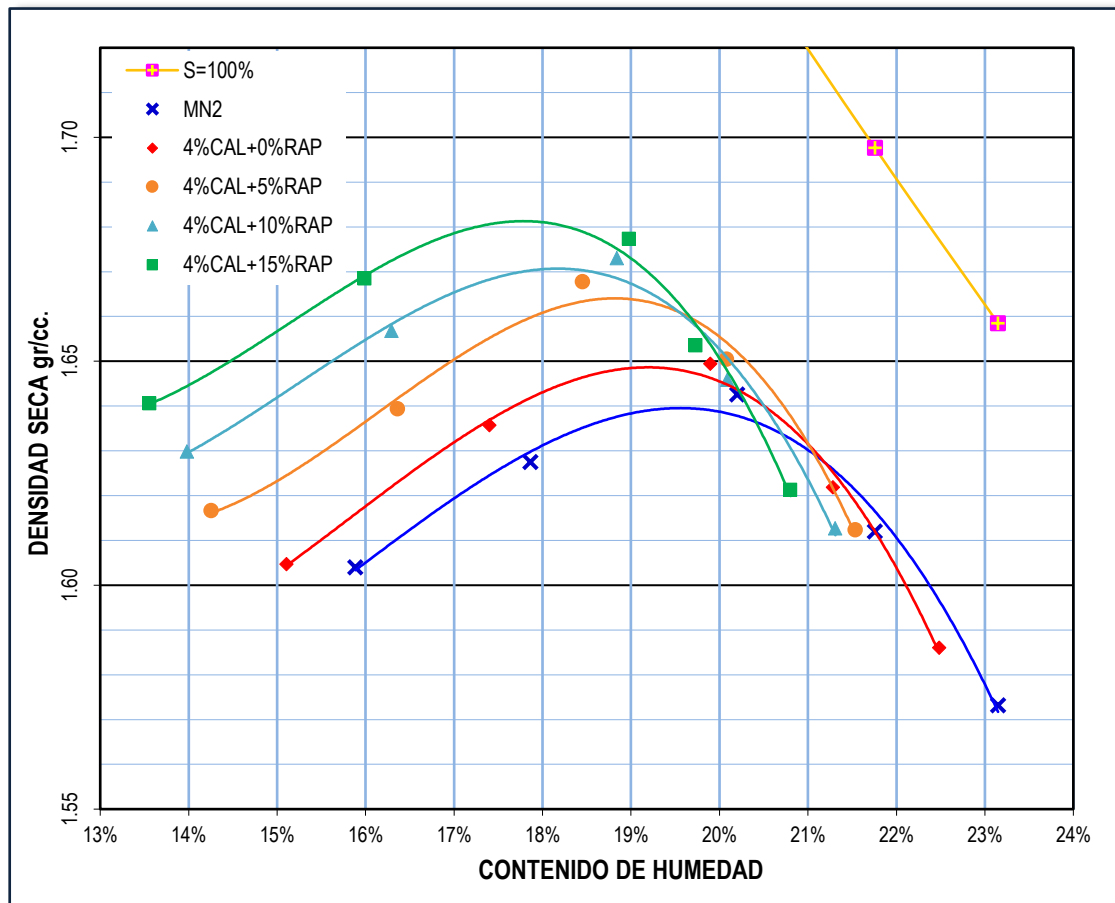
Nota. Elaboración Propia

En el gráfico 45 se representa las curvas de compactación tanto en su estado natural como modificado (con cal y RAP); es decir, a nivel de muestra natural y las dosificaciones de MN + 4% Cal + 0% RAP, MN + 4% Cal + 5% RAP, MN + 4% Cal + 10% RAP y finalmente para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP, en relación a la calicata de exploración C-2, correspondiente al segundo estrato. Se considera la curva de saturación para muestra natural, en

función de la gravedad específica de las partículas sólidas (con abreviatura Gs y con valor de 2.692). En esta representación, se refleja el punto máximo correspondiente al DMS para la composición MN + 4% Cal + 15% RAP y a la vez una notable disminución de CHO.

Figura 45

Familia de curvas de compactación para muestras de C-2



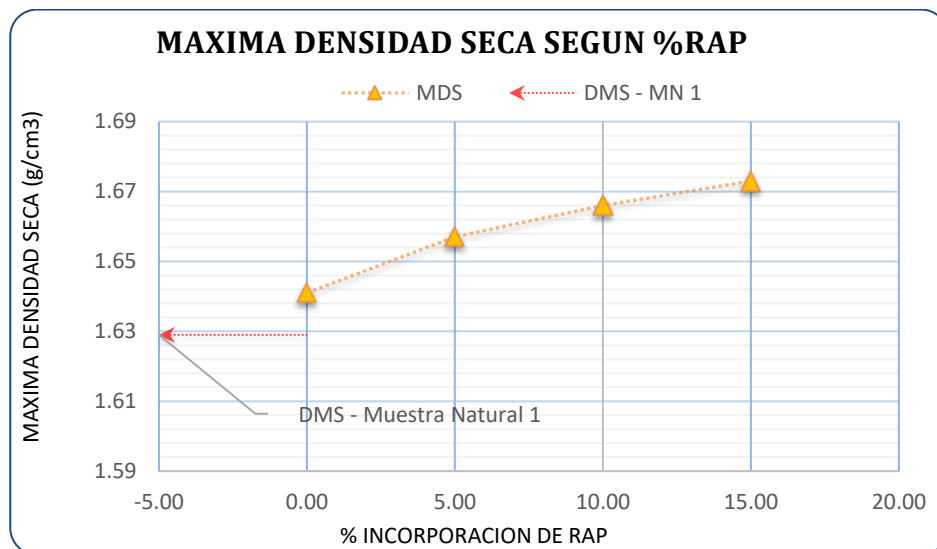
Nota. Elaboración Propia

A continuación, en las ilustraciones 46 y 47, se representa la incidencia de DMS y CHO de acuerdo al incremento progresivo de residuos de albañilería particulado como estabilizante (en múltiplos de cinco, es decir de 0% a 15% RAP) y con un 4% de cal en forma constante tanto para la calicata C – 1 respectivamente, perteneciente al segundo estrato. También se evidencia una recta constante que

representa a la muestra patrón. Consecuentemente se observa acrecentamiento de DMS en relación a la MN, obteniéndose un mejor comportamiento y desempeño con la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP y correlativamente aminoramiento de CHO propiamente dicho.

Figura 46

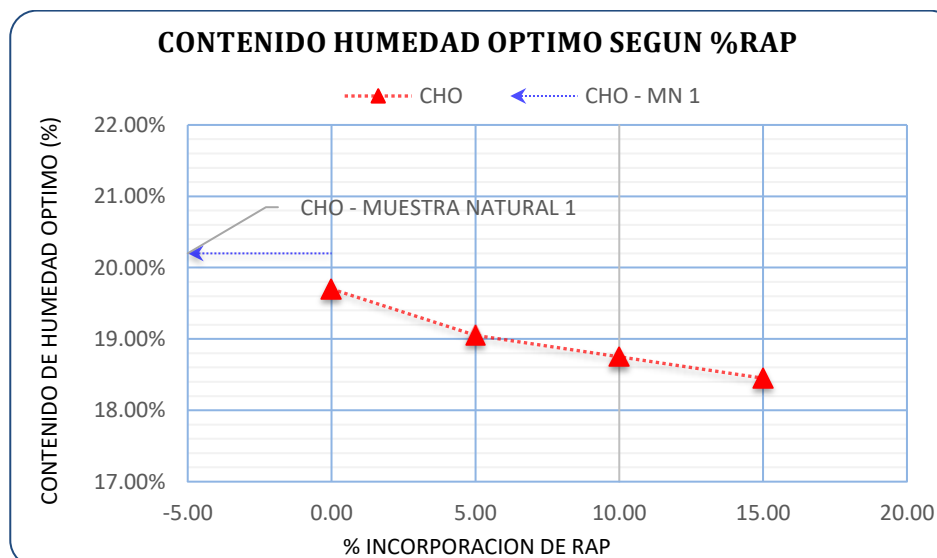
Incidencia de la DMS según el % RAP en C-1



Nota. Elaboración Propia

Figura 47

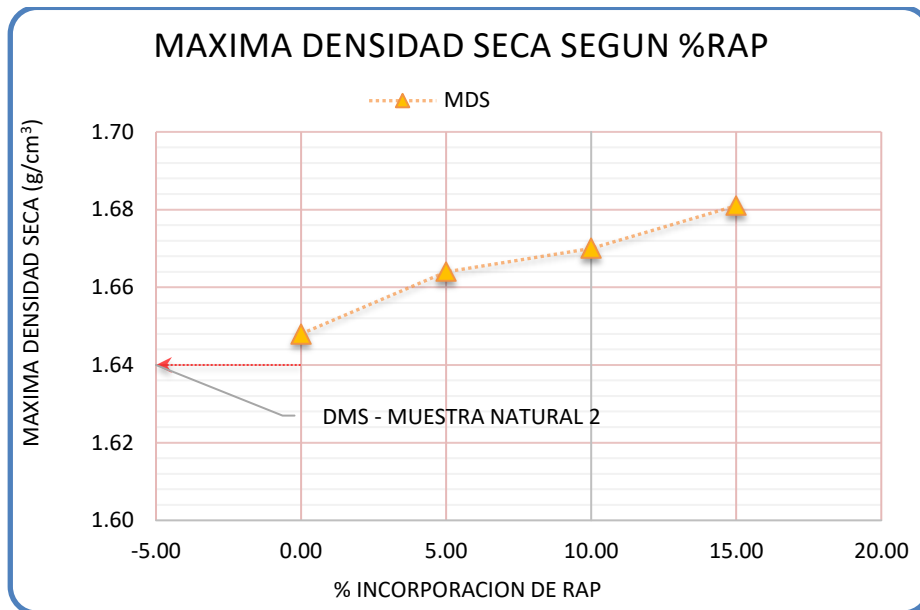
Incidencia del CHO según el % RAP en C-1



Nota. Elaboración Propia

Figura 48

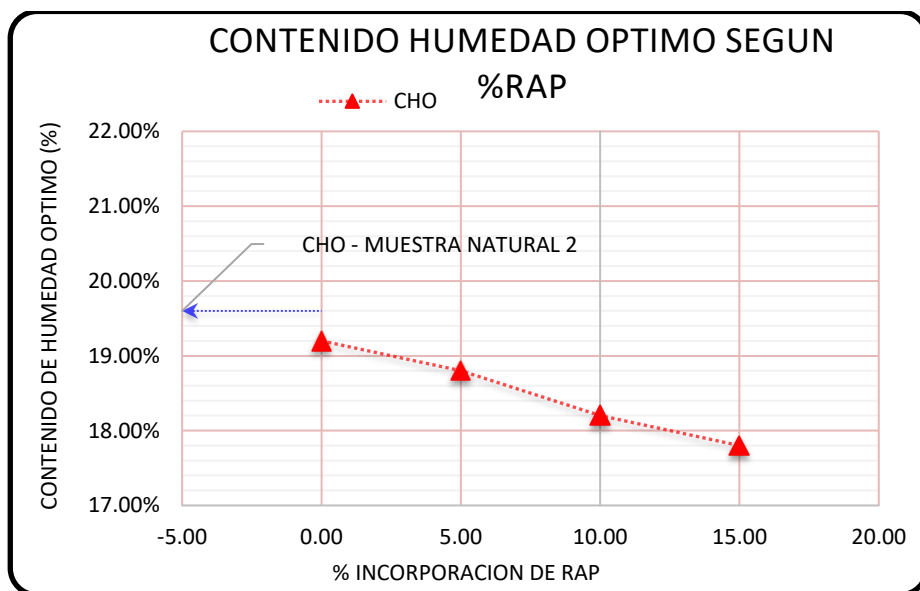
Incidencia de la DMS según el % RAP en C-2



Nota. Elaboración Propia

Figura 49

Incidencia del CHO según el % RAP en C-2



Nota. Elaboración Propia

De la misma manera, en las ilustraciones 48 y 49, se representa la incidencia de DMS y CHO de acuerdo al incremento progresivo de residuos de albañilería particulado como estabilizante (en múltiplos de cinco, es decir de 0%

a 15% RAP) y con un 4% de cal en forma constante tanto para la calicata C – 2, perteneciente al segundo estrato de la exploración. También se evidencia una recta constante que representa a la muestra patrón. Consecuentemente se observa acrecentamiento de DMS en relación a la MN, obteniéndose un mejor comportamiento y desempeño con la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP y correlativamente aminoramiento de CHO propiamente dicho.

