

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO
REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN
PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024**

PRESENTADO POR:

Br. DIEGO ROYERO MONTEAGUDO
CHECCA

Br. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

Dr. Ing. JOSE FELIPE MARIN LOAYZA

CUSCO - PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor Dr. Ing. José Felipe Marín Loayza** quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI – 2024”**

Presentado por: **DIEGO ROYERO MONTEAGUDO CHECCA** con DNI N°: **74655088**

Presentada por: **JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN** con DNI N°: **75062975**

Para optar al título profesional/grado académico de **INGENIERO CIVIL**.

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de **5%**.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con una (X)
Del 1 al 10 %	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 25 de mayo del 2026

Firma

Post firma: **Dr. Ing. José Felipe Marín Loayza**

DNI N°: **23837555**

ORCID del Asesor: **0000-0002-0871-5946**

Se adjunta:

1. Reporte Generado por el sistema Anti plagio
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Anti plagio: oid: **27259:594539662**

DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI -2024

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:594539662

Fecha de entrega

25 may 2026, 4:33 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

25 may 2026, 4:45 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS FINAL_DRMC_JJRG_V_25.pdf

Tamaño del archivo

23.5 MB

357 páginas

69.011 palabras

390.402 caracteres




5% 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 15 palabras)

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación, en primer lugar, a Dios fuente de toda sabiduría y verdad, a mis padres cuyo amor, sacrificio y confianza inquebrantables han sido el cimiento sobre el que he construido cada uno de mis pasos académicos y personales. A mis hermanos, por su cariño y apoyo incondicional en todo momento. Finalmente, a todas las personas que, con su apoyo, me recordaron que ningún reto es demasiado grande cuando se cuenta con buenos aliados. Gracias por ser parte de este logro.

Jorge Jhaffet Ramirez Guillen

Dedico este trabajo de investigación a Dios, a la Virgen del Carmen, a mi querida madre, Rosa V. Checca Miche y a mi hermano Oliver L. Monteagudo Checca, por su amor incondicional, fortaleza y apoyo constante. Ustedes han sido mi mayor inspiración y la motivación necesaria para culminar esta etapa. Asimismo, dedico esta tesis con orgullo y cariño a toda la familia Checca, por ser un ejemplo de unidad, perseverancia y valores que me enorgullecen profundamente. Y finalmente, a mi padre, porque aún en la distancia, el tiempo me permitió comprender muchas de sus decisiones y valorar, desde otra perspectiva, su presencia en mi vida

Diego Royeyro Monteagudo Checca

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por brindarme la formación académica, los valores y el espacio necesario para desarrollar esta investigación, fortaleciendo así mi vocación profesional. Expreso mi especial gratitud al Dr. Ing. José Felipe Marín Loayza, por su valiosa guía, paciencia, compromiso a lo largo de todo el proceso, siendo un pilar fundamental en la culminación de este trabajo. Asimismo, agradezco a mis padres y hermanos, por su amor incondicional, sacrificio y respaldo permanente en cada etapa de mi vida. A mis amigos, compañeros y seres queridos, gracias por su compañía, motivación y apoyo constante, que hicieron posible este objetivo.

Jorge Jhaffet Ramirez Guillen

Expreso mi sincero agradecimiento a mi alma mater, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por haberme brindado la formación profesional y las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación. Agradezco de manera especial al Dr. Ing. José Felipe Marín Loayza, por su orientación, paciencia y apoyo durante el proceso. Asimismo, mi profunda gratitud a la familia Checca por su constante respaldo y comprensión. Finalmente, agradezco a mis compañeros, amigos y familiares por su apoyo y colaboración a lo largo de este desafío.

Diego Royeyro Monteagudo Checca

Resumen

La tesis evalúa el uso de material celular ligero (MCL) como alternativa al material granular en la base de pavimentos flexibles en el tramo Sicuani–Sencca Chectuyoc (2024). Su objetivo es determinar la capacidad de soporte, el módulo de elasticidad y los espesores estructurales, comparando ambos materiales bajo un enfoque cuantitativo y diseño cuasiexperimental. Se analizaron 255 muestras mediante ensayos de caracterización de suelos y resistencia a la compresión.

Los resultados muestran que al incrementar la densidad del MCL (400 a 800 kg/m³) mejoran la capacidad de soporte y el módulo de elasticidad, lo que permite reducir los espesores de la base y la carpeta asfáltica. La base granular convencional presenta el menor desempeño (CBR 100 %, 3,39 kgf/cm² y 207 MPa), requiriendo mayores espesores y un costo de S/ 1,303,750 por km.

El MCL a 400 kg/m³ mejora las propiedades mecánicas y reduce costos (S/ 1,175,055 por km). A 500 kg/m³ se incrementa significativamente la capacidad, aunque con mayor costo. La condición óptima se alcanza a 600 kg/m³, con 15,02 kgf/cm² y 642 MPa, permitiendo menores espesores (250 mm base y 150 mm asfalto) y un costo equilibrado de S/ 1,177,242.50 por km. Densidades mayores mejoran las propiedades, pero no resultan económicamente eficientes.

Se concluye que el MCL, especialmente a 600 kg/m³, es una alternativa viable y eficiente que optimiza el diseño estructural y reduce costos en pavimentos flexibles.

Palabras clave: Material celular, Tráfico, Carga vehicular, Densidad, CBR

Abstract

This thesis evaluates the use of lightweight cellular material (LCM) as an alternative to granular material in the base layer of flexible pavements along the Sicuani–Sencca Chectuyoc section (2024). The objective is to determine the bearing capacity, modulus of elasticity, and structural layer thickness by comparing both materials under a quantitative approach with a quasi-experimental design. A total of 255 samples were analyzed through soil characterization and compressive strength tests.

The results show that increasing the density of LCM (from 400 to 800 kg/m³) improves both bearing capacity and modulus of elasticity, allowing a reduction in base and asphalt layer thicknesses. Conventional granular base exhibits the lowest performance (CBR 100%, 3.39 kgf/cm², and 207 MPa), requiring greater thicknesses and a cost of S/ 1,303,750 per kilometer.

At 400 kg/m³, LCM improves mechanical properties and reduces costs (S/ 1,175,055 per km). At 500 kg/m³, bearing capacity increases significantly but with higher cost. The optimal condition is achieved at 600 kg/m³, reaching 15.02 kgf/cm² and 642 MPa, with reduced thicknesses (250 mm base and 150 mm asphalt) and a balanced cost of S/ 1,177,242.50 per km. Higher densities improve properties but are not cost-efficient.

It is concluded that LCM, particularly at 600 kg/m³, is a viable and efficient alternative that optimizes structural design and reduces costs in flexible pavements.

Keywords: Cellular material, Traffic, Vehicular load, Density, CBR

Introducción

Las carreteras en mal estado constituyen un desafío de gran envergadura tanto a nivel mundial como nacional y local, con impactos directos en la seguridad vial, el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental. Diversos estudios han documentado que una parte importante de la red vial mundial presenta algún grado de deterioro, lo que se traduce en mayores tasas de accidentes, demoras en el transporte de mercancías y sobrecostos operativos para las economías nacionales (OMS). En Europa, la presencia de suelos arcillosos y limosos de alta plasticidad agrava este escenario al ofrecer baja capacidad portante y reducido módulo resiliente, fenómenos que favorecen asentamientos diferenciales y fisuración prematura de los pavimentos bajo cargas repetidas y ciclos de congelación–deshielo (PNUMA, 2022).

En el Perú, cerca del 30 % de las carreteras se encuentra en condiciones precarias, afectando especialmente a regiones montañosas como Puno, Huancavelica y Cusco. En el caso de la ciudad de Cusco, los suelos de origen arcilloso y aluvial, combinados con precipitaciones intensas y tráfico vehicular pesado, predisponen a la infraestructura vial a un rápido agotamiento estructural; la infiltración reduce la cohesión del suelo, incrementa la erosión y facilita la aparición de grietas y baches que requieren mantenimientos frecuentes y costosos (MTC Provias Nacional, 2021). Asimismo, dentro del ámbito territorial de Sicuani, las condiciones urbanas y de desarrollo vial evidencian la necesidad de alternativas que mejoren el desempeño estructural de los pavimentos frente a las condiciones propias del entorno (Municipalidad Provincial de Canchis, 2022)

Para afrontar esta problemática se han ensayado técnicas de refuerzo de subrasante, tales como geotextiles, geomallas y estabilización química con cal o cemento, que, si bien mejoran la resistencia al corte, conllevan costos de implementación elevados y pueden presentar limitaciones medioambientales. Como alternativa innovadora, la incorporación de Material Celular Ligero, en adelante denominado MCL, en la capa de base de pavimentos flexibles. Éste ha mostrado potencial para aumentar la capacidad portante y el módulo de elasticidad sin incrementar significativamente los espesores estructurales, debido a su baja densidad, adecuada resistencia mecánica y comportamiento favorable frente al desempeño estructural de capas de pavimento (Ni et al., 2022).

En este contexto, la presente investigación se enfoca en evaluar experimentalmente el reemplazo del material granular por MCL en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani, identificando una densidad crítica que optimiza simultáneamente la capacidad de soporte, el módulo de elasticidad, los espesores de base y carpeta asfáltica, y analizando su viabilidad técnico-económica en función del desempeño estructural obtenido y del costo de inversión por

kilómetro de cada alternativa evaluada. Esta propuesta busca aportar evidencia técnica aplicable a las condiciones del tramo Sicuani–Sencca Chectuyoc de la Vía Longitudinal Nacional PE-3S, donde la optimización de materiales de base representa una necesidad tanto estructural como económica.

Finalmente, la presente tesis está estructurada de la siguiente forma:

Capítulo I: Se plantea el problema central identificado, así como los objetivos para poder proponer una respuesta y/o solución a esta problemática; asimismo, se cuenta con la delimitación y justificación del desarrollo de la investigación.

Capítulo II: Se recopilan antecedentes nacionales e internacionales y se presentan las bases teóricas utilizadas para el desarrollo y procedimientos de la investigación, contando con la identificación de variables, planteamiento de dimensiones e indicadores que permiten estudiar de forma más detallada y precisa las propiedades a analizar.

Capítulo III: Este capítulo contiene el diseño de la metodología de investigación, la delimitación de la población y unidades muestrales aplicadas para cada uno de los ensayos establecidos. También se cuenta con el desarrollo de todo el procedimiento llevado a cabo para la obtención de los datos que permiten dar paso a la interpretación de los resultados.

Capítulo IV: Se presentan los resultados producto del análisis de los datos.

Capítulo V: Se presentan las discusiones de los resultados respecto a las investigaciones planteadas por los autores utilizados en los antecedentes; asimismo, se presenta el aporte de la tesis de investigación al campo laboral y académico.

Capítulo VI: Se presentan las conclusiones de los resultados analizados.

Capítulo VII: Se presentan las recomendaciones y sugerencias para futuras investigaciones y aplicación de lo propuesto.

Capítulo VIII: Se presentan las fuentes bibliográficas utilizadas en la investigación.

Capítulo IX: Se presentan los anexos que contienen las hojas de cálculo, mapas, evidencias fotográficas y demás documentación que avala y garantiza el correcto desarrollo de la presente investigación.

Índice General

Portada.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Introducción	vi
Índice General	viii
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tablas	xxii
Índice de Anexos	xxvi
Capítulo I: Planteamiento del problema	27
1.1. Identificación del problema	27
1.2. Formulación del problema	28
1.2.1. Problema general	29
1.2.2. Problemas específicos.....	29
1.3. Justificación de la investigación.....	29
1.3.1. Justificación por relevancia.....	29
1.3.2. Justificación por viabilidad	30
1.3.3. Justificación económica	30
1.3.4. Justificación técnica	30
1.3.5. Justificación social.....	31
1.4. Objetivos de la investigación.....	31
1.4.1. Objetivo general	31
1.4.2. Objetivos específicos	31
1.5. Delimitación de la investigación	32
1.5.1. Delimitación temporal	32
1.5.2. Delimitación espacial	32
Capítulo II: Marco Teórico	34
2.1. Antecedentes	34
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	34
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	35
2.1.3. Antecedentes Locales	37
2.2. Bases teóricas.....	37

2.2.1. Concreto	37
2.2.1.1. Concreto ligero.....	39
2.2.1.2. Material celular.....	40
2.2.1.3. Material celular ligero	41
2.2.1.4. Normativa ACI aplicable al MCL.....	43
2.2.1.5. Elasticidad y módulo de elasticidad	44
2.2.2. Suelos.....	45
2.2.2.1. Granulometría.....	45
2.2.2.2. Plasticidad	46
2.2.2.3. Máxima Densidad Seca	49
2.2.2.3.1. Compactación	50
2.2.2.3.2. Importancia en Pavimentos.....	51
2.2.2.3.3. Pruebas de Densidad.....	51
2.2.2.3.4. Contenido de Humedad	52
2.2.2.3.5. Curva de Compactación	53
2.2.2.3.6. Efecto en la Estabilidad	54
2.2.2.3.7. Control de la Calidad.....	55
2.2.2.4. CBR.....	56
2.2.2.4.1. Evaluación de Capacidad de Carga	59
2.2.2.4.2. Diseño de Pavimentos	59
2.2.2.4.3. Comparación de Suelos	59
2.2.2.4.4. Relación con el Tráfico	59
2.2.2.4.5. Estabilidad	60
2.2.2.4.6. Mejora del CBR	60
2.2.2.5. Capacidad de Soporte.....	60
2.2.2.6. Módulo de Resiliencia.....	61
2.2.3. Vías y pavimentos.....	62
2.2.3.1. Tipos de vías	62
2.2.3.2. Vías asfaltadas.....	63
2.2.3.3. Capas de una vía asfaltada.....	64
2.2.3.3.1. Subrasante	65
2.2.3.3.2. Subbase	65
2.2.3.3.3. Base.....	65
2.2.3.3.4. Carpeta Asfáltica (Capa de rodadura).....	65

2.2.3.4.	Propiedades de la base.....	65
2.2.3.5.	Flexotracción	67
2.2.3.6.	Deformación vertical	67
2.2.3.6.1.	Causas de la deformación.....	67
2.2.3.6.2.	Efectos en el pavimento	68
2.2.3.6.3.	Relación con la flexotracción	68
2.2.3.6.4.	Respuesta de los materiales.....	68
2.2.3.6.5.	Medición y evaluación	68
2.2.3.6.6.	Importancia de la base.....	68
2.2.3.7.	Espesor de la base	69
2.2.3.8.	Adherencia.....	70
2.2.3.9.	Imprimación Asfáltica.....	71
2.2.3.10.	Vida útil de un pavimento.....	73
2.2.3.11.	Módulo o relación de Poisson	74
2.2.3.12.	Método de diseño AASHTO 93	74
2.2.3.13.	Método de diseño mecanístico-empírico en pavimentos	76
2.3.	Marco Conceptual.....	77
2.4.	Formulación de la hipótesis.....	78
2.4.1.	Hipótesis general	78
2.4.2.	Hipótesis específicas	78
2.5.	Variables	78
2.5.1.	Identificación de variables.....	78
Capítulo III:	Metodología de la Investigación	80
3.1.	Metodología de la investigación.....	80
3.1.1.	Método de investigación	80
3.1.2.	Enfoque de la investigación	80
3.1.3.	Tipo de investigación	80
3.1.4.	Nivel de investigación.....	81
3.1.5.	Diseño de investigación	81
3.1.5.1.	Diseño metodológico	81
3.1.5.2.	Diseño de ingeniería.....	82
3.1.6.	Población.....	83
3.1.6.1.	Descripción de la población	83
3.1.6.2.	Cuantificación de la población	83

3.1.7. Muestra	83
3.1.7.1. Descripción de la muestra	83
3.1.7.2. Cuantificación de la muestra	84
3.1.7.3. Método de muestreo	86
3.1.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	87
3.1.8.1. Técnica de recolección de datos.....	87
3.1.8.2. Instrumento de recolección de datos.....	87
3.2. Procedimiento de recolección de datos	89
3.2.1. Determinación de la zona de estudio	89
3.2.1.1. Ubicación de la zona de estudio.....	89
3.2.1.1.1. Ubicación geográfica.....	89
3.2.1.1.2. Ubicación geopolítica	89
3.2.1.1.3. Límites.....	89
3.2.1.2. Vías de acceso	90
3.2.1.3. Altitud	92
3.2.1.4. Extensión	92
3.2.2. Determinación del nivel de peligro de la zona.....	92
3.2.2.1. Levantamiento topográfico	93
3.2.2.2. Características físicas de la zona de estudio.....	94
3.2.2.2.1. Aspectos geomorfológicos.....	94
3.2.2.2.2. Pendiente.....	96
3.2.2.2.3. Aspectos geológicos	97
3.2.2.3. Análisis y sistematización de la información.....	99
3.2.2.3.1. Ponderación de las unidades geomorfológicas	100
3.2.2.3.2. Ponderación de la pendiente	102
3.2.2.3.3. Ponderación de las unidades litológicas.....	103
3.2.2.3.4. Valores ponderados.....	104
3.2.2.3.5. Ponderación de los aspectos físicos.....	105
3.2.2.3.6. Estratificación del nivel de peligro	106
3.2.3. Estudio de tráfico	108
3.2.3.1. Cronograma de campo.....	109
3.2.3.2. Cálculos para hallar el promedio diario anual (IMD)	110
3.2.3.3. Conteo vehicular de 24 horas.....	111
3.2.3.4. Resultados del conteo vehicular	112