Consecuentemente, en el cuadro 32 se resalta la variación porcentual ascendente de la DMS según al incremento progresivo de residuos de albañilería particulado como estabilizante y con un 4% de cal en forma constante, determinándose valores promedio entre dosificaciones, concernientes a C – 1 y C – 2 (correspondiente al segundo estrato). Se constata un valor medio de 1.635 g/cm³ referente a la muestra patrón MN y de 1.677 g/cm³ referente a MN + 4% Cal + 15% RAP, siendo la más densificada. En contraste, en el cuadro 33 se constata la variación porcentual descendente del CHO acorde al aumento progresivo de RAP con 4% de cal. Se puede corroborar respecto a este último indicador, un promedio de 19.90% para MN y 18.125% en su mayor desempeño.

Tabla 32

Variación porcentual de la DMS

DOSIFICACIONES	C - 1	C - 2	Promedio	Variación
	DMS (g/cm ³)	DMS (g/cm ³)		
Muestra Natural (MN)	1.629	1.640	1.635	
MN + 4% Cal + 0% RAP	1.641	1.648	1.645	0.612%
MN + 4% Cal + 5% RAP	1.657	1.664	1.661	1.590%
MN + 4% Cal + 10% RAP	1.666	1.670	1.668	2.018%
MN + 4% Cal + 15% RAP	1.673	1.681	1.677	2.569%

Nota. Elaboración Propia

En consonancia a la tabla 32, se observa los resultados alcanzados para DMS tanto concerniente a la calicata C – 1 y calicata C – 2 (respecto al segundo estrato para ambas calicatas de inspección) en los que se determinó la variación porcentual respecto a los valores promedio de la muestra natural del suelo (MN), teniendo para la dosificación de MN + 4% Cal + 0% RAP una variación de 0.612%, para la dosificación MN + 4% Cal + 5% RAP una variación de 1.590%, para la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP una variación de 2.018% y finalmente para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP una variación de 2.569% todos ellos respecto al valor inicial de la muestra natural. Esta última proporción es más densificada con respecto al resto, con un valor promedio de 1.677 g/cm³, y además es la que mejor se desempeña en relación al IP.

Tabla 33

Variación porcentual del CHO

DOSIFICACIONES	C - 1	C - 2	Promedio (%)	Variación (%)
	CHO (%)	CHO (%)		
Muestra Natural (MN)	20.200	19.600	19.900	
MN + 4% Cal + 0% RAP	19.700	19.200	19.450	-2.261%
MN + 4% Cal + 5% RAP	19.050	18.800	18.925	-4.899%
MN + 4% Cal + 10% RAP	18.750	18.200	18.475	-7.161%
MN + 4% Cal + 15% RAP	18.450	17.800	18.125	-8.920%

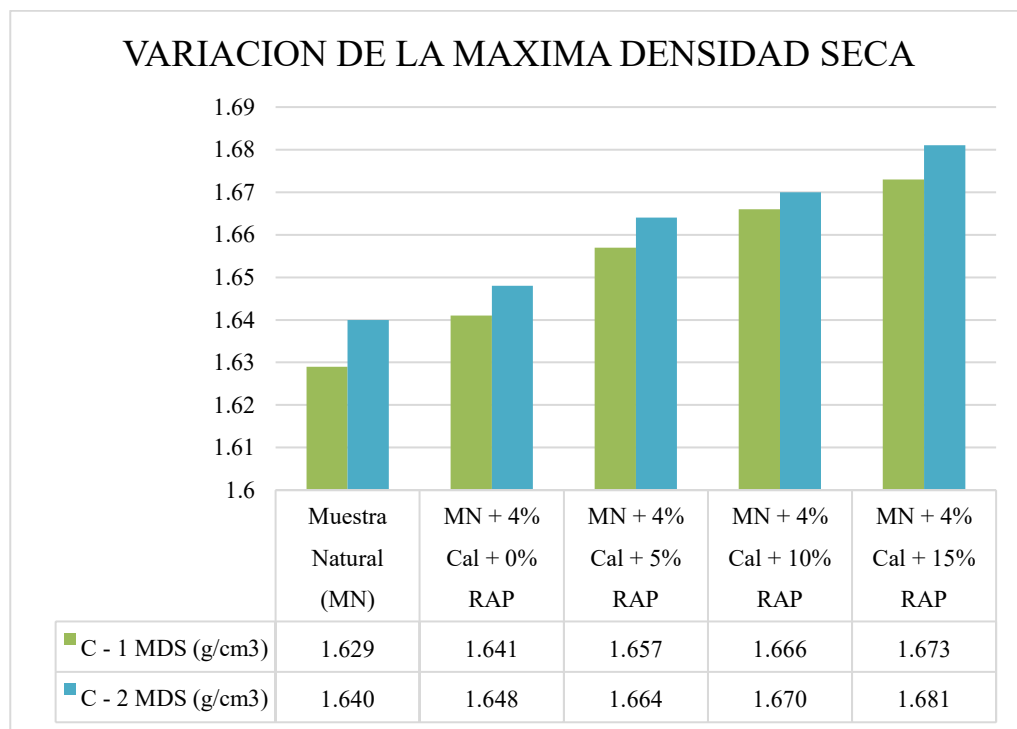
Nota. Elaboración Propia

Del mismo modo, en consonancia a la tabla 33, se observa los resultados alcanzados para CHO tanto concerniente a la calicata C – 1 y calicata C – 2 (respecto al segundo estrato para ambas calicatas de inspección) en los que se determinó la variación porcentual negativa respecto a los valores promedio de la muestra natural del suelo (MN), teniendo para la dosificación de MN + 4% Cal + 0% RAP una variación de -2.261%, para la dosificación MN + 4% Cal + 5% RAP una variación de -4.899%, para la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP una

variación de -7.161% y finalmente para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP una variación de -8.920% todos ellos respecto al valor inicial de la muestra natural. Esta última proporción es la que más desciende con respecto al resto de dosificaciones, con una valoración promedio de 17.80%, por lo que se aprecia los decrementos de CHO a medida se adiciona gradualmente el aditivo RAP y además es la que mejor se desempeña en relación al IP.

Figura 50

Diagrama de barras variación máxima densidad seca



Nota. Elaboración Propia

En la figura 50, se establece que con la adición constante de cal (4%) y residuos de residuos de albañilería particulado (de manera gradual) en distintas dosificaciones los valores de DMS tanto concerniente a la calicata C – 1 y C – 2 (segundo estrato) reflejan un aumento proporcional de los valores conforme varían las dosificaciones (el porcentaje de estabilizante RAP se aplica de 0% a 15%), siendo las proporciones con denominación reducida de MN + 4% Cal + 15% RAP

y de mayor relevancia, quienes alcanzaron valores máximos de 1.673 y 1.681 gr/cm³ respectivamente.

4.1.4. Resultados para la Capacidad de Soporte CBR.

En el cuadro 34 se señala los resultados experimentales de CBR concerniente al 100% y 95% de DMS para muestras patrón (condición natural) y modificado con residuos de albañilería particulado como estabilizante y con un 4% de cal en forma constante, referente a la calicata de inspección C – 1 (correspondiente a muestras del segundo estrato). También se puede constatar la mejora y potencialización de este indicador conforme a los incrementos graduales de RAP (en un rango de 0-15%)

Tabla 34

Compilado de CBR al 95% y 100% DMS en C-1

DOSIFICACIONES	CBR al 100% DMS (%)	CBR al 95% DMS (%)	% RAP
Muestra Natural 1 (MN 1)	3.210%	2.490%	-----
MN 1 + 4% Cal + 0% RAP	5.080%	4.000%	0
MN 1 + 4% Cal + 5% RAP	6.550%	5.200%	5
MN 1 + 4% Cal + 10% RAP	8.250%	6.570%	10
MN 1 + 4% Cal + 15% RAP	10.050%	8.100%	15

Nota. Elaboración Propia

Tabla 35

Compilado de CBR al 95% y 100% DMS en C-2

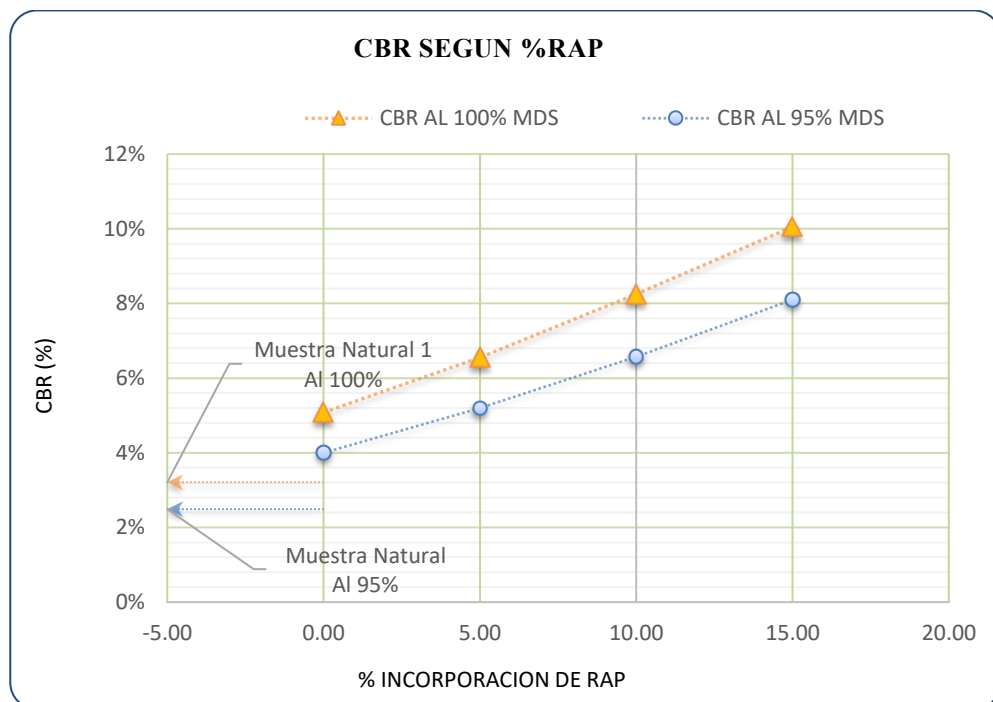
DOSIFICACIONES	CBR al 100% DMS (%)	CBR al 95% DMS (%)	% RAP
Muestra Natural 2 (MN 2)	3.520%	2.710%	-----
MN 2 + 4% Cal + 0% RAP	5.460%	4.100%	0
MN 2 + 4% Cal + 5% RAP	7.080%	5.550%	5
MN 2 + 4% Cal + 10% RAP	8.730%	7.000%	10
MN 2 + 4% Cal + 15% RAP	10.540%	8.600%	15

Nota. Elaboración Propia

En el cuadro 35 se señala los resultados experimentales de CBR concerniente al 100% y 95% de DMS para muestras patrón (condición natural) y modificado con residuos de albañilería particulado como estabilizante y con un 4% de cal en forma constante, referente a la calicata de inspección C – 2 (correspondiente a muestras del segundo estrato). También se puede constatar la mejora y potencialización de este indicador conforme a los incrementos graduales de RAP (en un rango de 0-15%).

Figura 51

Incidencia del CBR según el % RAP en C-1



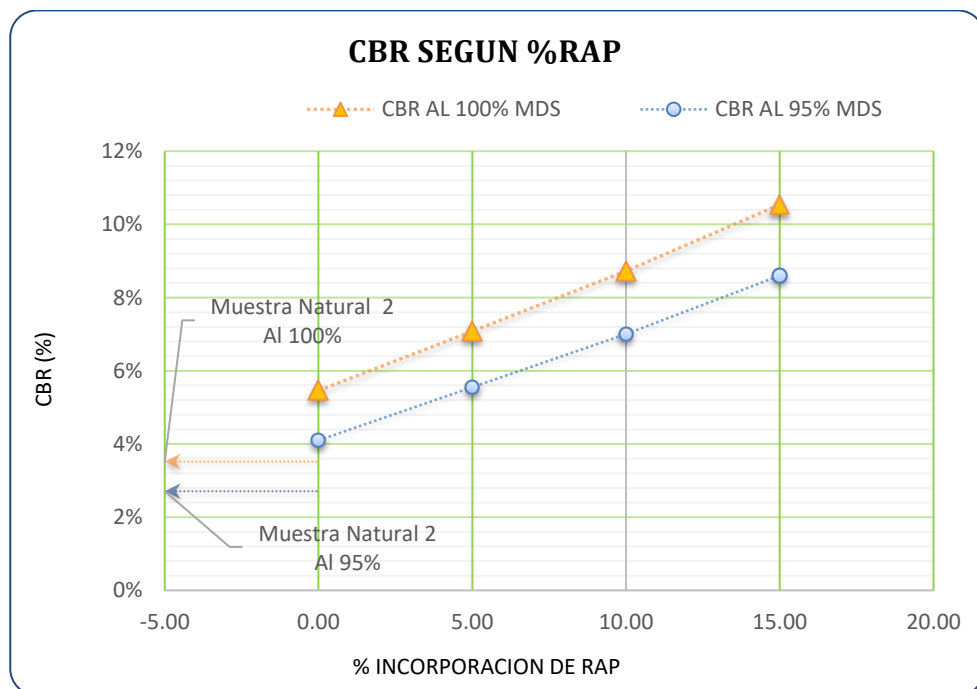
Nota. Elaboración Propia

En la representación gráfica 51 se resalta la incidencia del CBR concernientes al 95% y 100% de DMS conforme al incremento gradual de residuos de albañilería particulado como estabilizante y con un 4% de cal en forma constante, referente a la calicata C – 1 (relativo al segundo estrato). Consecuentemente se manifiesta un incremento significativo de CBR con respecto

a la muestra en estado natural, obteniéndose un mejor comportamiento y desempeño con la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP, donde se logra alcanzar 8.100% y 10.050% correlativamente. Se puede inferir que a partir de la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP en adelante cumplen con las exigencias mínimas de categorización de subrasante, identificándose como regular, incluso se detecta que MN + 4% Cal + 15% RAP logra alcanzar un CBR buena concerniente al 100% de DMS (MTC, 2014).

Figura 52

Incidencia del CBR según el % RAP en C-2



Nota. Elaboración Propia

En la representación gráfica 52 se constata la incidencia del CBR concernientes al 95% y 100% de DMS conforme al aumento gradual de residuos de albañilería particulado como estabilizante y con un 4% de cal en forma constante, referente a la calicata C – 1 (relativo al segundo estrato). Consecuentemente se registra un incremento significativo de CBR con respecto a

la muestra en estado natural, obteniéndose un mejor comportamiento y desempeño con la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP, donde se logra alcanzar 8.600% y 10.540% correlativamente. Se puede inferir que a partir de la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP en adelante cumplen con las exigencias mínimas de categorización de subrasante, identificándose como regular, incluso se detecta que MN + 4% Cal + 15% RAP logra alcanzar un CBR buena concerniente al 100% de DMS (MTC, 2014).

Como efecto en las tablas 36 y 37 se evidencia la variación porcentual de CBR de acuerdo al incremento gradual de % RAP (valoración 0-15%) con 4% cal de manera constante, tomando valores promedio entre datos concernientes a C – 1 y C – 2.

Tabla 36

Variación porcentual del CBR al 95% DMS

DOSIFICACIONES	C – 1	C - 2	Promedio	Variación
	CBR al 95% DMS	CBR al 95% DMS		
Muestra Natural (MN)	2.490	2.710	2.600%	
MN + 4% Cal + 0% RAP	4.000	4.100	4.050%	55.769%
MN + 4% Cal + 5% RAP	5.200	5.550	5.375%	106.731%
MN + 4% Cal + 10% RAP	6.570	7.000	6.785%	160.962%
MN + 4% Cal + 15% RAP	8.100	8.600	8.350%	221.154%

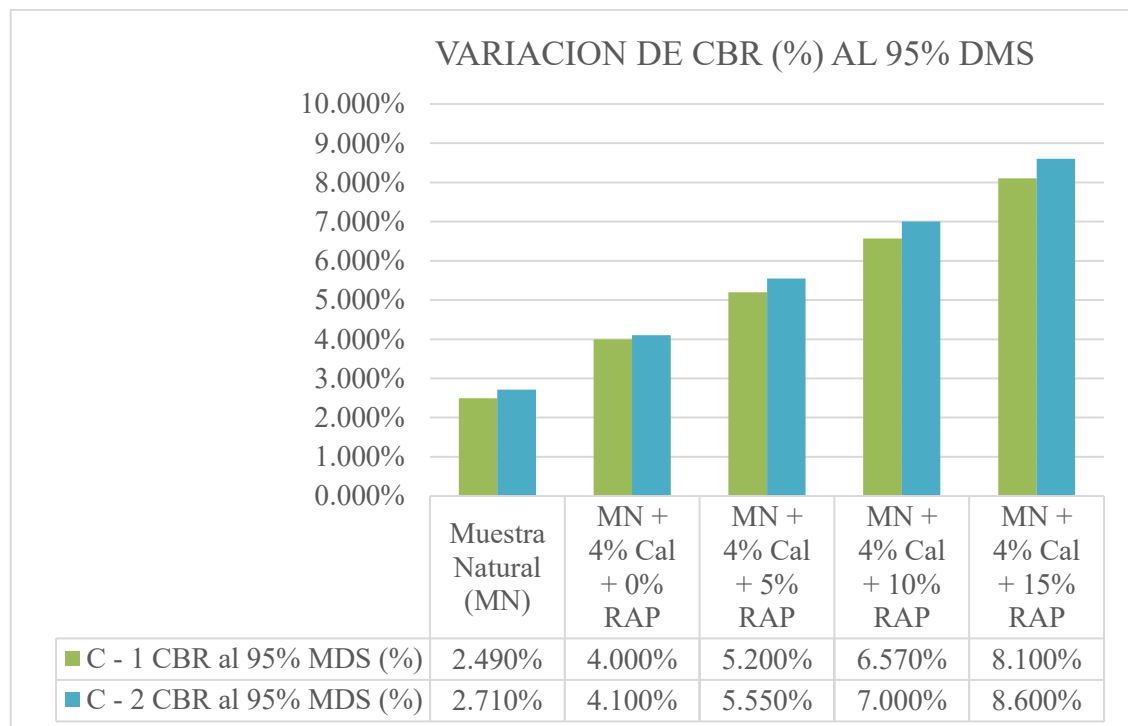
Nota. Elaboración Propia

Conforme señala el cuadro 36, se evidencia los valores hallados para CBR de las dosificaciones al 95% de DMS tanto en lo que concierne a la calicata de inspección C – 1 y C – 2 (correspondiente) en los que se cuantificó la variación porcentual respecto a los valores promedio de la muestra natural del suelo (MN), teniendo para la dosificación de MN + 4% Cal + 0% RAP una variación de

55.769%, para la dosificación MN + 4% Cal + 5% RAP una variación de 106.731%, para la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP una variación de 160.962% y finalmente para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP una variación de 221.154% todos ellos respecto al valor inicial de la muestra natural. Conforme al Manual de carretera: Sección de Suelos y Pavimentos (2014), los resultados experimentales de CBR concerniente al 100% de DMS para las composiciones MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP (cobra mayor desempeño) cumplen los requerimientos mínimos de caracterización de subrasante, categorizándose como una subrasante regular en un rango de mayor o igual al 6% e inferior al 10% de CBR. La norma de Pavimentos Urbanos (2010) especifica la compactación de la subrasante al 95 % de DMS.

Figura 53

Diagrama de barras de la variación de CBR al 95% DMS



Nota. Elaboración Propia

La figura 53, establece que con la adición de cal de manera constante (4%) y con incrementos graduales de residuos de albañilería particulado (RAP de 0-15%) en diferentes dosificaciones los valores de la capacidad de soporte en concordancia a la calicata C – 1 y C – 2 (relativo al segundo estrato) reflejan un aumento proporcional de los valores conforme varían las dosificaciones, siendo las proporciones con denominación reducida MN + 4% Cal + 15% RAP quienes alcanzaron valores máximos de 8.100% y 8.600% del CBR concerniente al 95 % DMS respectivamente. Citando al Manual de Carreteras (2014) estos resultados experimentales de CBR concerniente al 95% de compactación cumplen con las exigencias mínimas de caracterización de subrasante, categorizándose como una subrasante regular en un rango de mayor o igual al 6% y menor al 10% de CBR.

Tabla 37

Variación porcentual del CBR al 100% DMS

DOSIFICACIONES	C – 1	C - 2	Promedio	Variación
	CBR al 100% DMS	CBR al 100% DMS		
Muestra Natural (MN)	3.210	3.520	3.365%	
MN + 4% Cal + 0% RAP	5.080	5.460	5.270%	102.692%
MN + 4% Cal + 5% RAP	6.550	7.080	6.815%	162.115%
MN + 4% Cal + 10% RAP	8.250	8.730	8.490%	226.538%
MN + 4% Cal + 15% RAP	10.050	10.540	10.295%	295.962%

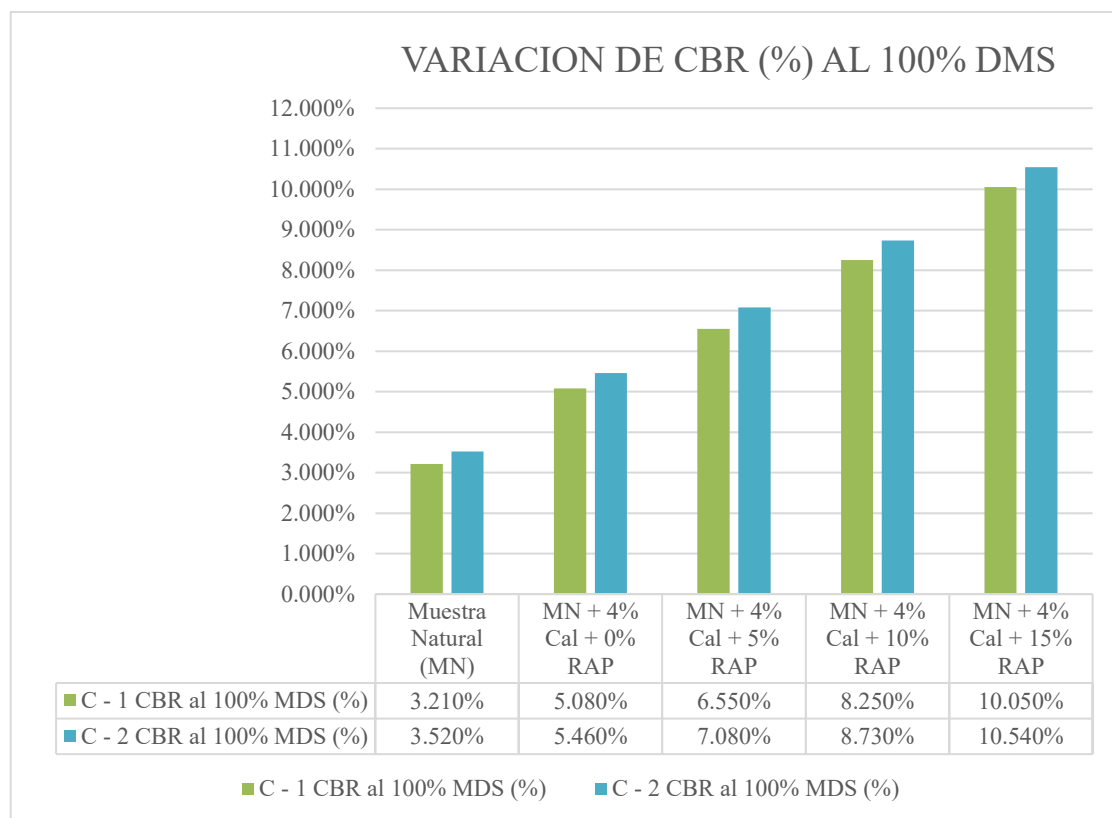
Nota. Elaboración Propia

Conforme señala el cuadro 37, los valores hallados para la capacidad de soporte concerniente al 100% de DMS en concordancia a la calicata C – 1 y C – 2 (relativo al segundo estrato) en los que se cuantificó la variación porcentual respecto a los valores promedio de la muestra natural del suelo (MN), teniendo

para la dosificación de MN + 4% Cal + 0% RAP una variación de 102.692%, para la dosificación MN + 4% Cal + 5% RAP una variación de 162.115%, para la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP una variación de 226.538% y por último para la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP una variación de 295.962% todos ellos en relación al valor inicial de la muestra patrón. Conforme al Manual de carretera: Sección de Suelos y Pavimentos (2014) estos resultados de CBR concierne al 100% de DMS cumplen los requerimientos mínimos de caracterización de subrasante, categorizándose la proporción MN + 4% Cal + 10% RAP como una subrasante regular en un rango de mayor o igual al 6% y menor al 10% de CBR y a proporción MN + 4% Cal + 15% RAP como una subrasante buena en un rango superior o igual al 10% e inferior al 20% de CBR.

Figura 54

Diagrama de barras de la variación de CBR al 100% DMS



Nota. Elaboración Propia

En la figura 54, se visualiza que, con la adición de cal (un valor constante de 4%) e incrementos graduales de residuos de albañilería particulado (RAP de 0% a 15%) en diferentes dosificaciones los valores experimentales de la capacidad de soporte en concordancia a la calicata de inspección C – 1 y C – 2 (relativo al segundo estrato); reflejan un aumento proporcional de los valores conforme varían las dosificaciones, siendo las proporciones de MN + 4% Cal + 15% RAP quienes alcanzaron valores máximos de 10.050% y 10.540% del CBR concerniente al 100 % DMS respectivamente. De acuerdo al Manual de Carreteras (2014) este último resultado de CBR concerniente al 100% de la DMS cumple y satisface los requerimientos de caracterización de subrasante, categorizándose como una subrasante buena en un rango de mayor o igual al 10% y menor al 20% de CBR, siendo la dosificación más relevante y optima.