3.2.3.5. Proyección del tráfico	117
3.2.4. Elaboración de calicatas	118
3.2.4.1. Ensayo de Granulometría	124
3.2.4.2. Ensayo de Índice de plasticidad.....	125
3.2.4.3. Ensayo de Proctor modificado.....	126
3.2.4.4. Ensayo de CBR	127
3.2.4.5. Módulo de resiliencia.....	128
3.2.4.6. Módulo de elasticidad.....	128
3.2.5. Caracterización de suelo de subrasante	128
3.2.5.1. Granulometría de la subrasante del suelo	128
3.2.5.2. Límites de consistencia de subrasante	130
3.2.5.3. Clasificación de suelos	131
3.2.5.4. Máxima Densidad Seca de la Subrasante.....	132
3.2.5.5. CBR de la subrasante	133
3.2.5.6. CBR de diseño	134
3.2.5.7. Cálculo del módulo de resiliencia.....	135
3.2.5.8. Resultados de propiedades de la subrasante.....	136
3.2.6. Caracterización de material granular de cantera.....	137
3.2.6.1. Evaluación físico-mecánica del material granular convencional	137
3.2.6.2. Evaluación del material granular frente a su posible uso en subbase y base	138
3.2.6.3. Determinación de la capa de base como unidad de estudio	139
3.2.7. Obtención de material celular ligero	141
3.2.7.1. Diseño de mezcla de material celular ligero	141
3.2.7.2. Proceso de elaboración de muestras de MCL	146
3.2.7.2.1. Aditivo espumógeno empleado	146
3.2.7.2.2. Generación de espuma.....	146
3.2.7.2.3. Preparación de matriz cementante.....	147
3.2.7.2.4. Incorporación de espuma y mezclado	147
3.2.7.2.5. Moldeo de especímenes de MCL.....	147
3.2.7.2.6. Curado de especímenes.....	147
3.2.7.3. Ensayo de densidad de las muestras de MCL.....	148
3.2.7.4. Ensayo de resistencia a la compresión	149

3.2.7.5. Determinación de las deformaciones en especímenes de MCL151	
3.2.7.6. Obtención de gráficas esfuerzo deformación	152
3.2.7.7. Determinación del módulo de elasticidad.....	161
3.2.8. Cálculo de ESALs.....	162
3.2.9. Diseño de pavimento flexible.....	170
3.2.9.1. Diseño de pavimento flexible usando la normativa AASHTO 93	170
3.2.9.2. Diseño de pavimento flexible bajo el enfoque empírico - mecanicista	182
3.2.9.3. Diseño de pavimento flexible para densidades de MCL	185
3.2.9.3.1. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 400 kg/m ³	186
3.2.9.3.2. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 500 kg/m ³	187
3.2.9.3.3. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 600 kg/m ³	187
3.2.9.3.4. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 700 kg/m ³	188
3.2.9.3.5. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 800 kg/m ³	189
3.2.10. Análisis de costo de inversión por kilómetro	190
3.2.11. Análisis comparativo.....	192
3.2.11.1. Comportamiento estructural a nivel de base	192
3.2.11.1.1. Capacidad de soporte de la base.....	192
3.2.11.1.2. Módulo de elasticidad de la base	193
3.2.11.1.3. Espesor de la base	193
3.2.11.2. Carpeta asfáltica	193
3.2.11.2.1. Espesor de la carpeta asfáltica.....	194
Capítulo IV: Resultados.....	195
4.1. Resultados respecto al objetivo específico 01	195
4.2. Resultados respecto al objetivo específico 02	196
4.3. Resultados respecto al objetivo específico 03	197
4.4. Resultados respecto al objetivo específico 04	198
4.5. Resultados respecto al objetivo específico 05	199

4.6.	Resultados respecto al objetivo general	201
Capítulo V:	Discusiones.....	204
5.1.	Contraste de los resultados obtenidos respecto a los antecedentes	204
5.2.	Interpretación de los resultados encontrados en la investigación	206
5.3.	Comentario de la demostración de la hipótesis.....	206
5.4.	Aporte de la investigación	208
Capítulo VI:	Conclusiones	209
6.1.	Conclusiones respecto al objetivo específico 01.....	209
6.2.	Conclusiones respecto al objetivo específico 02.....	209
6.3.	Conclusiones respecto al objetivo específico 03.....	209
6.4.	Conclusiones respecto al objetivo específico 04.....	209
6.5.	Conclusiones respecto al objetivo específico 05.....	209
6.6.	Conclusiones respecto al objetivo general	210
Capítulo VII:	Recomendaciones y aplicaciones prácticas	211
7.1.	Recomendaciones respecto a la investigación.....	211
7.1.1.	Recomendaciones respecto al resultado específico 01.....	211
7.1.2.	Recomendaciones respecto al resultado específico 02.....	211
7.1.3.	Recomendaciones respecto al resultado específico 03.....	211
7.1.4.	Recomendaciones respecto al resultado específico 04.....	211
7.1.5.	Recomendaciones respecto al resultado específico 05.....	211
7.1.6.	Recomendaciones respecto al resultado general	212
7.2.	Sugerencias	212
Capítulo VIII:	Referencias bibliográficas	214
Capítulo IX:	Anexos	224

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Ubicación y mapa de peligros del distrito de Sicuani</i>	33
Figura 2. <i>Concreto utilizado en pavimentos</i>	39
Figura 3. <i>Concreto ligero con perlita</i>	40
Figura 4. <i>Material celular – espuma rígida de poliuretano</i>	41
Figura 5. <i>Material celular ligero</i>	43
Figura 6. <i>Curva Esfuerzo - Deformación</i>	45
Figura 7. <i>Curva Granulométrica</i>	46
Figura 8. <i>Límite Líquido</i>	47
Figura 9. <i>Gráfico de plasticidad de los suelos</i>	48
Figura 10. <i>Curva densidad seca - humedad de compactación</i>	54
Figura 11. <i>Configuración típica del pavimento flexible</i>	57
Figura 12. <i>Equipo CBR para ensayo in laboratorio</i>	57
Figura 13. <i>Grafica de la curva esfuerzo vs penetración</i>	59
Figura 14. <i>Deformación vertical de pavimento por carga vehicular</i>	69
Figura 15. <i>Diagrama de flujo del proceso experimental</i>	82
Figura 16. <i>Ubicación del área de influencia de la zona de estudio</i>	90
Figura 17. <i>Vías de acceso de la ciudad del Cusco al distrito de Sicuani</i>	91
Figura 18. <i>Vías de acceso de distrito de Sicuani Al Grifo Dorado SAC</i>	91
Figura 19. <i>Vías de acceso del grifo Dorado SAC a la zona de estudio</i>	92
Figura 20. <i>Mapa topográfico de la zona de estudio</i>	93
Figura 21. <i>Geomorfología de la zona de estudio</i>	95
Figura 22. <i>Pendiente de la zona de estudio</i>	97
Figura 23. <i>Litología de la zona de estudio</i>	99
Figura 24. <i>Flujograma para el análisis de la información</i>	99
Figura 25. <i>Zonificación del nivel de peligrosidad</i>	108
Figura 26. <i>Ubicación de Estación de Conteo</i>	109
Figura 27. <i>Variaciones diarias tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani</i>	114
Figura 28. <i>Clasificación Vehicular tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani</i>	115
Figura 29. <i>Variación Horaria tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani</i>	116
Figura 30. <i>Número de calicatas para exploración de suelos</i>	119
Figura 31. <i>Plano de calicatas elaboradas</i>	120
Figura 32. <i>Calicata 1</i>	121
Figura 33. <i>Calicata 2 y calicata 3</i>	121

Figura 34. <i>Calicata 4 y calicata 5</i>	122
Figura 35. <i>Calicata 6 y calicata 7</i>	122
Figura 36. <i>Calicata 8 y calicata 9</i>	123
Figura 37. <i>Calicata 10 y calicata 11</i>	123
Figura 38. <i>Replanteo y perforación de calicata C-1</i>	124
Figura 39. <i>Verificación de profundidad de perforación y muestreo de calicata C-1</i>	124
Figura 40. <i>Gráfica Percentil vs CBR</i>	134
Figura 41. <i>Composición del material celular ligero:</i>	142
Figura 42. <i>Determinación de la masa del material celular ligero</i>	148
Figura 43. <i>Ensayo de resistencia a la compresión del MCL</i>	150
Figura 44. <i>Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 400 kg/m³</i>	154
Figura 45. <i>Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 500 kg/m³</i>	156
Figura 46. <i>Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 600 kg/m³</i>	157
Figura 47. <i>Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 700 kg/m³</i>	159
Figura 48. <i>Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 800 kg/m³</i>	161
Figura 49. <i>Cuadro 6.3 Relación de cargas por eje para determinar ejes equivalentes (EE) para afirmado, pavimentos flexibles y semirrígidos</i>	163
Figura 50. <i>Factor Camión para un vehículo B-2</i>	163
Figura 51. <i>Factor Camión para un vehículo B3-1</i>	164
Figura 52. <i>Factor Camión para un vehículo C2</i>	164
Figura 53. <i>Factor Camión para un vehículo C3</i>	164
Figura 54. <i>Factor Camión para un vehículo C4</i>	164
Figura 55. <i>Factor Camión para un vehículo T2S3</i>	165
Figura 56. <i>Factor Camión para un vehículo T3S1</i>	165
Figura 57. <i>Factor Camión para un vehículo T3S3</i>	165
Figura 58. <i>Factor Camión para un vehículo C2R2</i>	165
Figura 59. <i>Factor Camión para un vehículo C3R2</i>	166
Figura 60. <i>Factor Camión para un vehículo C3R3</i>	166
Figura 61. <i>Factor Camión para un vehículo C4R2</i>	166
Figura 62. <i>Cuadro 6.1 Factores de distribución direccional y de carril para determinar el tránsito en el carril de diseño</i>	167
Figura 63. <i>Cuadro 6.13 Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) para ejes equivalentes (EE)</i>	168

Figura 64. Cuadro 12.6 Valores recomendados de nivel de confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de tráfico.....	171
Figura 65. Cuadro 12.8 Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal (Z_r) para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según el nivel de confiabilidad seleccionado y el rango de tráfico	171
Figura 66. Cuadro 12.10 Índice de serviciabilidad inicial (P_i) según rango de tráfico	173
Figura 67. Cuadro 12.11 Índice de serviciabilidad final (P_t) según rango de tráfico	173
Figura 68. Cuadro 12.12 Diferencia de serviciabilidad (Δ PSI) según rango de tráfico.....	174
Figura 69. Cuadro 12.13 Coeficientes estructurales de las capas del pavimento a_i	175
Figura 70. Cuadro 12.14 Calidad del Drenaje.....	176
Figura 71. Cuadro 12.15 Valores recomendados del coeficiente de drenaje m_i para bases y subbases granulares no tratadas en pavimentos flexibles.....	177
Figura 72. Cuadro 12.17 Valores recomendados de espesores mínimos de capa superficial y base granular	178
Figura 73. Espesores de capas del pavimento	180
Figura 74. Geometría del semieje de carga sobre el pavimento	181
Figura 75. Verificación por fatiga y deformación permanente	184
Figura 76. Verificación por fatiga y deformación permanente del replanteo de espesores. .	184
Figura 77. Espesores finales de las capas del pavimento.....	185
Figura 78. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 400 kg/m ³	186
Figura 79. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 400 kg/m ³ optimizado	186
Figura 80. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 500 kg/m ³	187
Figura 81. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 600 kg/m ³	187
Figura 82. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 600 kg/m ³ optimizado	188
Figura 83. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 700 kg/m ³	188
Figura 84. Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 800 kg/m ³	189
Figura 85. Espesores finales de las capas del pavimento con MCL.....	190
Figura 86. Resumen de capacidad de soporte de la base del pavimento.....	195
Figura 87. Resumen de módulo de elasticidad de la base del pavimento.....	196
Figura 88. Resumen de espesor más favorable de la base del pavimento	197
Figura 89. Resumen de espesor más favorable de la carpeta asfáltica.....	199
Figura 90. Resumen de comparación del costo de inversión por kilómetro.....	200

Figura 91. <i>Resumen de análisis experimental del MCL como reemplazo del material granular</i>	202
Figura 92. <i>Vía de Estudio</i>	241
Figura 93. <i>Vía de Estudio</i>	241
Figura 94. <i>Vía de Estudio</i>	241
Figura 95. <i>Vía de Estudio</i>	241
Figura 96. <i>Vía de Estudio</i>	241
Figura 97. <i>Exploración de Calicatas</i>	241
Figura 98. <i>Excavación de calicatas con maquinaria</i>	242
Figura 99. <i>Exploración de calicatas</i>	242
Figura 100. <i>Exploración de calicatas</i>	242
Figura 101. <i>Exploración de calicatas</i>	242
Figura 102. <i>Determinación de cantera - Chihuaco</i>	242
Figura 103. <i>Caracterización de cantera Chihuaco</i>	242
Figura 104. <i>Determinación de cantera - Chihuaco</i>	243
Figura 105. <i>Visualización de perfil de cantera Chihuaco</i>	243
Figura 106. <i>Toma de muestras de cantera - Chihuaco</i>	243
Figura 107. <i>Toma de muestras de cantera Chihuaco</i>	243
Figura 108. <i>Secado de material extraído</i>	243
Figura 109. <i>Ensayo de granulometría</i>	243
Figura 110. <i>Pesado de muestras correspondientes</i>	244
Figura 111. <i>Secado de muestras extraídas</i>	244
Figura 112. <i>Pesado de muestras secas</i>	244
Figura 113. <i>Ensayo Granulométrico por tamizado</i>	244
Figura 114. <i>Ensayo Granulométrico por tamizado</i>	244
Figura 115. <i>Ensayo de granulometría</i>	244
Figura 116. <i>Tamices utilizados en el ensayo</i>	245
Figura 117. <i>Instrumentos de laboratorio</i>	245
Figura 118. <i>Calibración de equipos</i>	245
Figura 119. <i>Equipos para el ensayo de Limite Plástico</i>	245
Figura 120. <i>Trabajos con muestra para el ensayo LP</i>	245
Figura 121. <i>Ensayo de granulometría</i>	245
Figura 122. <i>Colocación de muestras para pesado</i>	246
Figura 123. <i>Pesado de muestras ensayadas</i>	246

Figura 124. <i>Instrumentos para ensayo L. Líquido</i>	246
Figura 125. <i>Trabajos para el ensayo de L. Líquido</i>	246
Figura 126. <i>Saturación de muestras con probeta</i>	246
Figura 127. <i>Muestras ensayadas a pesarse</i>	246
Figura 128. <i>Trabajos de laboratorio para el ensayo LL</i>	247
Figura 129. <i>Ensayo empleando el método de Casagrande</i>	247
Figura 130. <i>Muestras a ser secadas en Horno</i>	247
Figura 131. <i>Secado de muestras en horno</i>	247
Figura 132. <i>Tamizado de muestras para E. de Proctor</i>	247
Figura 133. <i>Muestra a ser ensayada</i>	247
Figura 134. <i>Saturación de muestras con probeta graduada</i>	248
Figura 135. <i>Compactación de muestra con el martillo</i>	248
Figura 136. <i>Instrumentos de laboratorio para P.M.</i>	248
Figura 137. <i>Enrase de muestra</i>	248
Figura 138. <i>Peso de molde y muestra</i>	248
Figura 139. <i>Compactación de muestra por capas</i>	248
Figura 140. <i>Pesado de molde y muestra compactada</i>	249
Figura 141. <i>Muestras para ser secadas en el horno</i>	249
Figura 142. <i>Muestra para el ensayo CBR</i>	249
Figura 143. <i>Compactación de muestras con martillo</i>	249
Figura 144. <i>Enrase de muestra para CBR</i>	249
Figura 145. <i>Peso de muestra y molde de CBR</i>	249
Figura 146. <i>Preparación de muestras a ensayar</i>	250
Figura 147. <i>Sobrecargas instaladas y deformímetro</i>	250
Figura 148. <i>Muestras preparadas para ser saturadas</i>	250
Figura 149. <i>Lecturas de expansión de muestras</i>	250
Figura 150. <i>Drenaje de muestras</i>	250
Figura 151. <i>Equipo de penetración de muestras</i>	250
Figura 152. <i>Deformímetro en el ensayo de penetración</i>	251
Figura 153. <i>Carga aplicada para muestra ensayada</i>	251
Figura 154. <i>Verificación del ensayo en laboratorio</i>	251
Figura 155. <i>Caracterización del MCL</i>	251
Figura 156. <i>Mesa de trabajo para caracterización de MCL</i>	251
Figura 157. <i>Homogeneización de mortero</i>	251