Resultados de valores de Expansión en deformímetro.

En tablas 38, 39 se señala el % de expansión de acuerdo al incremento de % RAP con 4% cal, tomando en cuenta la variabilidad de energía de compactación (en otras palabras 10, 25 y 56 golpes) para C – 1 y C – 2 respectivamente.

Tabla 38

Hinchamiento del sustrato arcilloso en C-1

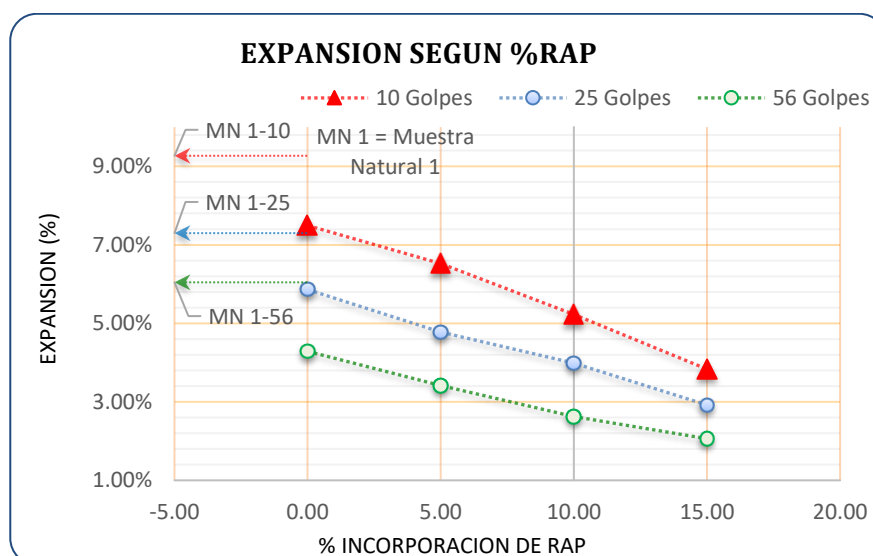
DOSIFICACIONES	EXPANSION (%)		
	10 golpes	25 golpes	56 golpes
Muestra Natural 1 (MN 1)	9.269%	7.298%	6.045%
MN 1 + 4% Cal + 0% RAP	7.493%	5.860%	4.287%
MN 1 + 4% Cal + 5% RAP	6.523%	4.777%	3.414%
MN 1 + 4% Cal + 10% RAP	5.227%	3.988%	2.622%
MN 1 + 4% Cal + 15% RAP	3.834%	2.921%	2.062%

Nota. Elaboración Propia

El cuadro comparativo 38, nos expone las expansiones obtenidas para la calicata C – 1 (relativo al segundo estrato), donde se evidencia una disminución a medida que se incrementa el aditivo RAP y utilizando un valor constante de 4% referente al aditivo cal; para la muestra natural (MN 1) a los 10 golpes de compactación resulta un valor de 9.269%, a los 25 golpes presenta 7.298% y a los 56 golpes alcanza 6.045%. Al incorporar las diferentes dosificaciones de cal y RAP alcanzaron un valor mínimo de 3.834% aplicando una cantidad de 10 golpes, asimismo a los 25 golpes de compactación alcanzaron un valor mínimo de 2.921% y al aplicar los 56 golpes de compactación nos evidencia una disminución que alcanzaron un valor mínimo de 2.062%, estos valores mínimos corresponden a la dosificación MN 1 + 4% Cal + 15% RAP, siendo la proporción de mayor relevancia al reducir notablemente el indicador de hinchamiento. Del cuadro se puede inferir que presenta una reducción de hinchamiento ante los incrementos graduales de residuos de albañilería particulado.

Figura 55

Expansión según porcentaje de RAP en C-1



Nota. Elaboración Propia

La ilustración 55, resalta la decadencia del valor de la expansión a los (10,25 y 56 golpes) de compactación de la calicata C - 1, observando una reducción de los valores de expansión y/o hinchamiento con respecto a las añadiduras de RAP (incrementos graduales de 0% a 15%) y de cal (constante de 4%) referente a las distintas dosificaciones. En el gráfico las rectas constantes representan el hinchamiento de la muestra patrón correlativamente a la cantidad de golpes.

Tabla 39

Hinchamiento del sustrato arcilloso en C-2

DOSIFICACIONES	EXPANSIÓN (%)		
	10 golp.	25 golp.	56 golp.
Muestra Natural 2 (MN 2)	8.900%	6.934%	5.876%
MN 2 + 4% Cal + 0% RAP	7.274%	5.552%	4.021%
MN 2 + 4% Cal + 5% RAP	6.111%	4.442%	3.196%
MN 2 + 4% Cal + 10% RAP	4.700%	3.362%	2.320%
MN 2 + 4% Cal + 15% RAP	2.955%	2.106%	1.470%

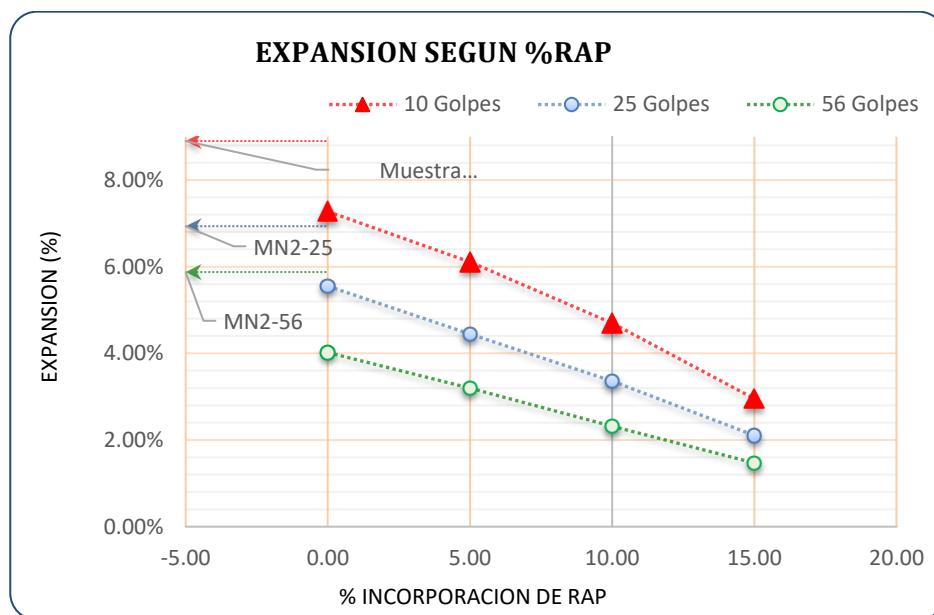
Nota. Elaboración Propia

El cuadro comparativo 39, expone las expansiones obtenidas en concordancia a la calicata C – 2 (referente al segundo estrato); a los 10 golpes de compactación nos evidencia una disminución, siendo para la muestra natural (MN 2) un valor de 8.900% y que al incorporar las diferentes dosificaciones de cal y RAP alcanzaron un valor mínimo de 2.955% correspondiente a la dosificación MN 2 + 4% Cal + 15% RAP; a los 25 golpes de compactación nos evidencia una reducción, siendo para la muestra natural (MN 2) un valor de 6.934% y que al incorporar las diferentes dosificaciones de cal y RAP alcanzaron un valor mínimo de 2.106% correspondiente a la dosificación MN 2 + 4% Cal + 15% RAP; y para

los 56 golpes de compactación nos evidencia una disminución, siendo para la muestra natural (MN 2) un valor de 5.876% y que al incorporar las diferentes dosificaciones de cal y RAP alcanzaron un valor mínimo de 1.470% correspondiente a la dosificación MN 2 + 4% Cal + 15% RAP respectivamente. Estos valores mínimos que corresponden a la dosificación MN 1 + 4% Cal + 15% RAP viene a ser la proporción de mayor relevancia al reducir notablemente el indicador de hinchamiento. Del cuadro se puede inferir que presenta una reducción de hinchamiento ante los incrementos graduales de residuos de albañilería particulado.

Figura 56

Expansión según porcentaje de RAP en C-2



Nota. Elaboración Propia

La ilustración 56, nos presenta la decadencia del valor de la expansión a los (10,25 y 56 golpes) de compactación referente a la calicata C – 2 (relativo al segundo estrato), observando una reducción de los valores de expansión y/o hinchamiento con respecto a las añadiduras de RAP en sus distintas mezclas y un

4% constante de cal. En el gráfico las rectas constantes representan el hinchamiento de la muestra patrón correlativamente a la cantidad de golpes.

4.1.5. Resultados de análisis de costos

Se realiza el análisis de costos para mejoramiento y potencialización de suelos arcillosos mediante estabilización con porcentaje de cal y RAP (residuos de albañilería) en su mejor desempeño, donde se define la incidencia de materiales que se va usar y las partidas o actividades que se requieren para conformar una capa de subrasante acorde a los ACU (análisis de costos unitarios) correspondientes, para luego obtener el costo directo a nivel de subrasante según la planilla de metrados de incidencia.

Del mismo modo, se realiza el análisis a nivel de costos para mejoramiento y potencialización de suelos arcillosos mediante estabilización convencional con material granular y/o pétreo procedentes de cantera (responde a material de préstamo), tomando en cuenta los ACU y respectivos metrados de incidencia.

Tabla 40

Tipo de mejoramiento de Subrasante

Mejoramiento de Subrasante	SIGLAS
Estabilización con 4%Cal + 10%RAP	EC-10RAP
Estabilización con 4%Cal + 15%RAP	EC-15RAP
Estabilización con Material Granular	E-MGR
Estabilización con Material Pétreo	E-EPT

Nota. Elaboración Propia

En el cuadro anterior se presenta las dosificaciones estabilizando con cal y RAP en su mejor desempeño; es decir, las proporciones MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP los cuales cumplen los requerimientos mínimos

de la MTC (2014). También se describe los métodos convencionales de mejoramiento de suelos en el entorno de la ciudad de Juliaca, estabilizando con material granular y/o pétreo de cantera (se toma en cuenta los expedientes técnicos a nivel provincial, San Román).

Recursos Necesarios

Para esta investigación se realiza las cotizaciones de precios unitarios actualizados al mes de noviembre del 2024, correspondientes con respecto a materiales y equipos e incidentes a nivel de trabajos de subrasante.

Tabla 41

Recursos respecto a materiales

INSUMO	UNIDAD	PU (S/.)
Madera tornillo 2"x3", L=3m	PZA	35.00
Yeso de 25 kg	BLS	7.00
Ocre de 1 kg	BLS	8.00
Clavos	KG	6.00
Cal de obra de 20kg	BLS	17.90
Residuos de albañilería particulado 40kg	BLS	4.51
Hormigón seleccionado de río	M ³	40.00
Material granular para subbase 2", 3" y 3 ½"	M ³	50.00
Material granular para subrasante 0-3"	M ³	50.00
Piedra mediana de 4" - 8"	M ³	55.00
Análisis químico de estabilizante	UND	150.00
Clasificación de suelos	UND	110.00
Ensayo Proctor modificado	UND	90.00
Ensayo CBR	UND	150.00
Abrasión de los ángeles	UND	130.00
Cantidad de materia orgánica	UND	80.00
Densidad de campo (4 puntos min)	UND	150.00

Nota. Elaboración Propia

Seguidamente, se menciona todos los recursos sobre materiales que se implementan en la elaboración y determinación de presupuesto respecto a la subrasante.

De igual forma, se menciona todos los recursos sobre maquinarias y equipos que se disponen en el planteamiento, elaboración y determinación del presupuesto a nivel de subrasante. Ahora tanto en la cuantificación de materiales como en las maquinarias a nivel de precios unitarios, se deduce de las cotizaciones realizadas durante el estudio.