Figura 158. <i>Homogeneización de mortero</i>	252
Figura 159. <i>Especímenes en probetas de 4" x 8"</i>	252
Figura 160. <i>Desencofrado de especímenes a los 28 días</i>	252
Figura 161. <i>Especímenes a ensayarse</i>	252
Figura 162. <i>Instalación de equipos para el ensayo</i>	252
Figura 163. <i>Ensayo de compresión con deformímetros</i>	252
Figura 164. <i>Muestra MCL y deformímetros</i>	253
Figura 165. <i>Rotura de muestra MCL</i>	253
Figura 166. <i>Retiro de muestras ensayadas</i>	253
Figura 167. <i>Composición interna MCL $\rho = 600\text{kg/m}^3$</i>	253
Figura 168. <i>Composición interna MCL $\rho = 400\text{kg/m}^3$</i>	253
Figura 169. <i>Composición interna MCL $\rho = 800\text{kg/m}^3$</i>	253
Figura 170. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-1</i>	254
Figura 171. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-2</i>	255
Figura 172. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-3</i>	256
Figura 173. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-4</i>	257
Figura 174. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-5</i>	258
Figura 175. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-6</i>	259
Figura 176. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-7</i>	260
Figura 177. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-8</i>	261
Figura 178. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-9</i>	262
Figura 179. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-10</i>	263
Figura 180. <i>Análisis de granulometría en la Calicata C-11</i>	264
Figura 181. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-1</i>	265
Figura 182. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-2</i>	266
Figura 183. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-3</i>	267
Figura 184. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-4</i>	268
Figura 185. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-5</i>	269
Figura 186. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-6</i>	270
Figura 187. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-7</i>	271
Figura 188. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-8</i>	272
Figura 189. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-9</i>	273
Figura 190. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-10</i>	274

Figura 191. <i>Máxima Densidad seca de la Calicata C-11</i>	275
Figura 192. <i>CBR de la Calicata C-1</i>	276
Figura 193. <i>CBR de la Calicata C-2</i>	278
Figura 194. <i>CBR de la Calicata C-3</i>	280
Figura 195. <i>CBR de la Calicata C-4</i>	282
Figura 196. <i>CBR de la Calicata C-5</i>	284
Figura 197. <i>CBR de la Calicata C-6</i>	286
Figura 198. <i>CBR de la Calicata C-7</i>	288
Figura 199. <i>CBR de la Calicata C-8</i>	290
Figura 200. <i>CBR de la Calicata C-9</i>	292
Figura 201. <i>CBR de la Calicata C-10</i>	294
Figura 202. <i>CBR de la Calicata C-11</i>	296
Figura 203. <i>Análisis de granulometría en la muestra M-1 del Talud T-1</i>	298
Figura 204. <i>Análisis de granulometría en la muestra M-2 del Talud T-1</i>	299
Figura 205. <i>Análisis de granulometría en la muestra M-3 del Talud T-1</i>	300
Figura 206. <i>Máxima Densidad seca de la muestra M-1 del Talud T-1</i>	301
Figura 207. <i>Máxima Densidad seca de la muestra M-2 del Talud T-1</i>	302
Figura 208. <i>Máxima Densidad seca de la muestra M-3 del Talud T-1</i>	303
Figura 209. <i>CBR de la muestra M-1 del Talud T-1</i>	304
Figura 210. <i>CBR de la muestra M-2 del Talud T-1</i>	306
Figura 211. <i>CBR de la muestra M-3 del Talud T-1</i>	308

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Tabla de recolección de datos para calcular el límite plástico</i>	48
Tabla 2. <i>Categoría de subrasante</i>	56
Tabla 3. <i>Penetraciones a ser leídas</i>	58
Tabla 4. <i>Presión de penetración</i>	58
Tabla 5. <i>Módulo o relación de Poisson</i>	74
Tabla 6. <i>Unidades muestrales de suelos a nivel de subrasante</i>	84
Tabla 7. <i>Unidades muestrales de material granular para base</i>	85
Tabla 8. <i>Unidades muestrales de MCL a nivel de base</i>	86
Tabla 9. <i>Vías de acceso a la zona de estudio</i>	91
Tabla 10. <i>Unidades Geomorfológicas</i>	94
Tabla 11. <i>Clasificación de pendientes</i>	96
Tabla 12. <i>Unidades Litológicas</i>	98
Tabla 13. <i>Descriptorios de las unidades geomorfológicas</i>	100
Tabla 14. <i>Matriz de comparación de pares para las unidades geomorfológicas</i>	101
Tabla 15. <i>Matriz de normalización de las unidades geomorfológicas</i>	101
Tabla 16. <i>Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de las unidades geomorfológicas</i>	101
Tabla 17. <i>Índice y relación de consistencia de las unidades geomorfológicas</i>	101
Tabla 18. <i>Descriptorios de la pendiente</i>	102
Tabla 19. <i>Matriz de comparación de pares para la pendiente</i>	102
Tabla 20. <i>Matriz de normalización de la pendiente</i>	102
Tabla 21. <i>Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de la pendiente</i>	103
Tabla 22. <i>Índice y relación de consistencia de la pendiente</i>	103
Tabla 23. <i>Descriptorios de las unidades litológicas</i>	103
Tabla 24. <i>Matriz de comparación de pares para las unidades litológicas</i>	103
Tabla 25. <i>Matriz de normalización de las unidades litológicas</i>	104
Tabla 26. <i>Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de las unidades litológicas</i>	104
Tabla 27. <i>Índice y relación de consistencia de las unidades litológicas</i>	104
Tabla 28. <i>Resumen de valores Ponderados</i>	104
Tabla 29. <i>Descriptorios de los aspectos físicos</i>	105
Tabla 30. <i>Matriz de comparación de pares para los aspectos físicos</i>	105
Tabla 31. <i>Matriz de normalización de los aspectos físicos</i>	105

Tabla 32. <i>Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de los aspectos físicos ..</i>	106
Tabla 33. <i>Índice y relación de consistencia de los aspectos físicos</i>	106
Tabla 34. <i>Matriz de cálculo de los niveles de peligro</i>	106
Tabla 35. <i>Rango de niveles de peligro</i>	106
Tabla 36. <i>Estratificación de los niveles de peligro</i>	107
Tabla 37. <i>Ubicación de las Estaciones de Conteo</i>	109
Tabla 38. <i>Cronograma de Campo</i>	110
Tabla 39. <i>Factor de Corrección Mensual - octubre 2017</i>	111
Tabla 40. <i>Resumen conteo semanal para todos los vehículos</i>	113
Tabla 41. <i>Resumen de conteo vehicular para vehículos ligeros y pesados</i>	114
Tabla 42. <i>Clasificación Vehicular tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani</i>	115
Tabla 43. <i>Variación Horaria tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani</i>	116
Tabla 44. <i>Proyección del Tráfico (2024-2034)</i>	118
Tabla 45. <i>Coordenadas de las Calicatas</i>	120
Tabla 46. <i>Porcentaje de agregado fino y grueso de las muestras de subrasante</i>	129
Tabla 47. <i>Índice de plasticidad de las muestras de la subrasante</i>	130
Tabla 48. <i>Clasificación del suelo de las muestras de la subrasante</i>	131
Tabla 49. <i>Máxima Densidad Seca del suelo de las muestras de la subrasante</i>	132
Tabla 50. <i>CBR del suelo de las muestras de la subrasante</i>	133
Tabla 51. <i>Percentil correspondiente a los CBR calculados</i>	134
Tabla 52. <i>Percentil de diseño de subrasante</i>	135
Tabla 53. <i>MR del suelo de las muestras de la subrasante</i>	135
Tabla 54. <i>Resultados promedio de las muestras de la subrasante</i>	137
Tabla 55. <i>Variabilidad de las características del suelo</i>	137
Tabla 56. <i>Resumen de resultados del material granular de cantera ensayado</i>	138
Tabla 57. <i>Resumen de materiales para una densidad de 400 kg/m³</i>	145
Tabla 58. <i>Resumen de materiales para una densidad de 500 kg/m³</i>	145
Tabla 59. <i>Resumen de materiales para una densidad de 600 kg/m³</i>	145
Tabla 60. <i>Resumen de materiales para una densidad de 700 kg/m³</i>	145
Tabla 61. <i>Resumen de materiales para una densidad de 800 kg/m³</i>	146
Tabla 62. <i>Densidad experimental para una densidad teórica de 400 kg/m³</i>	148
Tabla 63. <i>Densidad experimental para una densidad teórica de 500 kg/m³</i>	149
Tabla 64. <i>Densidad experimental para una densidad teórica de 600 kg/m³</i>	149
Tabla 65. <i>Densidad experimental para una densidad teórica de 700 kg/m³</i>	149

Tabla 66. <i>Densidad experimental para una densidad teórica de 800 kg/m³</i>	149
Tabla 67. <i>Resistencia a la compresión del MCL</i>	150
Tabla 68. <i>Deformaciones para el MCL de 400 kg/m³</i>	151
Tabla 69. <i>Deformaciones para el MCL de 500 kg/m³</i>	152
Tabla 70. <i>Deformaciones para el MCL de 600 kg/m³</i>	152
Tabla 71. <i>Deformaciones para el MCL de 700 kg/m³</i>	152
Tabla 72. <i>Deformaciones para el MCL de 800 kg/m³</i>	152
Tabla 73. <i>Carga y deformación del MCL de 400 kg/m³-M1</i>	153
Tabla 74. <i>Carga y deformación del MCL de 400 kg/m³-M2</i>	153
Tabla 75. <i>Carga y deformación del MCL de 400 kg/m³-M3</i>	153
Tabla 76. <i>Carga y deformación del MCL de 500 kg/m³-M1</i>	154
Tabla 77. <i>Carga y deformación del MCL de 500 kg/m³-M2</i>	155
Tabla 78. <i>Carga y deformación del MCL de 500 kg/m³-M3</i>	155
Tabla 79. <i>Carga y deformación del MCL de 600 kg/m³-M1</i>	156
Tabla 80. <i>Carga y deformación del MCL de 600 kg/m³-M2</i>	156
Tabla 81. <i>Carga y deformación del MCL de 600 kg/m³-M3</i>	157
Tabla 82. <i>Carga y deformación del MCL de 700 kg/m³-M1</i>	158
Tabla 83. <i>Carga y deformación del MCL de 700 kg/m³-M2</i>	158
Tabla 84. <i>Carga y deformación del MCL de 700 kg/m³-M3</i>	158
Tabla 85. <i>Carga y deformación del MCL de 800 kg/m³-M1</i>	159
Tabla 86. <i>Carga y deformación del MCL de 800 kg/m³-M2</i>	160
Tabla 87. <i>Carga y deformación del MCL de 800 kg/m³-M3</i>	160
Tabla 88. <i>Módulo de elasticidad para el MCL de 400 kg/m³</i>	161
Tabla 89. <i>Módulo de elasticidad para el MCL de 500 kg/m³</i>	162
Tabla 90. <i>Módulo de elasticidad para el MCL de 600 kg/m³</i>	162
Tabla 91. <i>Módulo de elasticidad para el MCL de 700 kg/m³</i>	162
Tabla 92. <i>Módulo de elasticidad para el MCL de 800 kg/m³</i>	162
Tabla 93. <i>Cálculo de Ejes Equivalentes por día por carril</i>	169
Tabla 94. <i>Número de Ejes Equivalentes</i>	169
Tabla 95. <i>Datos para diseño de pavimento</i>	180
Tabla 96. <i>Módulo de elasticidad de las capas del pavimento</i>	182
Tabla 97. <i>Módulo de elasticidad de las capas del pavimento para el MCL</i>	185
Tabla 98. <i>Inversión inicial para el material de base</i>	191
Tabla 99. <i>Resumen de capacidad de soporte de la base del pavimento</i>	195

Tabla 100. <i>Resumen de módulo de elasticidad de la base del pavimento</i>	196
Tabla 101. <i>Resumen de espesor más favorable de la base del pavimento</i>	197
Tabla 102. <i>Resumen de espesor más favorable de la carpeta asfáltica</i>	198
Tabla 103. <i>Resumen comparativo del costo de inversión por kilómetro</i>	200
Tabla 104. <i>Resumen de análisis experimental del MCL como reemplazo del material granular</i>	201
Tabla 105. <i>Volumen diario (lunes) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	229
Tabla 106. <i>Volumen diario (martes) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	230
Tabla 107. <i>Volumen diario (miércoles) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	231
Tabla 108. <i>Volumen diario (jueves) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	232
Tabla 109. <i>Volumen diario (viernes) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	233
Tabla 110. <i>Volumen diario (sábado) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	234
Tabla 111. <i>Volumen diario (domingo) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	235
Tabla 112. <i>Volumen semanal clasificado - Estación Grifo Dorado SAC</i>	236
Tabla 113. <i>Proyección del Tráfico (IMD)</i>	237

Índice de Anexos

Anexo 1. <i>Matriz de consistencia</i>	224
Anexo 2. <i>Matriz de operacionalización de variables</i>	225
Anexo 3. <i>Propuesta de diseño esquematizada</i>	226
Anexo 4. <i>Mapa Topográfico</i>	227
Anexo 5. <i>Mapa de Peligros</i>	228
Anexo 6. <i>Formatos de campo de conteo y clasificación vehicular</i>	229
Anexo 7. <i>Formato de proyección de crecimiento de tráfico vehicular</i>	237
Anexo 8. <i>Análisis de Precios Unitarios de base propuesta y base tradicional</i>	238
Anexo 9. <i>Panel Fotográfico</i>	241
Anexo 10. <i>Análisis Granulométrico y límites de consistencia de Subrasante</i>	254
Anexo 11. <i>Cálculo de la Máxima Densidad Seca y Contenido Óptimo de humedad de Subrasante</i>	265
Anexo 12. <i>Cálculo de CBR de Subrasante</i>	276
Anexo 13. <i>Análisis Granulométrico y límites de consistencia de material granular de cantera</i>	298
Anexo 14. <i>Cálculo de la Máxima Densidad Seca y Contenido Óptimo de humedad de material granular de cantera</i>	301
Anexo 15. <i>Cálculo de CBR de material granular de cantera</i>	304
Anexo 16. <i>Ficha Técnica de Agente Espumante para Hormigón Celulosa</i>	310
Anexo 17. <i>Certificados de calibración de equipos utilizados</i>	312

Capítulo I: Planteamiento del problema

1.1. Identificación del problema

Las carreteras en mal estado constituyen una problemática de alcance mundial, debido a que afectan directamente la seguridad vial, la conectividad territorial, la competitividad económica y la calidad de vida de la población. En numerosos países, el deterioro prematuro de los pavimentos flexibles se encuentra asociado no solo al incremento del tránsito vehicular, sino también al comportamiento deficiente de los materiales que conforman sus capas estructurales, especialmente cuando estos presentan limitaciones de capacidad portante, rigidez y durabilidad frente a condiciones de humedad y cargas repetidas. Esta situación genera deformaciones permanentes, fisuración, pérdida de serviciabilidad y mayores costos de conservación vial.

En distintas regiones del mundo, el uso de materiales granulares convencionales como capa de base en pavimentos flexibles ha demostrado limitaciones estructurales cuando se somete a condiciones de alta sollicitación por tráfico pesado y presencia de humedad. Estas capas suelen presentar pérdida progresiva de densidad, deformaciones permanentes y disminución de la rigidez estructural, factores que aceleran el agrietamiento de la carpeta asfáltica y la aparición de ahuellamientos. A ello se suma la variabilidad inherente de los agregados de cantera, tanto en granulometría como en calidad mecánica, lo que afecta la homogeneidad del comportamiento estructural del pavimento a lo largo de su trazo. En consecuencia, el desempeño del material granular tradicional puede resultar insuficiente para garantizar la durabilidad esperada, especialmente en zonas con tránsito mixto e intensas precipitaciones. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), más del 70 % de las carreteras a nivel mundial se encuentran en condiciones inapropiadas, lo que incrementa considerablemente el riesgo de accidentes de tránsito y la pérdida de vidas humanas. Asimismo, países como Alemania, Estados Unidos y Brasil enfrentan grandes pérdidas económicas debido al deterioro de las vías, con costos anuales que alcanzan cifras millonarias. En Canadá, la falta de inversión en la infraestructura vial, el mantenimiento insuficiente y el crecimiento del tráfico vehicular son algunos de los factores que contribuyen a la reducción de durabilidad y resistencia de los pavimentos; ello también se asocia al uso convencional de materiales granulares y a la presencia de suelos con baja capacidad portante (Gardiner, 2019).

Para mitigar estos problemas, se han explorado diversas soluciones técnicas. Entre ellas, el uso de materiales de refuerzo, como geotextiles y geomallas, que pueden mejorar la distribución de las cargas y aumentar la capacidad portante del suelo. Asimismo, la estabilización del suelo mediante la implementación de diversos aditivos químicos, como la

cal y el cemento, ha demostrado ser efectiva para incrementar la resistencia y reducir la plasticidad de los suelos problemáticos. Otra solución innovadora es la incorporación de materiales celulares ligeros en la base de los pavimentos flexibles. Estos materiales, debido a su baja densidad y alta resistencia, pueden reducir la presión sobre los suelos subyacentes y mejorar el rendimiento general de la estructura del pavimento. No obstante, se debe de llevar a cabo estudios experimentales y análisis de campo para validar la eficacia y durabilidad de estas soluciones en las diversas condiciones geotécnicas presentes en Europa (France, 2024).

Según datos del MTC y Provias Nacional (2021), en su artículo “estado de la superficie de rodadura de diciembre del 2021”, alrededor del 30% de las carreteras peruanas presentan condiciones precarias, lo que afecta adversamente la conectividad y movilidad de personas y bienes. Los departamentos más afectados por este problema incluyen Puno, Huancavelica y Cusco. Factores como la falta de mantenimiento adecuado, la erosión provocada por condiciones climáticas extremas y la insuficiencia de fondos para invertir en infraestructura vial contribuyen a esta situación a nivel nacional.

En el distrito de Sicuani, provincia de Canchis, región Cusco, las condiciones geográficas y climáticas representan un desafío constante para la infraestructura vial. La zona, atravesada por la carretera PE-3S perteneciente a la Red Vial Nacional, presenta suelos aluviales con alta presencia de finos y periodos prolongados de lluvias que generan humedad persistente y variaciones térmicas significativas. En el tramo correspondiente al centro poblado Sencca Chectuyoc se registra tránsito mixto con presencia recurrente de vehículos de carga pesada, lo que genera sollicitaciones dinámicas repetitivas sobre las capas estructurales del pavimento. Los materiales granulares provenientes de canteras locales, comúnmente empleados a nivel de base, presentan variabilidad en su composición y compactación, reduciendo su capacidad estructural frente al tráfico y la acción del agua. Estas condiciones, han derivado en un deterioro progresivo caracterizado por fisuración por fatiga, ahuellamientos, fracturas de borde y pérdida de uniformidad superficial, evidenciando la necesidad de optimizar el desempeño del material granular empleado en la base de los pavimentos flexibles.

1.2. Formulación del problema

El distrito de Sicuani es caracterizado por poseer vías asfaltadas en sus zonas principales, así como también condiciones geotécnicas desafiantes, es por ello que la infraestructura vial enfrenta problemas persistentes relacionados con el deterioro constante y la falta de eficiencia estructural. La implementación convencional de material granular en la base de los pavimentos presenta limitaciones en términos de optimización de espesores de las

capas estructurales, lo que afecta directamente la economía, la durabilidad y resistencia bajo cargas vehiculares. En este sentido, es necesario indagar sobre nuevos materiales que brinden un mejor comportamiento, tal es el caso en esta investigación que se propone el estudio del material celular ligero, puesto que se puede hacer uso de sus propiedades como beneficio vial estructural. Frente a todo lo expuesto anteriormente, se plantea las siguientes preguntas con las cuales se investigará los beneficios del material celular ligero al aplicarlo como material de base en las vías asfaltadas del distrito de Sicuani.

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto del reemplazo de material granular por material celular ligero en el comportamiento estructural a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en la capacidad de soporte a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?
- ¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en el valor del módulo de elasticidad a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?
- ¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en el espesor de la base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?
- ¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en el espesor de la carpeta asfáltica en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?
- ¿Cuál es la alternativa técnico-económica más favorable, en términos de costo de inversión por kilómetro, entre el uso de material celular ligero y material granular a nivel de base en pavimentos flexibles?

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación por relevancia

La limitada eficiencia estructural del material granular convencional utilizado en las capas de base de pavimentos flexibles constituye un factor determinante en la reducción de su durabilidad, especialmente bajo condiciones de tránsito pesado y humedad persistente. Esta situación genera deformaciones, fisuración y pérdida progresiva de capacidad de soporte, afectando la funcionalidad de la vía y elevando los costos de conservación. En este contexto,

el presente estudio plantea evaluar el comportamiento estructural del material celular ligero (MCL) como una alternativa técnica orientada a optimizar el desempeño de la capa de base y reducir la dependencia exclusiva de los agregados provenientes de canteras naturales. Además de su potencial estructural, el MCL representa una opción más sostenible al minimizar la explotación de canteras, disminuyendo el impacto ambiental asociado a la extracción de materiales pétreos. De esta manera, la investigación busca aportar conocimiento técnico aplicable a las condiciones del distrito de Sicuani, contribuyendo también a minimizar la recurrencia de fallas como fisuras, hundimientos y deformaciones.

1.3.2. Justificación por viabilidad

La investigación es viable técnica y operativamente, dado que se cuenta con la infraestructura necesaria para la ejecución de los ensayos experimentales de laboratorio orientados al análisis comparativo entre el material granular convencional y el material celular ligero (MCL). El estudio se desarrolla en el distrito de Sicuani, provincia de Canchis, región Cusco, específicamente en el sector Sencca Chectuyoc, zona representativa por su tránsito mixto y condiciones climáticas variables. Se dispone de recursos materiales y humanos adecuados para la toma de muestras, elaboración de probetas y ejecución de los ensayos físico-mecánicos requeridos. Asimismo, la disponibilidad local de materiales granulares y los componentes del MCL garantizan la factibilidad logística del proyecto, permitiendo la aplicación práctica de los resultados obtenidos en futuras intervenciones viales.

1.3.3. Justificación económica

Desde el punto de vista económico, la investigación busca demostrar que el uso del material celular ligero (MCL) como alternativa al material granular convencional puede contribuir a la optimización del diseño estructural del pavimento flexible, reduciendo los espesores requeridos y los costos de mantenimiento a largo plazo. La aplicación de un material de menor peso volumétrico y adecuado comportamiento mecánico podría disminuir la demanda de material granular extraído de canteras, generando ahorros tanto en transporte como en procesos de extracción y acondicionamiento. De esta manera, el empleo del MCL representa una alternativa económica y sostenible, que permite mejorar la eficiencia del gasto público destinado a la conservación de vías y al mismo tiempo mitigar el impacto ambiental asociado a la explotación de agregados naturales.

1.3.4. Justificación técnica

Desde el punto de vista técnico, la investigación se orienta a evaluar el desempeño estructural del material celular ligero (MCL) como alternativa al material granular convencional utilizado en la capa de base de pavimentos flexibles. En el distrito de Sicuani, las

canteras locales presentan materiales con elevada plasticidad y capacidad de soporte limitada, condiciones que dificultan alcanzar los parámetros mínimos requeridos para su empleo como base granular y generan variabilidad en el comportamiento del pavimento.

La capa de base es la más sensible a la calidad del material que la conforma, dado que cumple la función principal de distribuir las cargas hacia la subrasante. Por ello, cualquier deficiencia en sus propiedades físico-mecánicas afecta directamente la durabilidad y respuesta estructural del pavimento. En este contexto, resulta pertinente analizar alternativas como el MCL, cuyo proceso de fabricación controlado permite obtener propiedades más uniformes que las de los materiales naturales disponibles en la zona.

Bajo esta perspectiva, el estudio busca determinar si el MCL puede constituir una opción técnica viable para mejorar el desempeño de la capa de base en Sicuani, donde la disponibilidad de materiales granulares de calidad es limitada y se requiere explorar soluciones que optimicen la estabilidad y vida útil de los pavimentos flexibles.

1.3.5. Justificación social

Desde el punto de vista social, la investigación contribuye a la mejora de la transitabilidad y seguridad vial en el distrito de Sicuani, beneficiando a la población que depende de una infraestructura vial en condiciones óptimas para el transporte de bienes y personas. La aplicación del material celular ligero (MCL) como alternativa técnica en las capas de base puede disminuir los costos y tiempos de mantenimiento, garantizando la continuidad del servicio y la conectividad regional. Asimismo, la reducción de la extracción de agregados naturales promueve prácticas constructivas más sostenibles, que preservan el entorno paisajístico y disminuyen los impactos ambientales asociados a la explotación de canteras. En conjunto, estos beneficios repercuten en una mejor calidad de vida y en un uso más racional de los recursos públicos destinados a la infraestructura vial.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Analizar experimentalmente el comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo de material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.

1.4.2. Objetivos específicos

- Calcular la capacidad de soporte de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024

- Estimar el módulo de elasticidad de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024
- Determinar el espesor de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024
- Determinar el espesor de la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024
- Realizar un análisis comparativo del costo de inversión por kilómetro entre un pavimento con material celular ligero y un pavimento con material granular como capa estructural a nivel de base

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Delimitación temporal

La presente investigación se desarrolló entre los meses de junio del 2024 y enero del 2025, periodo en el cual se ejecutaron los ensayos experimentales, el procesamiento de datos y el análisis estructural de los materiales evaluados.

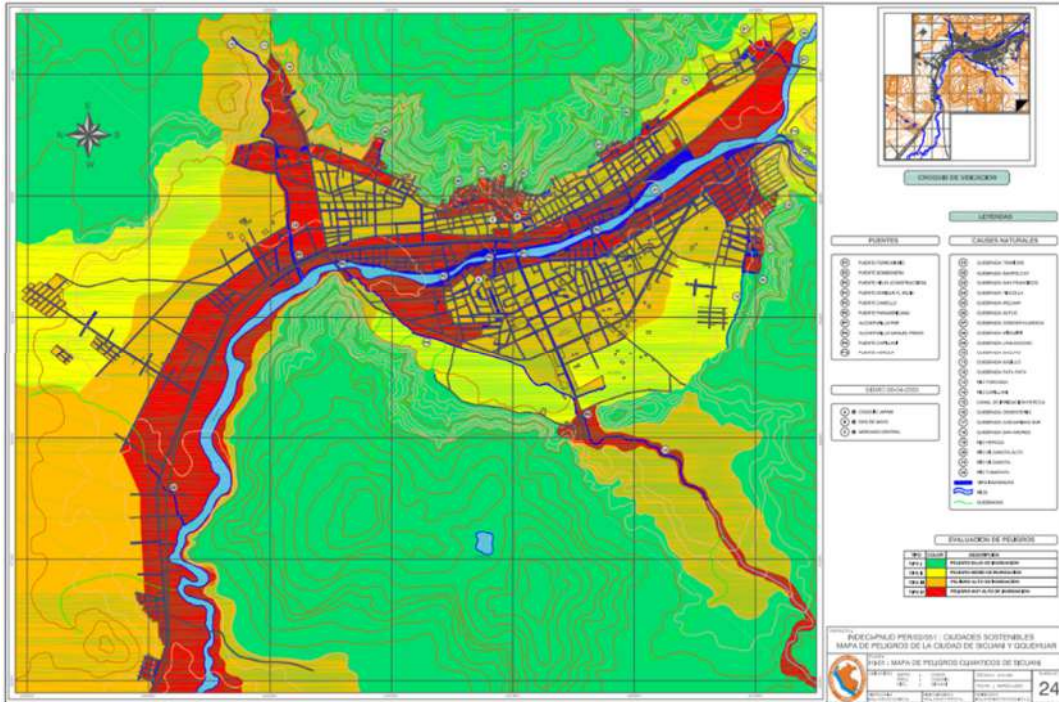
1.5.2. Delimitación espacial

El estudio estuvo delimitado espacialmente en la localidad del distrito de Sicuani, ubicada en la provincia de Canchis, región Cusco - gobierno del Perú.

Ubicación:

Región	:	Cusco - código de ubigeo (08)
Provincia	:	Canchis - código de ubigeo (0806)
Distrito	:	Sicuani - código de ubigeo (080601)

Figura 1.
Ubicación y mapa de peligros del distrito de Sicuani



Nota: Tomado del INDECI-PNUD PER/Municipalidad provincial de Canchis al 2022

Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Alam & Hu (2023), en el artículo titulado “Mechanical properties and energy absorption capacity of plain and fiber-reinforced single- and multi-layer cellular concrete” llevado a cabo en Estados Unidos, evaluaron el comportamiento mecánico del concreto celular monocapa y multicapa, con y sin refuerzo de fibras, mediante ensayos de compresión, penetración, impacto y flexión. Los autores señalan que el concreto celular multicapa puede mantener su integridad estructural incluso después de la fractura total de las capas más débiles. Asimismo, en los ensayos de penetración se identificaron múltiples picos de carga cuando el penetrador alcanzó capas de distinta densidad, lo que evidencia una respuesta más eficiente frente a diferentes niveles de esfuerzo. Del mismo modo, en condiciones de impacto se observó una mayor capacidad de absorción de energía y menor formación de grietas. Finalmente, la incorporación de fibras mejoró de forma significativa el desempeño estructural, registrándose incrementos aproximados de 82 % en la carga máxima y 470 % en el desplazamiento máximo bajo flexión.

Ioana et al. (2022), en el artículo titulado “High-Strength and Heat-Insulating Cellular Building Concrete Based on Calcined Gypsum” llevado a cabo en Rumania, desarrollaron experimentalmente un concreto celular de estructura porosa fina a base de yeso calcinado, utilizando polvo de aluminio como agente expansor en una solución acuosa de hidróxido de calcio. Entre las cuatro variantes ensayadas, la mezcla óptima fue la variante 1, compuesta por 82.3 % de yeso calcinado, 5 % de cal hidratada, 3.6 % de ceniza volante, 6.4 % de perlita, 1.2 % de humo de sílice, 0.5 % de carboximetilcelulosa, 1 % de aluminio y 41.6 % de agua. Los resultados mostraron una densidad aparente de 641 kg/m³, porosidad de 74.2 %, conductividad térmica de 0.144 W/mK y resistencia a la compresión de 4.1 MPa. En conclusión, el estudio demostró que es posible obtener un concreto celular con adecuada resistencia mecánica y buen desempeño térmico para aplicaciones constructivas. Además, este estudio fue realizado en Rumania, no en Estados Unidos.

Ni et al. (2022), en el artículo titulado “Structural capacity evaluation of lightweight cellular concrete for flexible pavement subbase”, investigaron la capacidad estructural del concreto celular liviano como material de subbase en pavimentos flexibles. Para ello, evaluaron tres densidades distintas y determinaron que el material presentaba resistencia a compresión adecuada para aplicaciones viales en todos los casos analizados, además de una rigidez superior a la del material granular convencional. El análisis de falla mostró que las secciones con

concreto celular liviano podían soportar aproximadamente el doble de cargas de tráfico respecto a las secciones granulares en términos de fatiga de la capa superficial; frente al ahuellamiento, el material permitió entre 7 y 24 veces más tráfico; y, adicionalmente, hizo posible reducir el espesor de subbase hasta en 60 % para alcanzar capacidades estructurales similares. En conjunto, los resultados evidencian el importante potencial del concreto celular liviano para mejorar el desempeño y la eficiencia estructural de los pavimentos flexibles.

Retamal & Rougier (2022), en el artículo de revisión titulado “Mechanical Behaviour, Properties and Characteristics of Foamed Cellular Concrete: A Review”, recopilaron y analizaron la información más relevante sobre el concreto celular espumado, abarcando su composición, diseño de mezclas, propiedades físicas y comportamiento mecánico. La revisión considera variables como densidad, porosidad, aislamiento térmico y acústico, durabilidad, resistencia al fuego, módulo elástico y comportamiento a compresión, tracción, flexión y corte. Asimismo, los autores examinan la influencia de adiciones minerales, fibras y aditivos químicos en la mejora del material. Como principal aporte, concluyen que aún persisten vacíos de investigación importantes, tales como la ausencia de modelos predictivos completos de esfuerzo-deformación, la escasez de modelación numérica, la limitada evidencia sobre el efecto de aditivos químicos, la falta de ensayos de largo plazo y la insuficiente evaluación del desempeño del material en ambientes agresivos.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Cordova & Flores (2021), en la tesis titulada “Análisis comparativo de las propiedades mecánicas del concreto celular para optimizar el diseño utilizando aditivo espumante y polvo de aluminio” llevada a cabo en la ciudad de Lima, desarrollaron una investigación aplicada de enfoque cuantitativo con el propósito de comparar el comportamiento mecánico del concreto celular elaborado con agente espumante y con polvo de aluminio. La muestra estuvo conformada por 42 probetas, de las cuales 33 se destinaron a ensayos de resistencia a compresión en edades de 7, 14 y 28 días, mientras que 9 fueron utilizadas para determinar densidad a los 28 días. Los resultados confirmaron que el reemplazo parcial del cemento con polvo de aluminio en proporciones de 3 %, 4 % y 5 %, junto con la incorporación de un aditivo en proporción de 2 % respecto al agua por cada 100 litros, produjo un comportamiento favorable respecto al diseño patrón. En consecuencia, el estudio concluye que ambos materiales representan una alternativa viable para optimizar el concreto celular orientado a elementos de bajo peso.