Tabla 42

Recursos respecto a Equipos

INSUMO	UNIDAD	PU (S/.)
Herramientas manuales	%MO	
Estación total	HM	30.00
Nivel topográfico	HM	25.00
Excavadora sobre orugas 115-165 hp, 0.75-1.6 yd ³	HM	300.00
Cargador frontal de 200-250 hp	HM	189.00
Motoniveladora 125 hp	HM	210.00
Rodillo liso vibr. autoprop. 101-135 hp 10-12 tn	HM	120.00
Camión cisterna agua 4x2 178-210 hp 3000 gal	HM	95.00
Camión volquete 330 hp, 15 m ³	HM	115.00
Motobomba 7-10 HP	HM	10.00
Chancadora con cono de 3', 59-263 Tn/H	HM	130.00
Camión Baranda de 3 Tn	HM	120.00
Camión Plataforma 122HP 8Tn	HM	190.00

Nota. Elaboración Propia

Tabla 43

Recursos respecto a Mano de Obra

INSUMO	UNIDAD	PU
Peón	HH	11.57
Oficial	HH	14.15
Operario	HH	16.72

Nota. Elaboración Propia

Asimismo, se determina el cálculo de costo hora hombre, según la Resolución Gerencial N.º 241-2023-MPSRJ/GEMU; considerando todas las

variables de incidencia (remuneración básica, beneficios sociales, aportes a la seguridad social, entre otros).

Metrados

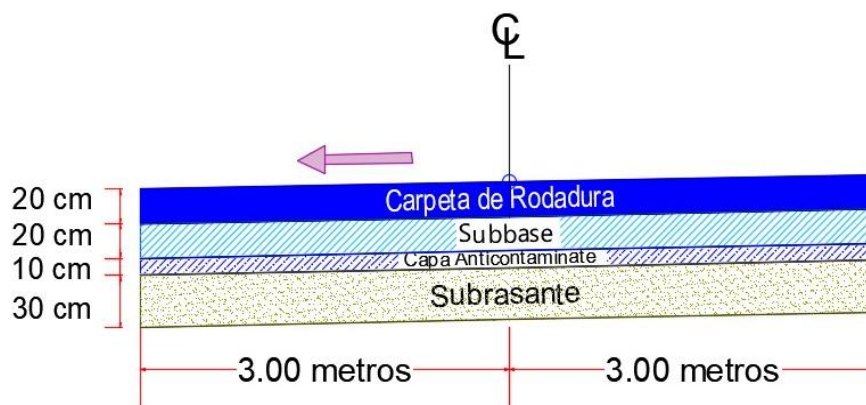
Para determinar el cálculo de Metrados, previamente se diseña el pavimento rígido para el tipo de mejoramiento de suelos con añadiduras de Cal y RAP de acuerdo a la Norma CE.010 (2010) y la Guía ASSHTO (1997).

Atendiendo al Manual de Carreteras (2014), para una capa estabilizada se debe considerar una capa anticontaminante, si se tratase de suelos arcillosos.

En el método de mejoramiento convencional se adopta el diseño en base a los expedientes técnicos formulados por Municipalidad Provincial de San Román (MPSR).

Figura 57

Espesores estructurales del pavimento analizado



Nota. Adaptado a estabilización con Cal y RAP (Elaboración Propia)

Los Metrados se determina principalmente de acuerdo a los espesores o capas estructurales del pavimento rígido, siendo en este caso a nivel de subrasante.



El diseño de la avenida Los Virreyes se determina con atención a la Norma CE. 010 (2010) de Pavimento Urbanos, la Norma GH. 020 (2011) de Componentes de Diseño Urbano, Manual de diseño geométrico de vías urbanas, VCHI (2005).

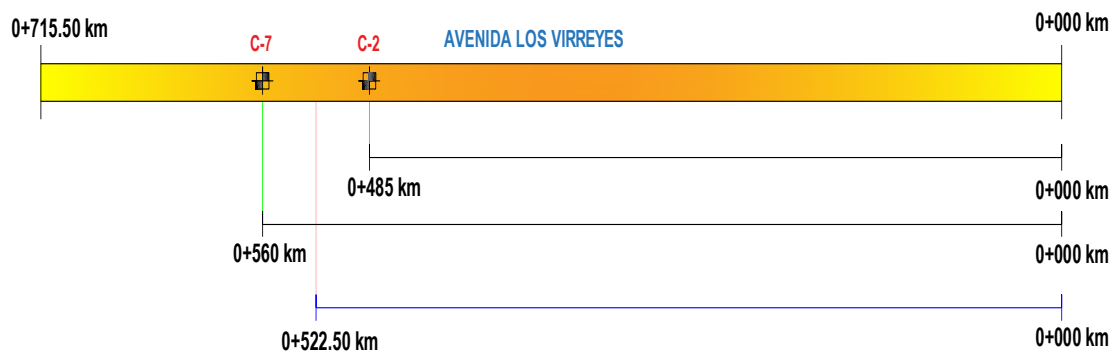
La Norma GH. 020 (2011) menciona que los atributos característicos de las secciones de las vías a nivel primario de la zona urbana, debe ser en compatibilidad al Plan de Desarrollo Urbano, refiriéndose a las vías reconocidas como expresas, como arteriales y también colectoras. La avenida en mención presenta una longitud de 715.50 m y un ancho de valor promedio de 20 m aproximadamente.

Según la Norma CE. 010 (2010), la avenida de estudio se clasifica como una vía tipo colectoras con un tráfico alto. VCHI (2005) señala que, para el tipo de vía estudiada, el ancho de carril mínimo debe ser 3.00 metros. De acuerdo a la clasificación vial del Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Juliaca 2016-2025, la Avenida Los Virreyes no pertenece a las redes colectoras, por lo que se asume como red local principal.

La Norma GH. 020 (2011) describe y precisa algunos parámetros de calzada con respecto a las vías locales que se vincula con viviendas, donde con fines de cálculo de costos unitarios se analiza para un ancho de calzada con 2 módulos de 3m a cada lado del separador de (caminera y jardín). Además, se diseña una cuneta con ancho de 0.50m por calzada, obteniéndose un ancho de influencia de 6.50 por calzada. Los espesores del pavimento rígido, en esencial la capa de subrasante se diseña en base a la Norma CE. 010, en base a la MTC, y la metodología de ASSHTO (se adjunta en los anexos).

Figura 58

Longitud de análisis para Estabilización



Nota. Adaptado a estabilización con Cal y RAP (Elaboración Propia)

Respecto a la figura anterior, la Av. Los Virreyes desde la progresiva 0+000km hasta la progresiva 0+485km (calicata C-2) se encuentran CH (suelos arcillosos de alta plasticidad) a nivel de subrasante de acuerdo al EMS, lo que requiere ser estabilizado para las condiciones estudiadas. Por otro lado, a partir de la progresiva 0+560km (Calicata C-7) hasta la progresiva 0+715.50km (fin) se halla suelo SC (arena arcillosa) lo cual no se analiza para esta investigación. En ese sentido, adoptamos una longitud de 522.50 m para Estabilización, siendo proyectado hasta el punto medio de C-2 y C-7.

Tabla 44

Metrados de los espesores estructurales incidentes

CAPAS ESTRUCTURALES	Espesor (m)	Área (m²)	Volumen (m³)	FE (%)
Corte de terreno		Vol=	5570.315	1.15
Losa de concreto	0.20	7353.468	1470.694	-----
Subbase granular	0.20	7353.468	1470.694	1.20
Capa estabilizada	0.30	7353.468	2206.040	1.10
Anticontaminante	0.10	7353.468	735.347	1.20
Material granular	0.40	7353.468	2941.387	1.20
Material pétreo	0.30	7353.468	2206.040	1.40

Nota. Elaboración Propia



Se considera un Factor de Esponjamiento (FE) en concordancia a la Norma Técnica “Metrados para Obras de Edificación y Habilitaciones Urbanas” (2010), para cuantificar el movimiento de tierras (corte y relleno) y conformación de la subrasante. El FE a nivel de movimiento de tierras es de suma importancia para obtener evidencias mas certeras, debido a la consolidación y los asentamientos.

Rendimientos

En este proyecto, los rendimientos de los equipos, maquinarias, partidas y subpartidas se determinan con base a la información brindada por la Cámara Peruana de Construcción (CAPECO), los expedientes de la Municipalidad Provincial de San Román (MPSR) de incidencia, y los expedientes referentes a estabilización, los cuales se adjuntan en los Anexos. Para la apreciación colaborativa de rendimientos se considera el proceso constructivo de cómo se distribuye y programa los trabajos, que son especificados en el Manual de Carreteras EG (2013), especialmente el acápite de mejoramiento de suelos con añadiduras de cal o similar (si existe la necesidad).

Incidencia de estabilizantes

Respecto a los resultados anteriores, las proporciones en su mejor desempeño y en cumplimiento con los requerimientos mínimos del Manual de Carreteras (2014) de CBR y la norma CE. 010 a nivel de subrasante para pavimentos urbanos, son las proporciones MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP. El calculo de incidencia se adjunta en los anexos del estudio, para las dos dosificaciones optimas, y también las fichas técnicas de los materiales estabilizantes.

Tabla 45*Incidencia de materiales en mezclas estabilizadas*

Materiales		Dosificación		
		Por m ³	Por m ²	Unidad
Muestra natural (arcilla)	EC-10RAP	0.6664	0.1999	m ³
	EC-15RAP	0.6287	0.1886	m ³
Estabilizante Cal	EC-10RAP	50.6810	15.2043	Kg
	EC-15RAP	50.7605	15.2281	Kg
Estabilizante RAP	EC-10RAP	126.7026	38.0108	Kg
	EC-15RAP	190.3518	57.1055	Kg
Cantidad de agua	EC-10RAP	0.2313	0.0694	m ³
	EC-15RAP	0.2266	0.0680	m ³

Nota. Elaboración Propia

Análisis de costos unitarios.

Con fines de cuantificar el costo de mejoramiento se realiza el análisis de precios unitarios de cada una de las tareas (partidas y subpartidas incidentes), considerando los recursos, metrados, rendimientos e incidencia de estabilizantes ya precisados. También se ajusta al proceso constructivo, con mención a pavimentos urbanos y EG (2013).

4.1.4.1. Costo de mejoramiento convencional de subrasante

En el siguiente cuadro comparativo se señala el costo de mejoramiento convencional de subrasante, uno de ellos denominado como estabilización con material granular en la que se cuantifica un presupuesto de S/ 365,446.580, adaptado a partir de los datos del proyecto y el otro siendo, estabilización con material pétreo en la que se cuantifica S/ 365,446.580, ajustado a los expedientes técnicos que normalmente se elaboran en la provincia de San Román.

Tabla 46

Costo de mejoramiento convencional

Mejoramiento convencional	Siglas	Costo (S/.)
Estabilización con Material Granular	E-MGR	S/ 365,446.580
Estabilización con Material Pétreo	E-MPT	S/ 406,339.780

Nota. Elaboración Propia

El costo de mejoramiento convencional se determina solo a nivel de subrasante y como costo directo, debido a su incidencia neta de variabilidad. El desagregado del presupuesto de obra y el ACU se incluye en los anexos del proyecto, de manera detallada.

4.1.4.2. Costo de mejoramiento de la subrasante por Estabilización con Cal y RAP.

A continuación, se presenta el costo de mejoramiento de subrasante por estabilización con cal y RAP, donde se describen dos proporciones en su mejor desempeño y en cumplimiento con la normativa respecto a pavimentos urbanos con respecto al CBR; uno de ellos con dosificación de MN + 4%Cal + 10%RAP y el otro, MN + 4%Cal + 15%RAP siendo de mayor desempeño.

Tabla 47

Costo de mejoramiento mediante Estabilización con cal y RAP

Mejoramiento con Cal y RAP	Siglas	Costo (S/.)
Estabilización 4%Cal + 10%RAP	EC-10RAP	S/ 404,848.440
Estabilización 4%Cal + 15%RAP	EC-15RAP	S/ 435,945.520

Nota. Elaboración Propia

El costo de mejoramiento con adición de cal y RAP se determina solo a nivel de subrasante y como costo directo. El desagregado referente al

presupuesto de obra y de la misma manera el ACU se adjunta en los Anexos del proyecto.

4.1.4.3. Variación de costos

Consecuentemente, se presenta la variación porcentual de costo de la subrasante, incorporando y estabilizando con cal y RAP, con respecto al costo de mejoramiento convencional. En ese entender, en cuadro 48 se evidencia los resultados determinados y adquiridos en el programa presupuestos.PE, con respecto al costo directo en referente al mejoramiento de subrasante por método común y método de estabilización con añadiduras de cal y RAP, para dosificaciones de incidencia.