Mathios & Cotrina (2021), en la tesis titulada “Propuesta de diseño sismorresistente y su relación con el desempeño de un edificio multifamiliar de albañilería confinada, con bloques

de concreto celular, distrito de la Banda de Shilcayo, provincia y departamento de San Martín – 2019”, plantearon una propuesta de edificación multifamiliar mediante el uso de bloques de concreto celular en un sistema de albañilería confinada. El estudio tuvo como propósito determinar las características mecánicas de dichos bloques y evaluar su desempeño estructural frente a acciones sísmicas mediante simulaciones desarrolladas con el programa CYPECAD. La edificación fue ubicada en la Banda de Shilcayo, en el departamento de San Martín, zona clasificada con alto potencial sísmico dentro de la zonificación peruana. En ese marco, los autores analizaron la respuesta de la estructura a partir de la verificación de la cortante basal y de las deformaciones, concluyendo que el uso de bloques de concreto celular puede ser considerado dentro de propuestas de edificación, siempre que su comportamiento estructural sea debidamente evaluado frente a solicitaciones sísmicas.

Enriquez & Orbegoso (2020), en la tesis titulada Diseño de un concreto celular con la aplicación de perlas de poliestireno para mejorar la resistencia a compresión. Tarapoto, 2020, evaluaron el efecto de la incorporación de perlas de poliestireno en el diseño de concreto celular con materiales de la ciudad de Tarapoto. Para ello, emplearon un muestreo por conveniencia conformado por 24 probetas cilíndricas de 30×15 cm, de las cuales 6 correspondieron a un concreto patrón y 18 incluyeron adiciones de perlas en proporciones de 0.5 %, 1 % y 1.5 % respecto al volumen de la probeta. Las evaluaciones se realizaron a edades de 7, 14 y 21 días. En términos generales, el estudio permitió analizar la influencia de este material liviano sobre la resistencia a compresión del concreto celular y evidenció que la incorporación de perlas constituye una alternativa para reducir peso y modificar el comportamiento mecánico de la mezcla, alcanzando una resistencia a la compresión de 96 kgf/cm^2 , con un costo de S/ 453,55 por m^3 , mientras que el concreto convencional registró un costo de S/ 309,21 por m^3 .

Lazo (2017), en su tesis titulada “Diseño de concreto celular para diferentes densidades, análisis de sus propiedades y sus aplicaciones”, desarrolló concretos celulares con materiales disponibles en la región de Arequipa, evaluando tres diseños de mezcla con diferentes agregados. El estudio analizó propiedades en estado fresco y endurecido, tales como consistencia, peso unitario, contenido de aire, resistencia a compresión, densidad de equilibrio, contracción, absorción, permeabilidad y ultrasonido. Los resultados mostraron que se obtuvieron densidades entre 1300 y 1800 kg/m^3 , y que la resistencia a compresión aumentó conforme se incrementó la densidad. El diseño C presentó la mayor resistencia, alcanzando 260 kg/cm^2 a una densidad de 1800 kg/m^3 , mientras que el diseño B logró la menor densidad, 1300 kg/m^3 , con una resistencia de 113 kg/cm^2 . Asimismo, se concluyó que las mezclas con resistencias superiores a 175 kg/cm^2 pueden emplearse en aplicaciones estructurales, y que,

aunque el concreto celular presenta un costo ligeramente mayor que el convencional, dicho sobre costo se compensa por las propiedades que ofrece en términos de reducción de peso y potencial de aplicación.

Izquierdo & Ortega (2017), en la tesis titulada “Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones”, evaluaron bloques macizos de concreto celular elaborados con el aditivo espumante MasterCell 10 para uso en tabiquería no portante. En el diseño de mezcla, los autores buscaron obtener un peso específico cercano o inferior a 1000 kg/m^3 y una resistencia a compresión mayor a 20 kg/cm^2 . Como resultado, el cuarto diseño experimental alcanzó un peso específico de 1000 kg/m^3 y una resistencia a compresión de 40 kg/cm^2 , mientras que la mezcla DP-77-11 fue priorizada por su mayor rendimiento y menor peso específico. Además, en los ensayos complementarios se reportó una absorción de agua de 9 %, un coeficiente térmico promedio de $0.445 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, un aislamiento acústico de 34.3 dBA, un peso de tabiquería de 87 kg/m^2 , un costo unitario de S/ 3.87 por bloque y un costo de tabiquería de S/ 54.00 por m^2 . En conjunto, el estudio concluye que el concreto celular reduce el peso de la edificación y presenta propiedades térmicas y acústicas favorables para elementos no portantes.

2.1.3. Antecedentes Locales

Figueroa (2019), en la tesis titulada “Análisis del comportamiento a compresión del concreto ligero reemplazando el agregado grueso por perlas de poliestireno expandido”, analizó una mezcla patrón y cuatro mezclas con sustitución gradual del agregado grueso por perlas de poliestireno expandido en proporciones de 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Para ello, utilizó materiales de la zona, combinó dos agregados finos para cumplir la normativa, empleó agregado grueso huso 57 y diseñó las mezclas con 280 kg/m^3 de cemento, relación agua/cemento de 0.65 y un asentamiento de 4" a 6" mediante aditivo reductor de agua y retardante de fragua. Los resultados mostraron que la resistencia y la densidad obtenidas se ubicaron dentro del rango de los concretos ligeros de resistencia moderada, aptos para uso no estructural. Asimismo, concluyó que, a medida que aumenta el contenido de perlas de poliestireno expandido, aumenta el asentamiento, disminuye el peso del concreto y disminuye la resistencia a compresión.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Concreto

El concreto es un material ampliamente utilizado en la construcción debido a su resistencia, durabilidad y versatilidad. Está compuesto principalmente por cemento, agregados

finos y gruesos, agua y, en algunos casos, aditivos que permiten modificar o mejorar determinadas propiedades del material. Su uso se ha extendido en una gran variedad de aplicaciones, tales como edificaciones, puentes, pavimentos y otras obras de infraestructura, debido a su capacidad para soportar esfuerzos y adaptarse a diferentes condiciones de servicio (Abanto, 2017).

En su composición, el cemento cumple la función de aglutinante, ya que une los agregados y aporta resistencia a la mezcla. Los agregados, conformados generalmente por arena y grava, constituyen el cuerpo principal del concreto y contribuyen a su estabilidad, volumen y resistencia mecánica. Por su parte, el agua activa la reacción química del cemento y permite el desarrollo del proceso de fraguado y endurecimiento. En este sentido, la proporción de agua dentro de la mezcla es un aspecto fundamental, debido a que influye directamente en la resistencia, trabajabilidad y durabilidad final del concreto (Abanto, 2017).

El endurecimiento del concreto se produce como consecuencia del proceso de hidratación del cemento. Una vez mezclados los componentes, se forma una pasta que puede ser colocada y moldeada según la aplicación requerida; posteriormente, al reaccionar el cemento con el agua, se generan compuestos que permiten la unión progresiva de los materiales y el incremento de la resistencia mecánica con el tiempo. Este proceso no es inmediato, sino gradual, y depende de factores como la dosificación de la mezcla, las condiciones de curado y el ambiente al que el material se encuentra expuesto (Kraeb Bolivia, 2018).

Entre las principales propiedades del concreto destaca su resistencia a compresión, la cual permite su empleo en elementos estructurales sometidos a cargas importantes. Asimismo, presenta durabilidad cuando es adecuadamente diseñado, colocado y curado, pudiendo resistir la acción de agentes ambientales y condiciones de exposición diversas. Otra de sus características más relevantes es su versatilidad, ya que puede adoptar diferentes formas y dimensiones según los requerimientos del proyecto. Debido a estas cualidades, el concreto es empleado en cimientos, columnas, vigas, losas, pavimentos, puentes, represas, túneles y elementos decorativos (Curacreto, 2020).

No obstante, a pesar de sus múltiples ventajas, el concreto puede presentar fisuras o deterioro con el tiempo como consecuencia de factores tales como cambios térmicos, ciclos de humedad y secado, carga repetida o condiciones ambientales agresivas. Por esta razón, en la actualidad se vienen desarrollando alternativas orientadas a mejorar su comportamiento, mediante el uso de aditivos, nuevos materiales cementantes y técnicas constructivas que permitan incrementar su resistencia, durabilidad y sostenibilidad (María, 2024).

Figura 2.

Concreto utilizado en pavimentos



Nota: Tomado de PSI (2021)

2.2.1.1. Concreto ligero

El concreto ligero es un tipo de concreto que se caracteriza por presentar una densidad menor que la del concreto convencional, debido principalmente al uso de agregados livianos o a la incorporación de vacíos dentro de su estructura. Entre los materiales comúnmente empleados para su elaboración se encuentran la piedra pómez, la arcilla expandida, la escoria volcánica y algunos materiales sintéticos, como el poliestireno expandido. En términos generales, su densidad puede variar entre 200 kg/m^3 y 1900 kg/m^3 , mientras que el concreto convencional presenta una densidad aproximada de 2400 kg/m^3 (Civil Mac, 2024).

A pesar de su menor peso unitario, el concreto ligero puede conservar propiedades importantes como la resistencia a compresión y la durabilidad, siempre que su diseño de mezcla, proceso de fabricación y condiciones de curado sean adecuados. Esta característica permite su utilización en diferentes aplicaciones, especialmente cuando se busca disminuir el peso propio de la estructura sin prescindir completamente de la capacidad resistente del material (Abanto, 2017).

Una de las principales ventajas del concreto ligero es la reducción de cargas permanentes sobre los elementos estructurales y sobre el terreno de fundación. Al disminuir el peso total de la estructura, se reducen las solicitaciones transmitidas hacia las cimentaciones, lo que puede representar ventajas técnicas y económicas en determinados proyectos,

particularmente cuando el terreno presenta limitaciones de capacidad portante o cuando se requiere optimizar el comportamiento global del sistema estructural (Morales et al., 2022).

Asimismo, el concreto ligero presenta una estructura más porosa que el concreto convencional, condición que puede contribuir a mejorar sus propiedades de aislamiento térmico y acústico. Si bien estas características han favorecido su uso en edificaciones y elementos prefabricados, su importancia técnica también radica en que la reducción de densidad modifica el comportamiento físico y mecánico del material, influyendo en parámetros como resistencia, rigidez y peso unitario (Curacreto, 2020).

Debido a estas propiedades, el concreto ligero ha encontrado aplicación en edificaciones residenciales y comerciales, elementos prefabricados, cubiertas, plataformas y diversas obras donde se requiere disminuir el peso de la estructura. Además, su utilización puede contribuir a una construcción más eficiente, al reducir el consumo de materiales convencionales de mayor peso y optimizar determinadas condiciones de desempeño del sistema constructivo (Galistar, 2024).

Figura 3.

Concreto ligero con perlita



Nota: Tomado de Alario (2020)

2.2.1.2. Material celular

El material celular es un material que presenta una estructura interna conformada por celdas o vacíos distribuidos dentro de su masa. Esta configuración interna modifica sus

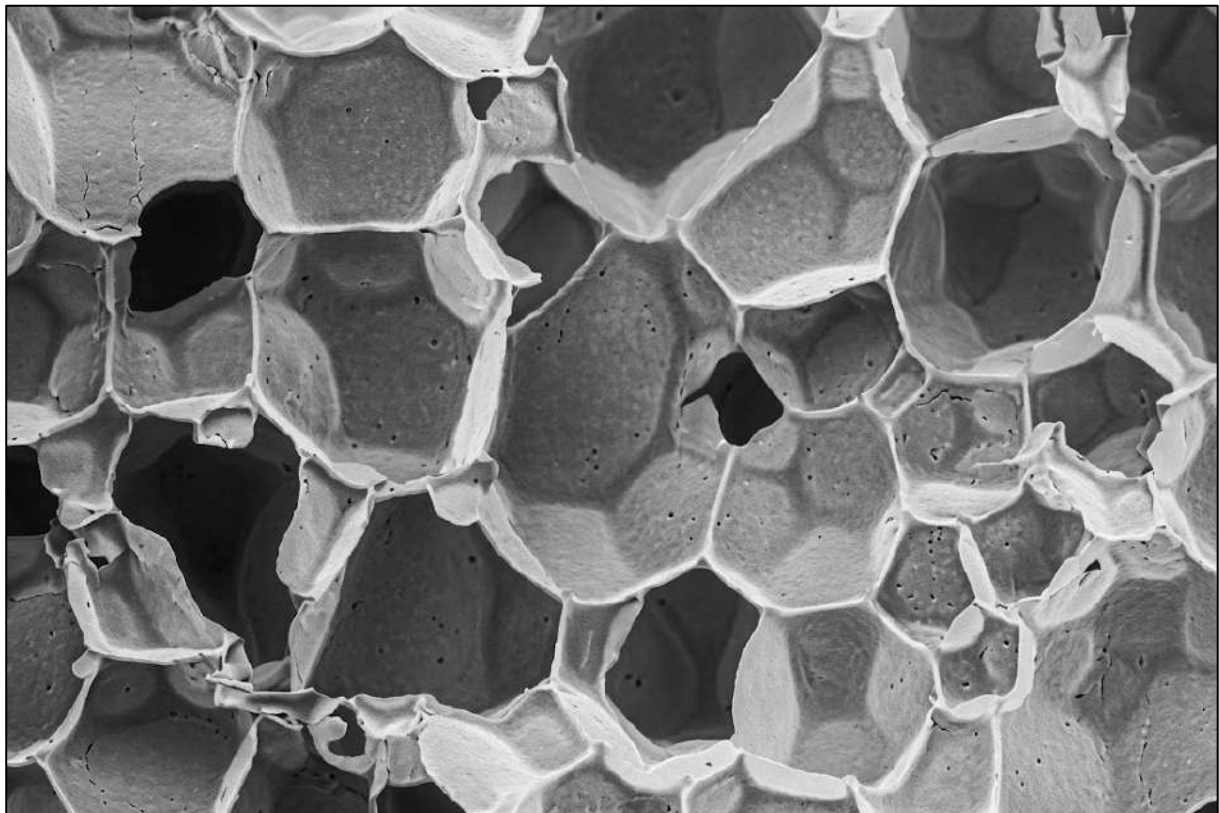
propiedades físicas y mecánicas, especialmente su densidad, peso unitario, absorción y comportamiento resistente. La presencia de estos vacíos permite obtener un material con características distintas a las de un material compacto tradicional, por lo que su desempeño depende en gran medida de la uniformidad y estabilidad de su estructura interna (Hebel, 2019).

La disposición, tamaño y uniformidad de las celdas influyen directamente en el comportamiento del material. A medida que aumenta el contenido de vacíos, disminuye la densidad y se altera la respuesta mecánica, particularmente en términos de resistencia y rigidez. Por ello, el estudio del material celular se centra en su estructura interna y en la forma en que esta condiciona su desempeño físico y mecánico (Guillermo & Urrutia, 2021).

La estructura celular constituye el rasgo principal de este tipo de material, ya que a partir de ella se explican sus propiedades generales y su comportamiento frente a distintas exigencias. En consecuencia, el material celular debe entenderse como una categoría definida por la presencia de vacíos o celdas distribuidas en su interior (Huaman & Sanchez, 2020).

Figura 4.

Material celular – espuma rígida de poliuretano



Nota: Tomado de (Ipur, 2017)

2.2.1.3. Material celular ligero

El material celular ligero es un material de baja densidad obtenido mediante la incorporación controlada de aire o espuma en una mezcla, formando una masa con vacíos

uniformemente distribuidos. Esta estructura reduce significativamente el peso unitario del material y determina propiedades como la resistencia a compresión, la rigidez, la absorción y el comportamiento térmico (Albert, 2024).

Su composición comprende, de manera general, materiales cementantes, agua y un agente espumante o expansivo, con o sin agregados finos, según la formulación empleada. La densidad final depende del volumen de aire incorporado, de la estabilidad de la espuma y de la uniformidad de la estructura porosa generada durante el proceso de fabricación (Sika, 2024).

El comportamiento del material celular ligero está condicionado por la relación entre su baja densidad y su capacidad resistente. La reducción de peso modifica su respuesta mecánica en comparación con materiales convencionales de mayor densidad, por lo que su evaluación requiere considerar de manera conjunta densidad, resistencia y (Industry Surfer, 2023b).

La versatilidad del material celular ligero permite su utilización en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la construcción de paredes, techos, tabiques, rellenos y elementos prefabricados. Su ligereza no solo facilita el manejo, sino que también puede contribuir a reducir las cargas sobre las cimentaciones y la estructura en general, posibilitando diseños más eficientes y económicos (Albert, 2024).

El proceso de fabricación del material celular ligero implica la generación de una espuma estable que se mezcla con la pasta de cemento y los agregados. Esta mezcla se vierte en moldes y se somete a un proceso de curado similar al de los materiales convencionales. La incorporación de la espuma debe ser controlada cuidadosamente para asegurar la uniformidad de los poros y, por ende, las propiedades finales del material (Thigolith, 2024).

El material celular ligero es considerado una opción más amigable con el medio ambiente. Su producción requiere menos material y energía en comparación con los materiales tradicionales, y su capacidad de mejorar la eficiencia energética de los edificios contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su menor peso reduce el consumo de combustible durante el transporte y disminuye el impacto en las infraestructuras existentes (Amevec, 2024).