Tabla 48

Variación porcentual de costo de mejoramiento

TIPO DE MEJORAMIENTO	SIGLAS	Costo (S/.)	Variación E-MGR	Variación E-MPT
Estabilización Material Granular	E-MGR	365,446.580	-----	-----
Estabilización Material Pétreo	E-MPT	406,339.780	11.190%	-----
Estabilización 4%Cal + 10%RAP	EC-10RAP	404,848.440	10.782%	-0.367%
Estabilización 4%Cal + 15%RAP	EC-15RAP	435,945.520	19.291%	7.286%

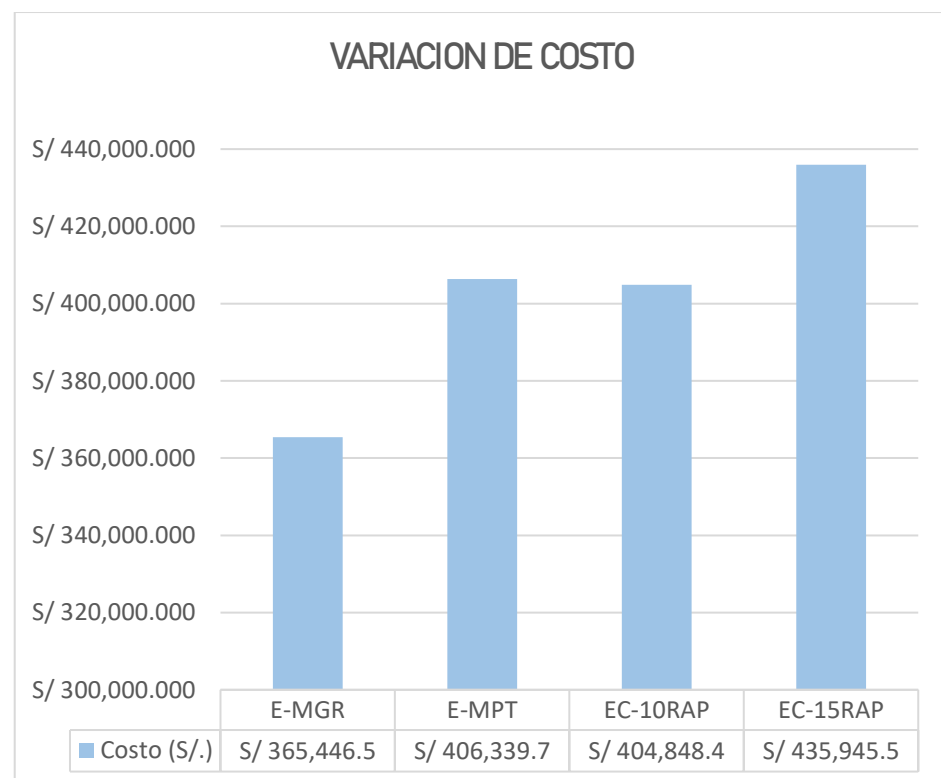
Nota. Elaboración Propia

La variación porcentual de costo de subrasante estabilizando con cal y RAP, en las proporciones aptos a nivel de CBR según normativa MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP es de 10.782% y 19.291% respectivamente con respecto al costo convencional de subrasante con material granular. De la misma forma, la variación porcentual con respecto al costo convencional de subrasante con material

pétreo (pedraplén) es de -0.367% y 7.286% respectivamente. Por lo tanto, se deduce que el costo de subrasante con cal y RAP se incrementa concordante al mejoramiento convencional con material granular y, el costo de estabilización en la proporción MN + 4% Cal + 10% RAP, se asemeja y/o aproxima al costo convencional con material pétreo, pudiéndose utilizar técnicamente cualquiera de las dos alternativas si se trata de ajuste de costos. La dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP no es rentable.

Figura 59

Variación de costo de mejoramiento de subrasante



Nota. Elaboración Propia

El gráfico 59, representa que con la adición de cal y residuos de residuos de albañilería particulado (RAP) en las dosificaciones MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP se incrementa el costo de



mejoramiento alcanzando valores de costo directo de S/. 404,848.440 y S/. 435,945.520 correlativamente, con respecto al costo de mejoramiento convencional con material granular con un valor de S/. 365,446.580 a nivel de material granular. Asimismo, el costo de estabilización con la dosificación MN + 4% Cal + 15% RAP es superior al costo de mejoramiento convencional con material pétreo con un valor de S/.406,339.780 y a su vez, es próximo al costo de estabilización con la dosificación MN + 4% Cal + 10% RAP.

4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.2.1. Prueba de Normalidad

4.2.1.1. Planteamiento de hipótesis estadística

Ho: Los datos de propiedades físicas y mecánicas presentan una distribución normal.

Ha: Los datos de propiedades físicas y mecánicas no presentan una distribución normal.

4.2.1.2. Nivel de significancia

Nivel de confianza: 95%

Error o nivel de significancia: 5% = 0.05

4.2.1.3. Cálculo de p – valor

La cantidad de datos analizados son menores a 50, por lo que utilizaremos la prueba de Shapiro – Wilk. (ver tabla 49)

4.2.1.4. Regla de decisión

Si, $P - \text{valor} \leq 0.05$, aceptaremos la hipótesis estadística alterna.

Si, $P - \text{valor} > 0.05$, aceptaremos la hipótesis estadística nula.

4.2.1.5. Conclusión

Tabla 49

Prueba de normalidad para datos de propiedades analizadas

Propiedades	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
IP	0.968	10	0.867
DMS	0.960	10	0.789
CBR al 95%	0.952	10	0.698
Porcentajes de adición de RAP	0.898	10	0.210

Nota. Datos extraídos del SPSS

Las significancias calculadas son superiores a 0.05 por lo que aceptaremos la hipótesis estadística nula donde indica que los valores de propiedades físicas y mecánicas presentan un comportamiento que se ajusta a una distribución normal, lo que justifica el uso de técnicas estadísticas paramétricas, este caso corresponde a la prueba de correlación Pearson.

4.2.2. Prueba de Correlación Pearson para Índice de Plasticidad

4.2.2.1. Planteamiento de hipótesis estadística

H_0 : La cal y los residuos de albañilería particulado no inciden en el IP del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023.

H_a : La cal y los residuos de albañilería particulado inciden reduciendo el IP del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023.

4.2.2.2. Nivel de significancia



Nivel de confianza: 95%

Error o nivel de significancia: 5% = 0.05

4.2.2.3. Cálculo de p – valor

Tabla 50

Test de homogeneidad de varianzas para IP

Correlación	N	Correlación de Pearson	Sig. (bilateral)
Porcentajes de adición de RAP – IP	10	-0.935	0.001

Nota. Datos extraídos del programa SPSS

4.2.2.4. Regla de decisión

Si, P – valor \leq 0.05, aceptaremos la hipótesis estadística alterna.

Si, P – valor \geq 0.05, aceptaremos la hipótesis estadística nula.

4.2.2.5. Conclusión

La significancia calculada resulta 0.001, lo cual es inferior a 0.05 por lo que aceptaremos la hipótesis estadística alterna (H_a) donde sostiene que la adición de cal y diversos porcentajes de RAP si tiene relación con el índice de plasticidad de la subrasante. Se tiene un $R = -0.935$ el cual indica una correlación negativa muy fuerte, es decir que la relación es inversa ya que, conforme se adicionan porcentajes crecientes de RAP los resultados de índice de plasticidad disminuyen, considerándose resultados favorables ya que se pretende reducir los valores de plasticidad de una subrasante de acuerdo a la norma peruana de incidencia.

4.2.3. Prueba de Correlación Pearson para Máxima Densidad Seca

4.2.3.1. Planteamiento de hipótesis estadística



Ho: La adición de cal y los residuos de albañilería particulado no inciden en la DMS del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023.

Ha: La adición de cal y los residuos de albañilería particulado inciden aumentando la DMS del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023.

4.2.3.2. Nivel de significancia

Nivel de confianza: 95%

Error o nivel de significancia: 5% = 0.05

4.2.3.3. Cálculo de p – valor

Tabla 51

Test de homogeneidad de varianzas para DMS

Correlación	N	Correlación de Pearson	Sig. (bilateral)
Porcentajes de adición de RAP – DMS	10	0.920	0.001

Nota. Datos extraídos del programa SPSS

4.2.3.4. Regla de decisión

Si, P – valor ≤ 0.05 , aceptaremos la hipótesis estadística alterna

Si, P – valor ≥ 0.05 , aceptaremos la hipótesis estadística nula

4.2.3.5. Conclusión

La significancia calculada es 0.001, siendo inferior a 0.05 por lo que aceptaremos la hipótesis estadística alterna que la adición de cal y los residuos de albañilería particulado inciden incrementando la máxima densidad seca del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023. Se

tiene un $R= 0.920$ el cual indica una correlación positiva muy fuerte, es decir que la relación es propia ya que, a medida se adicionan porcentajes progresivamente de RAP los resultados de máxima densidad seca incrementan considerándose resultados favorables ya que se pretende incrementar los valores de DMS de una subrasante arcillosa.

4.2.4. Prueba de Correlación Pearson para CBR al 95%

4.2.4.1. Planteamiento de hipótesis estadística

Ho: La adición de cal y los residuos de albañilería particulado no inciden significativamente en el CBR de las muestras de suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023.

Ha: La adición de cal y los residuos de albañilería particulado inciden significativamente incrementando el CBR de las muestras de suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023.

4.2.4.2. Nivel de significancia

Nivel de confianza: 95%

Error o nivel de significancia: 5% = 0.05

4.2.4.3. Cálculo de p – valor

Tabla 52

Test de homogeneidad de varianza para CBR

Correlación	N	Correlación de Pearson	Sig. (bilateral)
Porcentajes de adición de RAP –CBR al 95%	10	0.981	0.001

Nota. Datos extraídos del programa SPSS

4.2.4.4. Regla de decisión



Si, $P - \text{valor} \leq 0.05$, entonces aceptaremos la hipótesis estadística alterna

Si, $P - \text{valor} > 0.05$, entonces aceptaremos la hipótesis estadística nula

4.2.4.5. Conclusión

La significancia calculada resulta 0.001, el cual es inferior a 0.05 por lo que aceptaremos la hipótesis estadística alterna que manifiesta que la adición de cal y los residuos de albañilería particulado inciden significativamente incrementando la capacidad de soporte CBR de las muestras de suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023. Se tiene un $R = 0.981$ el cual indica una correlación positiva muy fuerte, es decir que la relación es propia ya que, conforme se adicionan porcentajes progresivamente de RAP los resultados de la capacidad de soporte CBR al 95% del DMS incrementan considerándose resultados favorables ya que se pretende incrementar valores de CBR de una subrasante arcillosa con fines de cumplir los requerimientos mínimos del Manual de Carreteras (2014), en la sección de suelos y pavimentos.

4.3. DISCUSIONES

De acuerdo a Amena (2021) quien incorpora tiras de residuos de plástico con porcentajes en peso de 0.25, 0.5 y 0.75% y residuos particulados de desechos de ladrillos en proporciones de 20, 30 y 40% en un tipo de suelo expansivo, logra determinar un valor de 25.1 para el índice de plasticidad, clasificándolo como un suelo arcilloso altamente plástico. En la presente investigación, se añade en diferentes proporciones cal y residuo albañilería particulado (RAP) efectuando un promedio de los valores encontrados en las



calicatas exploradas C -1 y C – 2 para las diferentes dosificaciones, encontrando así una disminución desde 36.277 hasta 22.026 del IP conforme se añadía las diferentes dosificaciones de cal y RAP, siendo la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP el cual reduce hasta un 39.284 % del IP respecto a la muestra natural. Los resultados de ambas investigaciones son similares puesto que los valores de IP clasifican a los materiales de estudio como suelos altamente plásticos, destacando la aplicabilidad que señala el presente estudio al añadir cal y RAP a la muestra natural consiguiendo una reducción satisfactoria para el tipo de suelo mencionado.

Según Quispe (2020) incorporó residuos de ladrillo artesanal particulado y material de cantera al suelo inalterado en diferentes proporciones, encontrando un ligero incremento seguidamente de una reducción en los valores de la máxima densidad seca, con la dosificación de 80% SI + 20% L logra un valor de 2.09 g/cm^3 que representa a un 2.45 % de variación respecto al suelo inalterado, así también, con la dosificación de 80% SI + 20% MC obtiene un valor de 2.13 g/cm^3 que representa un 4.51% de variación respecto al suelo inalterado, en las dosificaciones diversas los valores disminuyeron. En el presente estudio, los valores de la DMS incrementan conforme las dosificaciones cambiaban, teniendo la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP el cual mejora notablemente obteniendo un valor de 1.677 g/cm^3 representando una variación de 2.569% respecto a la muestra normal. Estos resultados son semejantes a los logrados en la presente investigación, debido a que valores determinados tienden a acrecentar respecto al porcentaje de añadidura de RAP, destacando la proporción MN + 4% Cal + 15% RAP como el más incidente en el aumento de la máxima densidad seca.