Figura 5.

Material celular ligero



Nota: Tomado de Silva (2022)

2.2.1.4. Normativa ACI aplicable al MCL

El Material Celular Ligero (MCL) empleado en la presente investigación está constituido por una matriz cementante combinada con un aditivo espumógeno, lo que le confiere características similares a las de un concreto celular. En ese sentido, su comportamiento mecánico, propiedades físicas y proceso de dosificación se fundamentan en los principios de la tecnología del concreto. Por ello, resulta pertinente considerar las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI) como base técnica para la comprensión y análisis del material estudiado, dado que estas normas establecen criterios ampliamente aceptados para el diseño, dosificación y evaluación de materiales cementantes.

Entre las principales normas de interés se encuentran:

- ACI 211.1 – Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, la cual proporciona lineamientos para la dosificación de mezclas, permitiendo definir relaciones adecuadas entre agua, cemento y aditivos en la elaboración del MCL.
- ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete, empleada como referencia para la interpretación del comportamiento mecánico del

material, especialmente en términos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

- ACI 523R – Guide for Cellular Concretes, que establece criterios específicos para concretos celulares, incluyendo sus propiedades físicas, clasificación, métodos de producción y aplicaciones, siendo directamente aplicable al material evaluado en esta investigación
- ACI 212.3R – Report on Chemical Admixtures for Concrete, que proporciona fundamentos técnicos sobre el uso de aditivos químicos, permitiendo sustentar el empleo del agente espumógeno en la obtención del MCL

La incorporación de estas normas permite establecer un sustento técnico adecuado para el análisis del Material Celular Ligero, garantizando que su diseño, elaboración y evaluación se realicen bajo criterios reconocidos internacionalmente. Asimismo, contribuye a la validez de los resultados obtenidos, al basarse en estándares ampliamente utilizados en la ingeniería civil para materiales con comportamiento similar al concreto.

2.2.1.5. Elasticidad y módulo de elasticidad

La elasticidad es la propiedad que tienen los materiales de deformarse cuando se les aplica una carga y de recuperar su forma original al retirarse dicha carga, siempre que no se haya superado su límite elástico. Este comportamiento corresponde a la fase elástica del material y se representa en la curva esfuerzo-deformación como el tramo en el que la deformación es reversible (Grossmann & Groover, 2017).

Dentro del rango elástico, la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria es aproximadamente lineal, de acuerdo con la ley de Hooke. Esta relación se expresa mediante la ecuación $\sigma = E \cdot \epsilon$, donde σ representa el esfuerzo, ϵ la deformación unitaria y E el módulo de elasticidad o módulo de Young. Este parámetro expresa la rigidez del material, de modo que un valor elevado de E indica una mayor resistencia a deformarse ante una carga determinada (Universidad de Guanajuato, 2022).

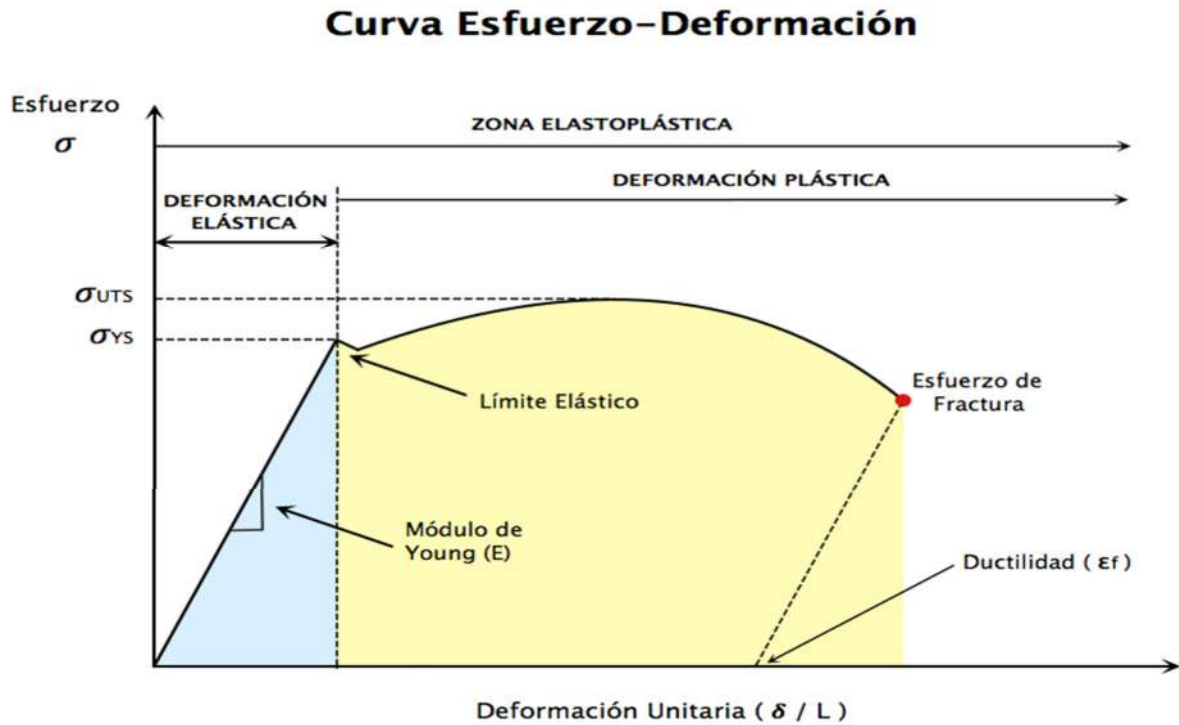
El módulo de elasticidad sirve para evaluar el comportamiento de los materiales frente a sollicitaciones externas, ya que permite cuantificar su rigidez dentro del rango elástico. En términos estructurales, un material con mayor módulo de elasticidad experimenta menores deformaciones ante un mismo nivel de esfuerzo, mientras que un material con menor módulo presenta una respuesta más deformable (Votatera, 2024).

El límite elástico marca la transición entre el comportamiento elástico y el comportamiento plástico. Por debajo de este límite, las deformaciones son recuperables; al

superarlo, el material experimenta deformaciones permanentes que ya no desaparecen al retirar la carga. Este análisis del rango elástico permite identificar condiciones de trabajo en las que el material conserva estabilidad y continuidad en su respuesta (Roynance, 2022).

Figura 6.

Curva Esfuerzo - Deformación



Nota: Tomado de Rodríguez (2014)

2.2.2. Suelos

2.2.2.1. Granulometría

La granulometría describe la distribución de tamaños de las partículas que componen un material granular, como suelos, arenas, gravas y agregados utilizados en la construcción. Esta distribución influye significativamente en las características físicas y mecánicas del material, afectando propiedades como la resistencia, la permeabilidad, la capacidad de compactación y el comportamiento frente al drenaje.

La representación de la granulometría se realiza mediante la curva granulométrica, obtenida a partir de ensayos de tamizado y sedimentación en laboratorio. Esta curva muestra el porcentaje acumulado de material que pasa a través de una serie de tamices estandarizados, permitiendo visualizar la gradación del material desde las partículas más finas hasta las más gruesas (Structuralia, 2022).

Los materiales se clasifican en diferentes fracciones granulométricas: grava, arena, limo y arcilla. Cada fracción tiene un rango específico de tamaños y contribuye de manera particular a las propiedades del material. Por ejemplo, las partículas gruesas, como las gravas y arenas,

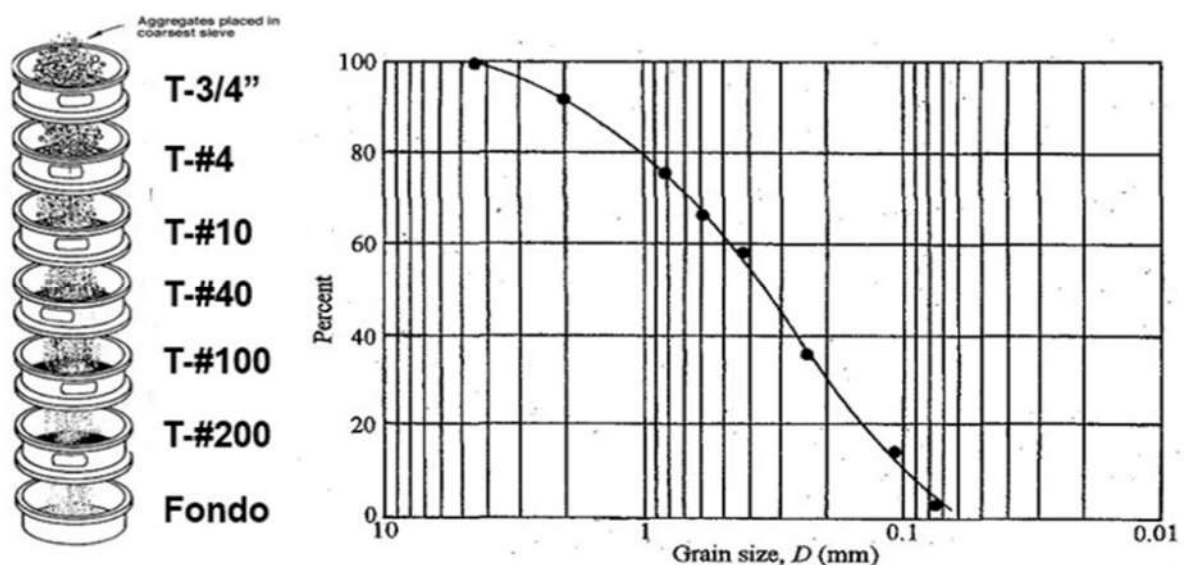
favorecen la permeabilidad y el drenaje, mientras que las partículas finas, como limos y arcillas, incrementan la cohesión, pero pueden reducir la permeabilidad y afectar la estabilidad volumétrica (Geostru, 2024).

En el diseño y construcción de pavimentos, una gradación adecuada de los agregados en las capas de base y subbase permite obtener una estructura más densa y resistente, mejorando la capacidad de soporte y la durabilidad del pavimento. La distribución equilibrada de tamaños facilita la compactación, reduce los vacíos en la mezcla y mejora el comportamiento ante las cargas vehiculares y las condiciones ambientales.

El análisis granulométrico es utilizado para la selección y control de calidad de los materiales empleados en la construcción. Los resultados de estos análisis permiten clasificar el suelo según sistemas estandarizados, como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) o las Normas Técnicas Peruanas, y evaluar su uso para distintas aplicaciones en ingeniería civil (INACAL, 2019).

Al considerar materiales alternativos, como el material celular ligero propuesto como reemplazo del material granular en bases de pavimentos flexibles. La distribución de tamaños de las partículas en estos materiales influye en sus propiedades mecánicas, como la capacidad de soporte y la respuesta elástica, que afectan directamente el desempeño y la vida útil del pavimento (Lazo, 2017).

Figura 7.
Curva Granulométrica



Nota: Tomado de Boiero (2020)

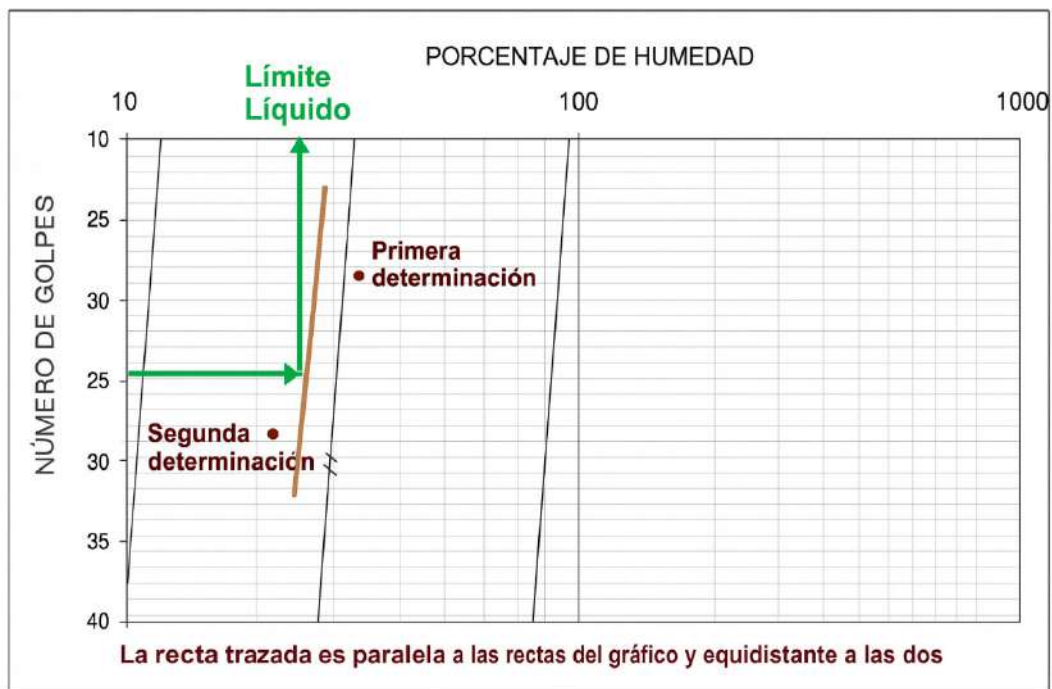
2.2.2.2. Plasticidad

La plasticidad de un suelo se define como la capacidad de sus componentes para adherirse y soportar deformaciones sin alcanzar la falla. Este término, también conocido como

consistencia del suelo, se evalúa en laboratorio mediante ensayos de Límites de Atterberg. Estos ensayos proporcionan tres medidas: el límite líquido, que indica el contenido de agua en el suelo donde comienza a fluir bajo una presión estándar; el límite plástico, que representa el contenido de agua en el suelo donde empieza a comportarse plásticamente en lugar de fluir; y el índice de plasticidad, que es la resultante de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, reflejando la capacidad del suelo para cambiar de forma sin romperse. (FAO, 2022)

El límite líquido se obtiene mediante el uso de la cuchara de Casagrande, un aparato utilizado para medir la cantidad de agua que un suelo puede contener antes de fluir bajo bajos esfuerzos. Se realiza contando el número de golpes que la cuchara requiere para cerrar un surco estándar en un tiempo determinado. Con base en estos resultados, se traza una gráfica conocida como curva de flujo para calcular el parámetro de límite líquido del suelo. Si el número de golpes necesarios no alcanza los veinticinco (25) en el tiempo especificado, el suelo se clasifica como no plástico.

Figura 8.
Límite Líquido



Nota: Tomado de ETSI & UPM (2015)

El límite plástico se define como el contenido de humedad promedio de las todas las muestras ensayadas. Para calcularlo, se requiere conocer el peso del material en estado saturado junto al frasco que lo contiene, el peso del suelo después de secarlo en un horno a 110°C junto con su frasco, y la proporción que se tiene entre el peso del agua y el peso seco del suelo o de

la muestra. Esta relación nos proporciona información precisa sobre el contenido de humedad del suelo.

Tabla 1.

Tabla de recolección de datos para calcular el límite plástico

Prueba N°	1	2	3
Masa del frasco (gr)			
Masa del frasco + suelo húmedo (gr)			
Masa del frasco + suelo seco (gr)			
Masa del agua contenida Mw			
Masa del suelo seco Ms			
Contenido de humedad Mw/Msx100			
Contenido de humedad promedio			
Límite Plástico (%)			

Nota: Adaptado de laboratorio de MS - UNI (2019)

Una vez se haya obtenido los parámetros de los límites se puede calcular la consistencia del suelo mediante la ecuación 2.1 entre ambos límites:

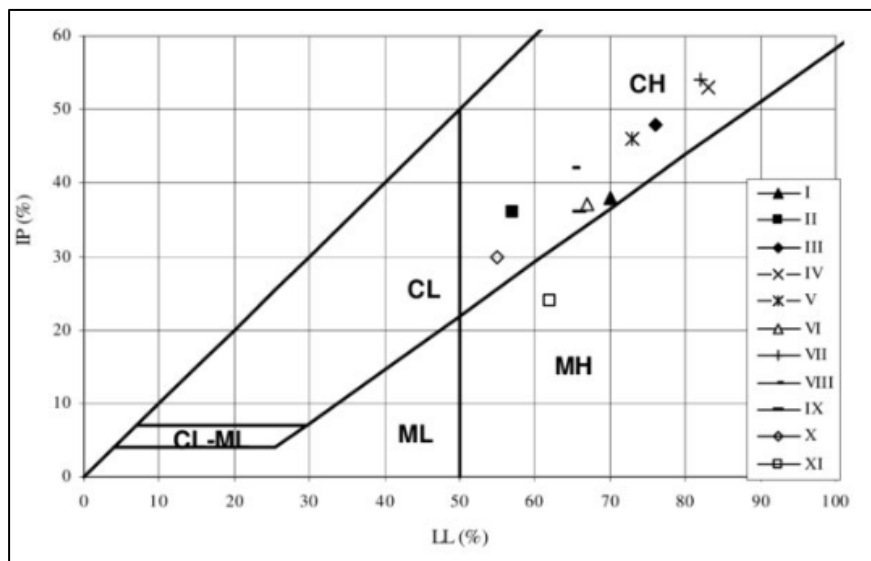
$$IP = LL - LP \quad (Ec. 2.1)$$

Donde:

- IP = índice de plasticidad (%)
- LL = límite líquido (%)
- LP = límite plástico (%)

Figura 9.