Como señala Srikanth et al (2018), que adicionando 4% cal en su combinación optima con suelo de algodón negro de un CBR de 1.17% obtuvo un índice resistente de 8.52%; consecuentemente adicionando residuos de ladrillo particulado a la combinación



mencionada en porcentajes de 20%, 40%, 60% y 80% logró alcanzar 20.07%, 7.81%, 4.67%, 11.82% de CBR respectivamente, constatando un incremento máximo en su primera dosificación, es decir incorporando 20% de residuos de ladrillo particulado. Por otra parte, conforme menciona Ccansaya & Tello (2022) incorporaron cal de obra en proporciones de 0, 80, 100, 150 y 200% en una subrasante arcillosa obteniendo valores del CBR al 95 % de 3.5, 12.1, 15.1, 15.6 y 12.2 respectivamente, evidenciando un incremento máximo hasta cierto porcentaje de adición. En la presente investigación se añadió en diferentes proporciones cal y residuo albañilería particulado (RAP) efectuando un promedio de los valores encontrados en las calicatas exploradas C -1 y C – 2 para las diferentes dosificaciones, encontrando una variación significativa positiva 221.154% en la capacidad de soporte con un valor 8.350% respecto a la muestra natural. Los estudios mencionados presentan un incremento significativo en los valores del CBR al 95%. Srikanth et al (2018) consiguen obtener la combinación óptima de estabilización con la incorporación de 4% de cal y 20 % de residuos de ladrillo particulado, logrando acrecentar hasta en un 1615.38% de CBR con respecto al estado natural y en un 135.56% respecto a la combinación óptima de 4 % de cal con suelo de algodón negro, notándose un aumento considerable. Asimismo, Ccansaya y Tello lograron incrementar 342% del valor del CBR con respecto a su muestra inicial con la adición del 80% de cal, mientras se aumenta las proporciones, la capacidad de resistencia logra incrementarse siendo la proporción de 150% de cal la proporción más positiva y óptima puesto que con la adición de 200% de cal se reduce. Con respecto a la presente investigación no se presenta una disminución, incidiendo la dosificación de MN + 4% Cal + 15% RAP como óptimo y con mejor desempeño logrando alcanzar 8.350% de CBR que representa un 221.154 respecto a la muestra en estado natural, satisfaciendo así los requisitos mínimos a nivel de la capa de subrasante del Manual de carreteras, Sección de Suelos y Pavimentos (2014).

Tabla 53*Variación de costo de Estabilización según aditivo reciclado*

Muestra	CBR al 95%	Costo (S/. por M ³)
70 % SI + 30 % L	12.80	20.54
70 % SI + 30 % C	15.85	15.49
70 % SI + 30 % R	22.70	9.56
80 % SI + 20 % MC	40.40	11.98

Nota. Datos extraídos de tesis, Quispe (2020)

Según Quispe (2020), determinan la variabilidad de costos para una subrasante de 15cm de espesor y para las dosificaciones óptimas, en la que se observa que no todos los residuos son viables económicamente, señala que los residuos de ladrillo (L) y concreto reciclado (R), aumentan en un 71% y 29% respectivamente con respecto al costo convencional con material de cantera (MC) a nivel de subrasante (SI); a pesar de ello destaca, que estabilizando con residuos de revestimiento (R) se reduce en 20%.

Tabla 54*Variación de costo de Estabilización con respecto al convencional*

Descripción	CBR al 95%	Costo (S/. por M ³)
E-MGR	>10%	165.657
E-MPT	>30%	184.194
EC-10RAP	6.785	183.518
EC-15RAP	8.350	197.615

Nota. Datos extraídos y adaptados a la presente investigación

Mientras en la presente investigación se realiza el análisis de costos para un espesor de 0.30m de subrasante y para las proporciones favorables según la Norma CE 0.10 (2010). Se determinan incrementos de 10.782% y 19.291% de la proporción en su mejor desempeño respecto al costo convencional más favorable. Se interpreta que a partir



de la proporción 4% de cal y 10% de RAP (EC-10RAP) en ascendente aumentan los costos con respecto al convencional con material pétreo.

En ese sentido la investigación presente analiza los costos unitarios a profundidad para los estabilizantes de cal y RAP, en la que se infiere la no viabilidad económicamente, por la presencia de canteras alrededor de la MPSR. Sin embargo, es factible utilizar estos aditivos especialmente con referente a RAP en proporciones menores, indicados en la anterior tabla, siempre y cuando cumpla con los requerimientos mínimos de la Norma CE.010 y en complemento con el Manual de Carreteras (2014).

Quispe & Rivera (2019), describe que al usar aditivo cal reduce el costo a nivel de las capas estructurales con referente al estado natural, en mención al efecto de volumen de corte de terreno, es decir, se obtiene menor uso de materiales, equipos y mano de obra. En referencia se corrobora esta información para el caso de uso de material de cantera, existe mayor volumen de movimiento de tierras que estabilizando con aditivos, pero esto incide más aún si el área de influencia es cada vez más creciente.



V. CONCLUSIONES

- La incorporación de cal y residuos de albañilería particulado (RAP) mejoran las propiedades físico – mecánicas para los suelos arcillosos de la Av. Los Virreyes, Juliaca, 2023; aminorando el índice de plasticidad, incrementado la densidad máxima seca e incrementando el CBR, cumpliendo los requerimientos de la Norma de Pavimentos Urbanos (2010) y en complemento del Manual de Carreteras, Sección de Suelos y Pavimentos (2014) en la dosificación más favorable a nivel mecánico, y también el costo de mejoramiento con la aplicación de estos estabilizantes en su mejor desempeño se incrementa respecto al mejoramiento convencional. La clasificación a nivel de subrasante natural según SUCS es CH, arcilla de alta plasticidad, y la simbología según AASHTO es A-7-6₍₂₀₎. Las proporciones de cal es 4% de forma constante y las modificaciones del RAP es en 0, 5, 10, y 15% en combinación con la cal y la muestra natural (MN).
- Se determina que la incorporación de cal y residuos de albañilería particulado inciden reduciendo el índice de plasticidad del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023, obteniendo valores de 36.277% para la MN, 33.445% para la dosificación MN + 4% Cal + 0% RAP, 29.717% para MN + 4% Cal + 5% RAP, 25.661% para MN + 4% Cal + 10% RAP y 22.026% para MN + 4% Cal + 15% RAP, este último muestra un desempeño superior, logrando una reducción del 39.284% en comparación con el valor inicial del índice de plasticidad. Incorporando 8% de cal y con las diferentes proporciones de RAP se obtiene valores de IP más significativos, siendo la dosificación MN + 8% Cal + 15% RAP en su mejor desempeño alcanzando una reducción de 60.248% respecto al valor



natural del índice de plasticidad, se logra una plasticidad media de acuerdo al Manual de Carreteras (2014).

- Se determina que la adición de cal y residuos de albañilería particulados (RAP) incide positivamente en el aumento de la densidad seca máxima del suelo arcilloso de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023, obteniendo valores de 1.635 g/cm³ para MN, 1.645 g/cm³ para la dosificación MN + 4% Cal + 0% RAP, 1.661 g/cm³ para MN + 4% Cal + 5% RAP, 1.668 g/cm³ para MN + 4% Cal + 10% RAP y 1.677 g/cm³ para MN + 4% Cal + 15% RAP, evidenciando a este último un mejor desempeño, alcanzando una variación porcentual de 2.569% respecto al valor inicial de la MN, donde a medida que se adicionan porcentajes progresivamente de cal y RAP los resultados de máxima densidad seca incrementan.
- Se determina que la cal y los residuos de albañilería particulado inciden significativamente incrementando la capacidad de soporte CBR de la subrasante arcillosa de la Av. Los Virreyes, Juliaca 2023, obteniendo valores de 2.600% para MN, 4.050% para la dosificación MN + 4% Cal + 0% RAP, 5.375% para MN + 4% Cal + 5% RAP, 6.785% para MN + 4% Cal + 10% RAP y 8.350% para MN + 4% Cal + 15% RAP, se evidencia en este último un mejor comportamiento del CBR al 95% de DMS como especifica la norma de Pavimentos Urbanos (2010), alcanzando una variación porcentual de 221.154% respecto al valor inicial de la MN, valor que permite categorizar como subrasante regular de acuerdo al Manual de Carreteras (2014).
- Se determina, que con la adición de cal y residuos de albañilería particulado (RAP) en las dosificaciones de MN + 4% Cal + 10% RAP y MN + 4% Cal + 15% RAP se incrementan los costos de mejoramiento en 10.782% y 19.291%, alcanzando



valores de costo directo de S/. 404,848.440 y S/. 435,945.520 respectivamente, esto en relación al costo directo de mejoramiento convencional de subrasante con material granular, S/. 365,446.580. Asimismo, el costo de estabilización para subrasante en las proporciones mencionadas varía en -0.367% y 7.286% respectivamente con respecto al costo de subrasante con material pétreo, S/. 406,339.780. El costo de estabilización de la proporción MN + 4% Cal + 10% RAP se asemeja al costo convencional con material pétreo, por lo tanto, se puede usar la alternativa más conveniente a nivel técnico, constructivo y ambiental. Se concluye que el mejoramiento de suelos por estabilización con la adición de cal y RAP mayores a las proporciones de 4% de cal y 10% de RAP, no es viable económicamente, con respecto al mejoramiento convencional.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, en base a los resultados hallados determinar la dosificación óptima de la aplicación de cal y residuos de albañilería particulado, puesto que las propiedades físicas y mecánicas analizadas presentan una tendencia de mejora evidenciando un vacío de conocimiento que permita conocer las condiciones mínimas y máximas en cuanto a la añadidura de agentes estabilizantes.
- Se sugiere realizar la mejora de las propiedades físico - mecánicas no solo a nivel de subrasante, sino también en otras capas estructurales, en combinación de suelos con material de préstamo, o en reemplazo de suelo de fundación.
- Tras los resultados logrados en la plasticidad y capacidad de soporte del suelo, se recomienda potencializar el aditivo de cal con un grado de pureza alta de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) para que así se evidencie resultados más resaltantes y favorables en la categorización de subrasantes y a nivel de análisis de costos.
- Se sugiere evaluar la durabilidad de las mezclas de suelo con cal y residuos de albañilería particulado con métodos de ensayos ajustable y sofisticado para este tipo de aditivos, considerando que en la región de Puno se producen cambios bruscos de temperatura debido a los efectos climatológicos y/o meteorológicos.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Allah, O., Abid, S., & Zehawi, R. (2021). *Improvement of Soft Clay Soil Using Different Types of Additives*. 856.
- Ahamefule, A. (2014). *Enhancing durability of quarry fines modified black cotton soil subgrade with cement kiln dust stabilization*. *Transportation Geotechnics*, 1(1), 55-61.
- Alfonso, W. (2010). *Estabilización de suelos arcillosos plasticos con mineralizadores en ambinetes sulfatados o yesíferos*. Repositorio Universidad Politecnica de Madrid.
- Al-Taie, A. (2023). *Statistical method for estimating selected geotechnical properties of quaternary sediment*. *Revista de Ingeniería y Sustentabilidad*, 11(4), 928-941.
- Amena, S. (2021). *Estudio experimental sobre el efecto de las tiras de residuos plásticos y polvo de ladrillo de desecho en los parámetros de resistencia de suelos expansivos*. *Helyon*, 7(11).
- Amhadi, T., & Assaf, G. (2021). *Improvement of Pavement Subgrade by Adding Cement and Fly Ash to Natural Desert Sand*. *Infrastructures*, 6(11).
- Anaokar, M., & Mhaiskar, S. (2019). *Numerical analysis of lime stabilized capping under embankments based on expansive subgrades*. *Heliyón*, 5(9).
- ASSHTO (1997). *Guía ASSHTO para diseño de estructuras para pavimentos*.
- ASTM D 2216. (2019). *Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas en masa*. EE. UU.: ASTM International.
- ASTM D 4318. (2005). *Método estándar de ensayo para limite líquido, limite plástico y el indice de plasticidad de suelos*. EE. UU.: ASTM International.
- ASTM D1557. (2007). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified efford*. EE. UU.: ASTM International.
- ASTM D1883. (2005). *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted soils*. EE. UU.: ASTM International.



- ASTM D422. (2007). *Standard test method for particle - size analysis of soils*. EE. UU.: ASTM International.
- ASTM D 559. (2015). *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*. EE. UU.: ASTM International.
- Bavaresco, S. (2001). *Proceso metodológico en la investigación (cómo hacer un diseño de investigación)*. Maracaibo, Venezuela: Editorial de la Universidad del Zulia.
- Bello, A. (2019). *Evaluación de la viabilidad ambiental en la estabilización de suelos con un material alternativo puzolánico en vías de bajo volumen de tránsito*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín. Ciencia y Libertad.
- Braja, D. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*.
- Briones, M. (2015). *Zonificación mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y la capacidad portante del suelo, para viviendas unifamiliares en la expansión urbana del anexo Lucmacucho Alto - Sector Lucmacucho, distrito de Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Bustamante, R. (2022). *Adición polvo de ladrillo en la capacidad portante de la subrasante en la carretera San Mateo Chota, 2022*. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- CAPECO (2003). *Costos y Presupuesto en Edificación*. Lima, Perú.
- Careya, A., & Howard, I. (2022). *Backcasting and forecasting stabilized soil mechanical properties for mechanistic-empirical pavement design*. 324(126645).
- Caro, W. (2018). *Capacidad portante de los suelos de fundación con fines de cimentación mediante ensayos de corte directo y DPL en la ciudad de Llacanora - Cajamarca*. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Ccansaya, R., & Tello, A. (2022). *Análisis comparativo entre los métodos de estabilización por sustitución y por adición de cal de obra, para el mejoramiento de una subrasante arcillosa en la carretera Canta - Huayllay Km 57-59*. Lima, Perú: PUCP.



- Chacon, C., Ordoñez, C., & Varon, L. (2016). *Clasificación de la fracción fina de materiales provenientes de la cantera aledañas a Bogotá, a partir de su valor de matileno y su relación con la clasificación por el sistema unificado y sistema AASHTO*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Chavarry, C., Figueroa, R., & Reynaga, R. (2020). *Estabilización química de capas granulares con cloruro de calcio para vías no pavimentadas*. Lima: Polo del conocimiento.
- Chávez, M., Kanno, J., Rojas, A., & Vargas, J. (2019). *Efecto de los residuos sólidos provenientes de la construcción en la elaboración de mortero, Trujillo, La Libertad, 2019*. Repositorio Universidad Cesar Vallejo.
- Chirinos, J. (2016). *Efecto de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido optimo de humedad del suelo granular de la cantera Gavilán, 2015*. Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte.
- Cortegana, A. & Vega, C. (2024). *Análisis experimental de la adición de polvo de ladrillo y ceniza de hoja de plátano para el mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos en el sector de Mapresa, Tingo María*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Disfani, M., Arulrajah, A., Haghghi, H., Mohammadinia, A., & Horpibulsuk, S. (2014). *Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates*. Constr. Construir. Mate., 68, 667 - 676.
- Durotoye, T., Akinmusuru, J., Ogbiye, A., & Bamigboye, G. (2016). *Effect of common salt on the engineering properties of expansive soil*. International Journal of Engineering and Technology, 6(7), 233-241.
- Elizondo, F., Navas, A., & Sibaja, D. (2010). *Efecto de la cal en la Estabilización de subrasantes*. Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, 20(1-2), 93-108.
- Fernández, S., Quintero, M. & Orejuela, J. (2021). *Consecuencias del sector bancario en Colombia por las altas tasas de interés*. Colombia: Universidad de los Andes. Vol. 24 (43), pp. 56-75. Doi: <https://doi.org/10.53766/ACCON/2021.43.03>



- Fidias, A. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica (6ta ed.)*. Venezuela: Editorial Episteme.
- Firoozi, A., Guney, C., & Baghini, M. (2017). *Fundamentals of soil stabilization*. International Journal of Geo-Engineering, 8(1), 2.
- García, F., Flores, E., & Medina, Y. (2016). *Caracterización física de las arcillas utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción en Ocaña Norte de Santander*. Colombia: 39(53).
- Guerrero, F. & Velez, D. (2024). *Estudio experimental y numérico utilizando cal, ceniza de aserrín y polvo de ladrillo para la estabilización de suelos expansivos*. Pimentel, Perú: Universidad Señor de Sipán.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Definición del alcance de la investigación que se realizará: exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo. Metodología de la investigación (Vol. 6)*. Lima.
- Huanca, R., & Paredes, F. (2017). *Evaluación de daños al medio ambiente por rellenos y sus consecuencias en edificaciones en la urbanización ampliación Alfonso Ugarte de Juliaca*. Puno, Perú: Repositorio Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.
- Huancoillo, Y. (2017). *Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para su uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera desvió Huanané – Chupa – Puno*. Puno, Perú: Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano.
- Huisa, E. (2015). *Manejo de los residuos de la construcción y demoliciones para su reciclado y empleo en construcciones de vías de la ciudad de Juliaca*. Puno, Perú: Repositorio Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.
- Ifediniru, C., & Ekeocha, N. (2022). *Performance of cement-stabilized weak subgrade for highway embankment construction in Southeast Nigeria*. 13(1).
- Islam, R., Nazifa, T., Yuniarto, A., Shanawaz, A., Salmiati, S., & Shahid, S. (2019). *An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling*. Waste Management, 95, 10-21.



- Junco, J., & Tejeda, E. (2013). *Consideraciones acerca de la actividad de las arcillas en la Estabilización de suelos con sales cuaternarias de amonio*. 7(3).
- Katte, V., Souleyman, M., & Ludovic, A. (2019). *Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37.
- Kufre, R., & Ufot David Imoh Christopher Attah, K. C. (2021). *Effect of micro sized quarry dust particle on the compaction and strength properties of cement stabilized lateritic soil*. 2(100023).
- Lin, L., Bin, S., Hongtao, J., He, H., Gonghui, W., & Toshitaka, K. (2011). *Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer*. *Science Direct*, 117(1-2), 114-120.
- Mayorga, R., Graciano, D., Hernández, A., Moctezuma, P., Pérez, B., & Roldan, A. (2022). *Cuadro comparativo de Análisis Paramétrico y no Paramétrico*. *Salud y Educación*, 10(20), 90-93.
- Mendoza, E. (2023). *Estudio comparativo de estabilización de suelos arcillosos entre las adiciones de cemento, cal y ceniza de carbón para subrasante*. Perú: Repositorio Universidad Señor de Sipán.
- MTC. (2014). *Manual de carreteras, Suelos Geología, Geotécnia y Pavimentos. Sección de suelos y pavimentos*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- MTC (2015). *Manual de carreteras, Especificaciones Tecnicas Generales para Construcción*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- MTC. (2015). *Documento Técnico, Soluciones Básicas en Carreteras No Pavimentadas*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- MTC. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- MTC. (2018). *Manual de carreteras, diseño geométrico*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.



- MVSA. (2021). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima, Perú.
- MVSA. (2011). *Metrados para obras de edificación y habilitaciones urbanas*. Lima, Perú: Dirección Nacional de Construcción.
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., & Romero, H. (2018). *Metodología de la investigación* (5a. edición ed.). Colombia: Ediciones de la U.
- Ocon, I. (2013). *Influencia del índice plástico en el contenido óptimo de humedad en suelos arcillosos*. Cajamarca, Peru: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Osorio, D. (2009). *Estudios comparativos del análisis físico, mecánico, químico, y petrográfico del agregado fino natural (del río villalobos) y del agregado fino de trituración (de la roca zona 18) en morteros de mampostería de acuerdo a la norma ASTM C-270 "Standard spe"*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Palella, S., & Martins, F. (2010). *Metodología de la investigación cuantitativa* (3a ed.). Caracas -Venezuela: FEDUPEL.
- Paudel, K., Prasad, A., & Bahadur, D. (2019). *Correlation of California Bearing Ratio with Index Properties of Sub-Grade Soil: A Case Study On Thankot Chitlang Road Section*. Proceedings of IOE Graduate Conference, 7, 85-89.
- Quispe, E. (2024). *Análisis de la influencia de la adición de polvo de ladrillos reciclados en la capacidad de soporte de la subrasante en carreteras rurales de la Provincia de Puno*. Juliaca, Puno: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.
- Quispe, J. (2020). *Estabilización de subrasante mediante uso de residuos de construcción y demolición - Jirón Amazonas Distrito De Chilca*. Huancayo, Perú: UNCP.
- Quispe, M., & Rivera, E. (2019). *Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica*. Lima, Perú. Repositorio: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Raa B, D. (2016). *Stabilization Of Pavement Material Using Waste Brick Kiln Dust*. International Journal of Engineering Research and Technology, 20(8), 578-585.
- Rahman, I., Raheel, M., Ali, M., Khan, R., Li, J., Khan, A., & Khan, M. (2021). *Characterization of engineering properties of weak subgrade soils with different*



- pozzolanic & cementitious additives*. *Case Studies in Construction Materials*, 15(e00676).
- RNE. (2011). *Componentes de Diseño Urbano*. Peru: Norma GH.020.
- RNE. (2010). *Pavimentos Urbanos*. Perú: Norma CE.010.
- RNE. (2012). *Suelos y Taludes*. Perú: Norma CE.020.
- Revolorio, F. (2013). *Incidencia de resultados del ensayo proctor por la influencia de clima, humedad, equipo y superficie de base de compactacion durante su desarrollo*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rezabala, D., & Ortiz, E. (2023). *Propuesta de estabilización con cal y cemento para subrasante con presencia de suelos arcillosos ubicada en la vía Tosagua - Chone sector Bachillero*. *Dominio de las Ciencias*, 9(3), 1918-1935.
- Rivera, J., Aguirre, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). *Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)*. *Dialnet*, 84(2), 202-226.
- Rojas, A. (2017). *Investigación e Innovación Metodológica*.
- Sánchez, F. (2019). *Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos*. *Rev. Digit. Invest. Docencia Univ.*, 13(1).
- Saquina, B. (2019). *Implementacion del proceso de conservacion de la estructura de la capa de rodadura de la via Cevallos - Mocha en el tramo Km 4+960 hasta km 9+920 de la Provincia de Tungurahua*. Ambato: Universidad Tecnica de Ambato.
- Sharifah, Z., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A., Binhussain, M., & Siti Salwa, M. (2013). *Review on Soil Stabilization Techniques*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(5), 258-265.
- Silva, Y., & Delvasto, S. (2021). *Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes*. *Informador Técnico*, 85(1), 20-33.
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Estados Unidos: Oxford university press.



- Srikanth, S., Prasad, A., & Vamsi, N. (2018). *Mezcla de polvo de ladrillo y suelo de algodón negro estabilizado con cal como material de subbase*.
- Tacca, J. (2021). *Estabilización de suelo arcilloso con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, Vía de evitamiento, Abancay-Apurimac, 2021*. Repositorio Universidad Cesar Vallejo.
- Torfi, S., Khayat, N., & Horpibulsuk, S. (2021). *Sustainable Stabilization of Compacted Clay Using Sodium Alginate for Subgrade Application*. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(82).
- Vakili, A., Salimib, M., & Shamsi, M. (2021). *Aplicación del ensayo del penetrómetro de cono dinámico para la determinación de las características geotécnicas de suelos margosos tratados con cal*. *Heliyon*, 7(9).
- Velásquez, L. (2013). *Prueba de Hipótesis para muestras pequeñas*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- VICH S.A. (2005). *Manual de diseño geométrico de vías urbanas*. Lima, Perú.
- Villalta, J., & Chang, E. (2020). *Estudio experimental de las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia de suelos arcillosos mediante el uso de puzolana natural, polvo de ladrillo y goma guar en San Cristóbal-Huancavelica*. Lima, Perú: UPC.
- Vinuesa, P. (2016). *Correlación: teórica y práctica*. Centro de Ciencias Genómicas - UNAM.
- West, J. (2015). *The role of ground improvement in foundation engineering*. *Inst. Civ. Eng.*, 25(1), 71-78.



ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

Anexo 2. Panel fotográfico.

Anexo 3. Perfil estratigráfico de los puntos de investigación.

Anexo 4. Especificaciones técnicas de los agentes estabilizantes.

Anexo 5: Resultados de laboratorio de mecánica de suelos y materiales.

Anexo 6. Normativa para ensayo de durabilidad.

Anexo 7. Certificados de laboratorio.

Anexo 8. Cálculo de proporciones de materiales de estabilización.

Anexo 9. Estudio de tráfico para cálculo de ESAL.

Anexo 10. Diseño de pavimento rígido en zona urbana.

Anexo 11. Planos.

Anexo 12. Expedientes técnicos de incidencia.

Anexo 13. Cálculo costo hora – hombre.

Anexo 14. Hoja de cotizaciones.

Anexo 15. Rendimientos y metrados.

Anexo 16. Presupuesto de mejoramiento de subrasante.

Anexo 17. Análisis de costos unitarios a nivel de subrasante.

Anexo 18. Glosario de términos.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo CHRISTIAN ROBER CHUQUICALLATA ZAPANA,
identificado con DNI 73768891 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA SUBRA-
SANTE CON LA ADICIÓN DE CALY RESIDUOS DE ALBAÑILERÍA PARTICULADO EN
SUELOS ARCILLOSOS DE LA AV. LOS VIRREYES, JULIACA - 2023”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 01 de JULIO del 2025

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo CHRISTIAN ROGER CHUQUICALLATA ZAPANA,
identificado con DNI _____ en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE
CON LA ADICIÓN DE CAL Y RESIDUOS DE ALBAÑILERÍA PARTICULADO
EN SUELOS ARCILLOSOS DE LA AV. LOS VIRREYES, JULIACA - 2023”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 01 de JULIO del 2025

FIRMA (obligatoria)



Huella