Gráfico de plasticidad de los suelos



Nota: Tomado de Codevilla (2022)

2.2.2.3. Máxima Densidad Seca

La máxima densidad seca, se refiere a la densidad más alta que se puede alcanzar en un material granular o suelo mediante la compactación.

La máxima densidad seca se puede obtener en base a múltiples ensayos, los más utilizados comúnmente son el Proctor estándar y el Proctor modificado. La Densidad Seca Máxima nos indica la mayor densidad que puede alcanzar un suelo cuando a éste se le compacta con la humedad óptima. (Manual de Ensayo de Materiales, 2016)

Para determinar la Máxima Densidad Seca y el Contenido Óptimo de Humedad se realiza los siguientes cálculos en base al ensayo de Proctor Estándar, para lo cual primero debemos determinar el peso unitario seco, mediante la Ec. 2.2:

$$\rho_m = 1000 x \frac{(M_t - M_{md})}{V} \quad (Ec. 2.2)$$

Donde:

ρ_m = densidad húmeda (kg/m^3)

M_t = masa húmeda: muestra + molde (kg)

M_{md} = masa del molde (kg)

V = volumen del molde (m^3)

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}} \quad (Ec. 2.3)$$

Donde:

ρ_d = densidad seca (kg/m^3)

ρ_m = densidad húmeda (kg/m^3)

W = contenido de humedad (%)

$$\gamma_d = 62.43 \rho_d \text{ lbf/ft}^3 \quad (Ec. 2.4)$$

$$\gamma_d = 9.807 \rho_d \text{ kN/m}^3 \quad (Ec. 2.5)$$

Donde:

γ_d = peso unitario seco (kN/m^3)

Para la gráfica de la curva de saturación se necesita conocer el contenido de agua al aplicar una saturación completa:

$$W_{sat} = \frac{(\gamma_w)(G_s) - \gamma_d}{(\gamma_d)(G_s)} x 100 \quad (Ec. 2.6)$$

Donde:

W_{sat} = contenido de agua (%)

γ_w = peso unitario del agua (9.8 kN/m^3)

γ_d = peso unitario seco (kN/m^3)

G_s = gravedad específica

2.2.2.3.1. Compactación

La compactación es el proceso mediante el cual se reduce el volumen de un suelo o material granular al expulsar el aire intersticial y aumentar su densidad. Este procedimiento tiene como objetivo mejorar las propiedades mecánicas del material, como la resistencia y la estabilidad, al incrementar la densidad y disminuir la permeabilidad.

La máxima densidad seca es el nivel más alto de densidad que se puede alcanzar mediante la compactación de un suelo a una humedad óptima. Esta humedad óptima es el contenido de agua en el cual el suelo logra su máxima densidad al ser compactado. La cantidad de agua presente en el suelo influye significativamente en su capacidad para compactarse; un exceso de agua puede hacer que el suelo sea demasiado plástico o pegajoso, dificultando la expulsión del aire, mientras que una cantidad insuficiente puede impedir una adecuada cohesión entre las partículas, reduciendo la eficacia de la compactación (Geotecnia, 2018).

El proceso de compactación implica la aplicación repetida de fuerza en capas sucesivas de suelo, conocidas como "capas de compactación" o "horizontes". Cada capa se compacta por separado para asegurar una distribución uniforme de la densidad y garantizar la eliminación de vacíos de aire. Para llevar a cabo este proceso, se utilizan diferentes tipos de equipos, como compactadoras de rodillos, placas vibratorias y pisones mecánicos. Estos equipos aplican energía al suelo para aumentar la proximidad entre las partículas y mejorar la cohesión interna del material (Yepes, 2021).

Durante la compactación, se debe de realizar un control de densidad para asegurar que el suelo alcance la compactación deseada. Esto se logra mediante la medición de la densidad aparente del suelo compactado en campo y su comparación con la máxima densidad obtenida en laboratorio para ese tipo de suelo en particular. Ensayos como el Proctor estándar o modificado permiten establecer la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad, proporcionando datos para el control de calidad del proceso (Farro, 2023).

La compactación adecuada del suelo previene asentamientos diferenciales y fallas estructurales en las obras civiles. En el caso de los pavimentos flexibles, una base bien compactada soporta las cargas vehiculares y prolonga la vida útil del pavimento. Al introducir materiales alternativos como el material celular ligero en reemplazo del material granular en las bases, se evalúa su comportamiento frente a la compactación y determina si se puede alcanzar las densidades y resistencias requeridas para el diseño estructural (Guzmán, 2023).

2.2.2.3.2. Importancia en Pavimentos

Una mayor densidad seca incrementa la capacidad de carga y la resistencia del material frente a las sollicitaciones a las que será sometido. La compactación adecuada garantiza que los materiales utilizados estén libres de vacíos de aire, lo que contribuye a una mayor cohesión y estabilidad estructural (Aldana, 2021).

Este proceso optimizado no solo mejora la capacidad portante del pavimento, sino que también minimiza la deformación por aplicación de cargas repetidas y reduce la posibilidad de asentamientos diferenciales. Estos factores garantizan la durabilidad y funcionalidad a largo plazo de la infraestructura vial. Además, la reducción de la permeabilidad previene problemas relacionados con el agua, como el deterioro prematuro del pavimento debido a la infiltración y la expansión del suelo (Vise, 2023).

El aumento de la densidad seca no solo mejora las propiedades mecánicas del material, sino que también contribuye a una mayor resistencia a la fatiga. En carreteras de alto tránsito, la resistencia a la fatiga es el indicador de la durabilidad y el rendimiento a largo plazo del pavimento (Noguera & Miró, 2011).

2.2.2.3.3. Pruebas de Densidad

Para determinar la máxima densidad seca de un material, se realizan pruebas de densidad en el laboratorio. La densidad es una propiedad que influye directamente en las características mecánicas y en la capacidad de carga de los suelos y materiales utilizados en pavimentos. Una adecuada densidad no solo garantiza una superficie firme y resistente, sino que también contribuye a la durabilidad del pavimento, disminuyendo la necesidad de mantenimientos costosos y prolongando su vida útil (Reyes et al., 2011).

Las pruebas de densidad influyen en el control de calidad de los materiales empleados en la construcción de pavimentos. Entre los métodos más comunes se encuentran los ensayos de compactación en laboratorio, como el Proctor estándar y el Proctor modificado, los cuales determinan la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad del material. Estos procedimientos aseguran que el suelo utilizado cumpla con las especificaciones técnicas requeridas para la obra (Geotecnia, 2018).

En campo, se emplean métodos rápidos y eficientes para medir la densidad del suelo compactado, como el ensayo del cono de arena y el uso de equipos nucleares de densidad. Estas técnicas permiten verificar in situ si el material ha sido compactado adecuadamente, garantizando que se alcancen los niveles de densidad especificados. Además, estos ensayos ayudan a identificar áreas que puedan requerir una compactación adicional o ajustes en el proceso (ASTM D6938, 2024).

La implementación de estas pruebas de densidad no solo asegura la calidad del pavimento, sino que también proporciona un control continuo durante la construcción. Esto permite realizar ajustes y correcciones en tiempo real, optimizando el proceso constructivo y asegurando la entrega de un pavimento de alta calidad y durabilidad. La documentación y registro de los resultados de estas pruebas permiten la trazabilidad y verificación del cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas (CE.010 Pavimentos Urbanos, 2016).

2.2.2.3.4. Contenido de Humedad

El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua presente en un material en relación con su peso seco, y tiene una influencia significativa en sus características y comportamientos mecánicos (Bautista, 2024).

La máxima densidad seca que puede alcanzar un suelo mediante compactación está estrechamente relacionada con su contenido de humedad. Existe para cada tipo de suelo un contenido de humedad óptimo que permite obtener la máxima densidad durante la compactación. Si el suelo está demasiado seco o demasiado húmedo, la compactación será menos eficiente, lo que afectará negativamente la resistencia y estabilidad del material (Industry Surfer, 2023a).

En la formación de terraplenes y la construcción de carreteras, se debe controlar el contenido de humedad para asegurar que se alcance la densidad y resistencia mecánica requeridas. Un contenido de humedad adecuado facilita la compactación, mejorando la cohesión entre las partículas y reduciendo los vacíos de aire (Lidia, 2023b).

Además, el contenido de humedad influye en la variación volumétrica de los suelos. Suelos con alto contenido de agua pueden experimentar contracción al secarse, mientras que suelos con bajos niveles de humedad pueden expandirse al absorber agua. Estos cambios volumétricos pueden afectar la estabilidad y resistencia de las estructuras construidas sobre ellos, provocando asentamientos diferenciales y daños estructurales (Galaviz et al., 2020).

En la construcción de pavimentos, el contenido de humedad no solo afecta la compactación de las capas granulares, sino también la calidad de los materiales asfálticos. Un contenido de humedad inadecuado puede resultar en pavimentos menos duraderos y más propensos a deformaciones, fisuras y otros deterioros. Por ello, es imperativo conocer y controlar el contenido de humedad durante todas las etapas de la construcción, para garantizar la integridad y longevidad de la infraestructura vial (Quezada, 2015).

2.2.2.3.5. Curva de Compactación

La curva de compactación es una representación gráfica que ilustra la relación entre la densidad seca de un suelo y su contenido de humedad. Al graficar la densidad seca en función del contenido de humedad, se obtiene una curva cuyo punto más alto indica la máxima densidad seca que el suelo puede alcanzar. Esta curva proporciona información sobre las propiedades y el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de humedad.

Durante los ensayos de compactación en laboratorio, se preparan muestras de suelo con distintos contenidos de humedad. Cada muestra se compacta de manera controlada utilizando métodos estandarizados, como el Proctor estándar o el Proctor modificado. Después de la compactación, se mide la densidad seca resultante de cada muestra. Al representar gráficamente estos datos, con la densidad seca en el eje vertical y el contenido de humedad en el eje horizontal, se obtiene la curva de compactación (Yepes, 2013).

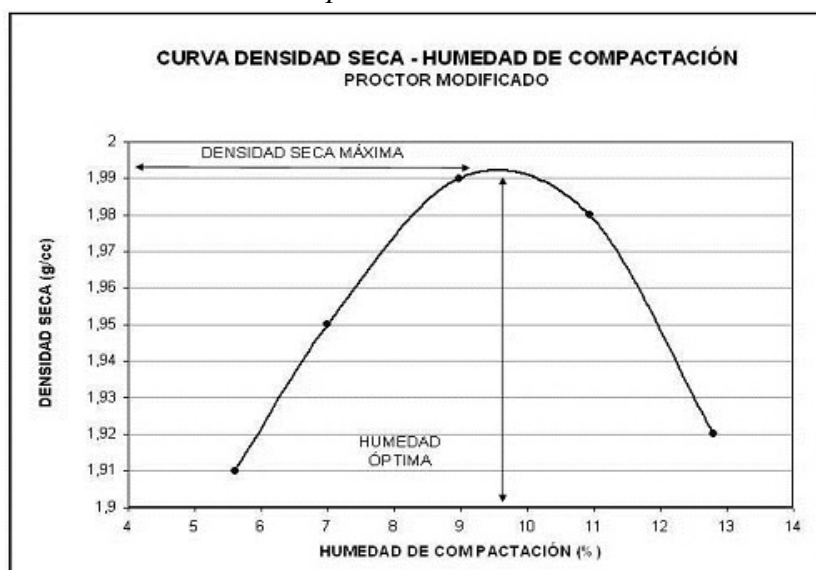
La forma típica de la curva muestra que la densidad seca aumenta con el incremento del contenido de humedad hasta alcanzar un máximo, conocido como contenido de humedad óptimo. Más allá de este punto, la densidad seca comienza a disminuir a medida que el exceso de agua separa las partículas del suelo, reduciendo la eficacia de la compactación. Este comportamiento se debe a que, en contenidos de humedad inferiores al óptimo, el agua actúa como lubricante, facilitando el reacomodo de las partículas y permitiendo una mayor densidad. Sin embargo, un exceso de agua llena los vacíos entre partículas, impidiendo su acercamiento y disminuyendo la densidad seca alcanzable (Yepes, 2013).

Conocer la curva de compactación y el contenido de humedad óptimo permite establecer las condiciones ideales para la compactación en campo, asegurando que el suelo alcance la densidad y resistencia necesarias para soportar las cargas a las que estará sometido. Una compactación adecuada de las capas de base y subbase mejora la durabilidad y desempeño de la infraestructura vial (EGC Consulting, 2023).

La aplicación de este conocimiento en el campo implica ajustar el contenido de humedad del suelo antes de la compactación, ya sea añadiendo agua si el suelo está seco o permitiendo que se seque si está demasiado húmedo. De esta manera, se logra una compactación eficiente que cumple con las especificaciones técnicas y garantiza la calidad y longevidad de la obra (Library, 2021).

Figura 10.

Curva densidad seca - humedad de compactación



Nota: Tomado de Puertos (2015)

2.2.2.3.6. Efecto en la Estabilidad

La densidad seca se reconoce como un factor crítico que influye directamente en la estabilidad estructural. La consecución de la máxima densidad seca, obtenida a través de un proceso de compactación óptimo, actúa como una salvaguarda contra posibles fallas en el pavimento. La relación entre densidad seca y estabilidad se evidencia en su impacto sobre la prevención de asentamientos. Una base o subbase que ha alcanzado su máxima densidad seca ofrece una resistencia superior frente a los riesgos de hundimientos no deseados, proporcionando un soporte sólido que contrarresta las variaciones del suelo. Esto no solo garantiza la integridad estructural del pavimento, sino que también contribuye a mantener una superficie de rodadura estable y segura (Ocete et al., 2018).

Además, la máxima densidad seca indica el grado de deformaciones, aspecto crítico para la estabilidad a largo plazo. Al mejorar la capacidad del material para resistir las tensiones y cargas dinámicas generadas por el tráfico, se establece una base sólida que preserva la forma y nivelación del pavimento. Esto reduce la posibilidad de deformaciones permanentes, fortaleciendo la estabilidad estructural frente a las exigencias del entorno vial (Industry Surfer, 2023a).

Un proceso de compactación adecuado asegura que el material granular utilizado en las capas de base y subbase alcance las propiedades mecánicas necesarias para soportar las cargas aplicadas, prolongando la vida útil del pavimento y reduciendo los costos asociados al mantenimiento y reparación (Construneic, 2024).

2.2.2.3.7. Control de la Calidad

En el proceso de construcción de pavimentos, se llevan a cabo pruebas de control de calidad con el propósito de garantizar que las capas estructurales, como la base y la subbase, hayan sido compactadas adecuadamente, alcanzando la máxima densidad seca. Estas pruebas aseguran la durabilidad, estabilidad y resistencia del pavimento, ya que una compactación correcta influye directamente en su capacidad para soportar las cargas previstas y resistir el deterioro a lo largo del tiempo.

Para efectuar un control de construcción efectivo, se emplean diversos métodos y herramientas. Las pruebas de compactación son primordiales; se utilizan equipos como compactadores de placa y rodillos vibratorios para asegurar que cada capa del pavimento alcance la densidad requerida. Se realizan ensayos de campo, como el Proctor modificado, y mediciones de densidad in situ con densímetros nucleares, para verificar la efectividad de la compactación (Asfaltosfarvias, 2024).

Se llevan a cabo análisis granulométricos y pruebas de calidad de los materiales utilizados en las capas de base y subbase, asegurando que cumplan con las especificaciones técnicas establecidas. Estos ensayos garantizan que los materiales proporcionen la resistencia y estabilidad necesarias para el pavimento (Ingeotecnia, 2024).

El control de espesor verifica que las capas del pavimento tengan el espesor adecuado mediante herramientas de medición como varillas de sondeo y equipos de radar de penetración terrestre (GPR). Además, se realizan pruebas de resistencia, como ensayos de compresión y flexión en muestras de pavimento, para evaluar la capacidad del material para soportar cargas y resistir el agrietamiento (Dynatest, 2021).

El control de humedad durante el proceso de compactación asegura que el contenido de agua se mantenga dentro de los niveles óptimos. Un contenido de humedad adecuado logra una buena compactación y previene problemas futuros como la consolidación excesiva o la expansión del suelo (Innova Ingeniería, 2022).

Adicionalmente, se efectúan inspecciones visuales y topográficas para identificar posibles defectos superficiales y desviaciones en la nivelación y alineación del pavimento. Estas inspecciones permiten realizar correcciones oportunas y mantener la calidad del proyecto.

Un adecuado control de la construcción no solo garantiza la calidad del pavimento en el corto plazo, sino que también contribuye a su desempeño y durabilidad a largo plazo, reduciendo la necesidad de reparaciones y mantenimiento y asegurando la satisfacción de los usuarios (Meskovska, 2024).

2.2.2.4. CBR

El CBR, o California Bearing Ratio (Ratio de Soporte de California), es un parámetro utilizado para estimar la capacidad de carga de los suelos y materiales de base en carreteras y pavimentos. Fue desarrollado por el Departamento de Carreteras de California en los Estados Unidos y se ha convertido en una herramienta estándar en el diseño y la evaluación de pavimentos.

El CBR se expresa como un porcentaje y se calcula comparando la resistencia a la penetración de una muestra de suelo con la resistencia de una muestra de piedra triturada estándar. La prueba se realiza en un laboratorio y, en esencia, mide la relación entre la presión requerida para penetrar en el suelo a una profundidad específica y la presión requerida para hacer lo mismo en un material de referencia.

Además, determina el índice de resistencia en función a la capacidad de soporte de carga, es necesario aclarar que dicha carga es aplicada en cada una de las capas de la estratigrafía del suelo, por lo cual, Se sugiere realizar este ensayo en condiciones de laboratorio para obtener un análisis más preciso de la muestra. Se debe de garantizar que las muestras se mantengan intactas desde su recolección en el terreno original hasta su llegada al laboratorio. (Manual de Ensayo de Materiales, 2016)

Para obtener el CBR (California Bearing Ratio), si se obtienen más de seis valores distintos de CBR en todas las muestras analizadas, se calcula un promedio de estos valores. Este promedio se usa si las muestras muestran características similares y homogéneas en su configuración estratigráfica. El valor del CBR proporciona información sobre la calidad del suelo como subrasante y se clasifica en diversas categorías en función a los valores obtenidos como se aprecia en la Tabla 2.

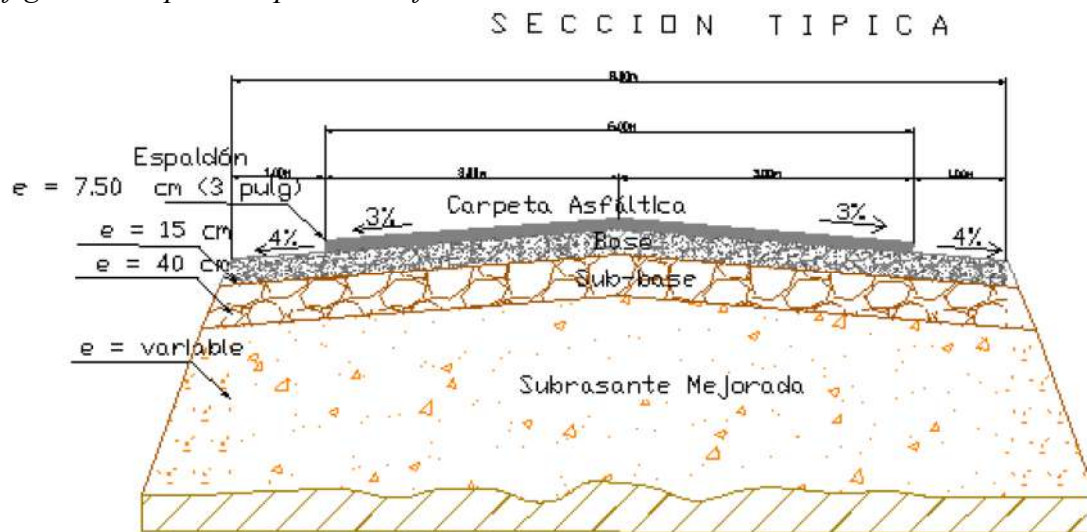
Tabla 2.

Categoría de subrasante

Representación	Subrasante	
	Categoría	CBR
So	Inadecuado	< 3%
S1	Insuficiente	3% a 6%
S2	Regular	6% a 10%
S3	Buena	10% a 20%
S4	Muy buena	20% a 30%
S5	Excelente	≥ 30%

Fuente: Tomado del Manual de Ensayo de Materiales (2016)

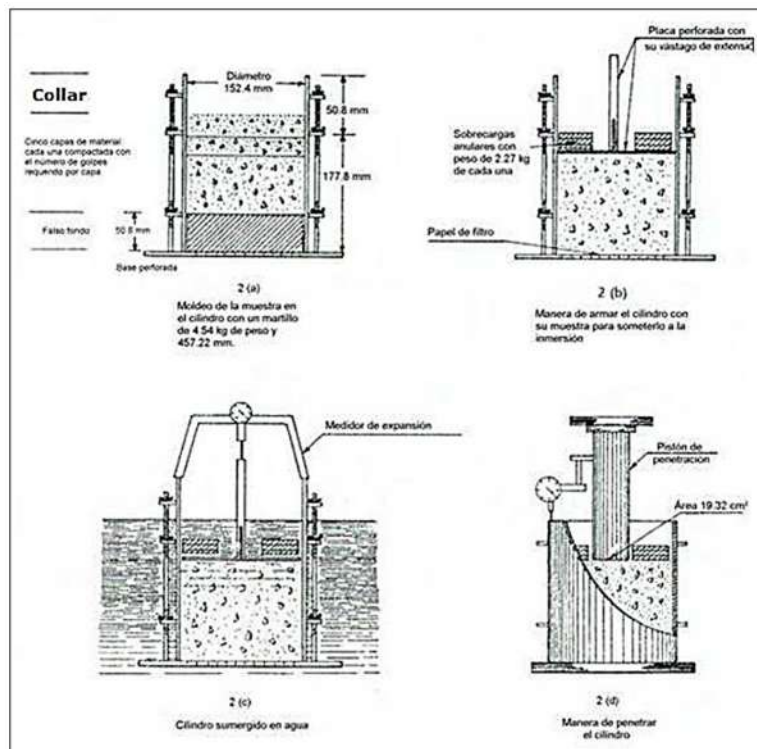
Figura 11.
 Configuración típica del pavimento flexible



Nota: Tomado de ESPOL (2009)

El CBR se obtiene en base al ensayo del mismo nombre “Ensayo CBR”, el cual nos ayuda a determinar la relación de soporte del suelo o Capacidad Resistente Potencial en función a la carga que sea aplicada (Manual de Ensayo de Materiales, 2016)

Figura 12.
 Equipo CBR para ensayo in laboratorio



Nota: Tomado de Manual de Ensayo de Materiales (2016)

Para este ensayo se aplicará una carga de penetración con una velocidad constante y controlada por un deformímetro y un cronómetro. Además, para cada carga se deberá anotar la lectura correspondiente.

Tabla 3.

Penetraciones a ser leídas

D (mm)	D (plg)
12.70	0.500
10.16	0.400
7.62	0.300
5.08	0.200
3.81	0.150
3.17	0.125
2.54	0.100
1.90	0.075
1.27	0.050
0.63	0.025

Fuente: Tomado del Manual de Ensayo de Materiales (2016)

Después se realizan los cálculos respectivos, calculando los parámetros necesarios:

Se calcula la humedad de compactación, mediante la Ec. 2.7:

$$\% \text{ agua} = \frac{H-h}{100+h} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

H = humedad prefijada

h = humedad natural

Se calcula el porcentaje de expansión, mediante la Ec. 2.8:

$$\% \text{ expansión} = \frac{L_2-L_1}{L_1} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

L1 = lectura inicial (mm)

L2 = lectura final (mm)

El índice de CBR se calcula en función a la presión a 0.1” y 0.2”:

Tabla 4.

Presión de penetración

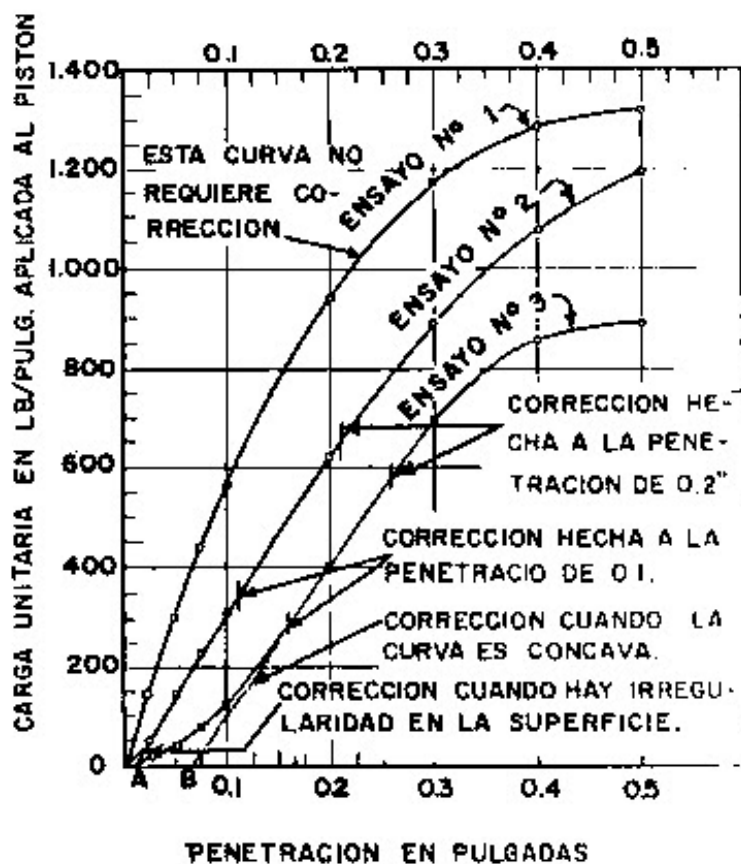
Penetración		Presión		
D (mm)	D (plg)	MN/m ²	Kgf/cm ²	Lb/plg ²
5.08	0.2	10.35	105.46	1500
2.54	0.1	6.90	70.31	1000

Fuente: Tomado del Manual de Ensayo de Materiales (2016)

Se realiza la gráfica de la curva esfuerzo vs penetración:

Figura 13.

Grafica de la curva esfuerzo vs penetración



Nota: Tomado de Bowles (1984)

2.2.2.4.1. Evaluación de Capacidad de Carga

El CBR se utiliza para determinar la capacidad de carga de los suelos y materiales de base, lo que es necesario para diseñar pavimentos que puedan soportar las cargas de tráfico sin deformarse excesivamente.

2.2.2.4.2. Diseño de Pavimentos

El CBR se utiliza en el diseño de pavimentos para seleccionar espesores adecuados de las capas de base y subbase, teniendo en cuenta las características del suelo y las cargas a las que estos serán sometidos.

2.2.2.4.3. Comparación de Suelos

El CBR permite comparar diferentes tipos de suelos y determinar cuál es más adecuado para la construcción de carreteras y pavimentos.

2.2.2.4.4. Relación con el Tráfico

El valor de CBR necesario dependerá del tipo y volumen de tráfico que se espera en la carretera. Áreas con tráfico más pesado requerirán suelos con valores de CBR más altos.

2.2.2.4.5. Estabilidad

Un valor de CBR más alto indica una mayor capacidad de carga y una mayor resistencia del suelo a la deformación y el asentamiento.

2.2.2.4.6. Mejora del CBR

En algunos casos, se pueden utilizar técnicas de estabilización del suelo para incrementar y mejorar el valor de CBR, como la adición de materiales como cemento, cal u otros estabilizantes.

2.2.2.5. Capacidad de Soporte

La capacidad de soporte se define como la aptitud que tiene un suelo para resistir las cargas impuestas por una estructura sin sufrir deformaciones excesivas o fallas. Una evaluación adecuada de la capacidad de soporte garantiza que el terreno pueda sostener las cargas de manera segura y estable (Izuloaga, 2023).

Para determinar la capacidad de soporte de un suelo, se realizan diversas pruebas geotécnicas. Entre las más comunes se encuentran los ensayos de penetración estándar (SPT) y los ensayos de placa de carga. Estas pruebas permiten evaluar las propiedades mecánicas del suelo y determinar su resistencia y deformabilidad. Los resultados obtenidos sirven como base para el diseño y cálculo de las cimentaciones en proyectos de construcción (Geotecnia, 2017).

El límite de carga admisible es el máximo esfuerzo que el suelo puede soportar sin exceder ciertos umbrales de deformación o asentamiento. Este valor asegura que las estructuras no experimenten asentamientos que puedan comprometer su integridad o funcionalidad. La capacidad de soporte puede variar según la composición del suelo, su densidad, contenido de agua y condiciones de consolidación, entre otros factores geotécnicos (Lidia, 2023a).

La distribución de las cargas sobre el suelo también influye significativamente en su capacidad de soporte. Las cargas pueden ser concentradas, distribuidas o dinámicas, y cada tipo afecta de manera distinta al comportamiento del terreno. (Cruz, 2020).

La elección del tipo de cimentación—ya sea superficial o profunda—depende directamente de la capacidad de soporte del suelo. Una evaluación precisa permite diseñar cimentaciones que sean sólidas y estables, adecuadas para las condiciones específicas del terreno. En situaciones donde el suelo no posee la capacidad de soporte requerida, es posible mejorar sus propiedades mediante técnicas como la compactación, la inyección de lechada (grout) o la instalación de pilotes (Guerrero, 2024).

La capacidad de soporte es, por tanto, un parámetro que garantiza que las cimentaciones sean capaces de transmitir las cargas al suelo sin provocar asentamientos o deformaciones que puedan afectar la seguridad y durabilidad de la estructura (Nuñez, 2023).

2.2.2.6. Módulo de Resiliencia

El módulo de resiliencia es un parámetro que mide la capacidad de un material para recuperar energía después de haber sido deformado elásticamente y posteriormente liberado. Este módulo es utilizado en el diseño y análisis de pavimentos, donde los materiales están sometidos a cargas repetitivas debido al tránsito vehicular (Pérez et al., 2016).

En el ámbito de los pavimentos, el módulo de resiliencia se utiliza para evaluar cómo los materiales, como las capas de base y subbase, resisten las cargas cíclicas y recuperan su forma original tras cada aplicación de carga. Un material con un alto módulo de resiliencia es capaz de soportar deformaciones elásticas sin sufrir daños permanentes, lo que contribuye a la durabilidad y al buen desempeño del pavimento a lo largo del tiempo (Instituto Mexicano de Transportes, 2001).

Este módulo está relacionado con el módulo de elasticidad, aunque presenta diferencias significativas. Mientras el módulo de elasticidad mide la rigidez del material bajo cargas estáticas, el módulo de resiliencia considera la capacidad del material para absorber y liberar energía durante deformaciones elásticas bajo cargas repetitivas. Matemáticamente, se define como la pendiente del tramo elástico de la curva esfuerzo-deformación obtenida en ensayos de carga repetida (Andy, 2024). El módulo de resiliencia permite seleccionar materiales que puedan soportar las condiciones reales de tráfico sin experimentar deformaciones permanentes que comprometan la integridad estructural. Un conocimiento preciso de este parámetro ayuda a optimizar el espesor de las capas y a predecir el comportamiento a largo plazo del pavimento bajo cargas dinámicas (Pérez et al., 2016).

Para determinar el módulo de resiliencia de los materiales utilizados en pavimentos, se llevan a cabo ensayos específicos, como el ensayo triaxial de carga repetida. Estos ensayos simulan las condiciones de carga y confinamiento a las que el material estará expuesto en el campo, proporcionando datos valiosos sobre su comportamiento elástico bajo condiciones controladas (Limaymanta & Gutierrez, 2003).

La capacidad de resiliencia de los suelos y materiales empleados en pavimentos es previene deformaciones permanentes y evitar fallas prematuras. En el caso de utilizar materiales alternativos, como el material celular ligero como reemplazo del material granular en la base de pavimentos flexibles, se debe evaluar el módulo de resiliencia para asegurar que cumpla con los requerimientos estructurales y de durabilidad exigidos por las normativas vigentes (Instituto Mexicano de Transportes, 2001).

2.2.3. *Vías y pavimentos*

2.2.3.1. **Tipos de vías**

La clasificación de las vías se rige por el "Manual de Diseño Geométrico DG-2018", establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Esta normativa proporciona las directrices para el diseño y clasificación de las carreteras, considerando factores como la demanda de tránsito y las características orográficas del terreno (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015).

Según el DG-2018, las vías se clasifican principalmente en función de su jerarquía funcional y categoría técnica. La jerarquía funcional se refiere al papel que desempeña la vía dentro de la red vial, mientras que la categoría técnica considera aspectos geométricos y de diseño específicos para cada tipo de vía.

En cuanto a la jerarquía funcional, las vías se dividen en:

- Red Vial Nacional (RVN): Comprende las carreteras de mayor importancia a nivel nacional, conectando las principales ciudades, puertos, aeropuertos y fronteras. Estas vías facilitan el transporte de personas y mercancías a lo largo del país, siendo necesarios para el desarrollo económico y social
- Red Vial Departamental (RVD): Incluye las carreteras que interconectan capitales de departamento, provincias y localidades de importancia regional. Su función es articular las redes viales nacionales con las locales, promoviendo el desarrollo regional
- Red Vial Vecinal (RVV): Comprende las vías que conectan centros poblados menores, comunidades rurales y zonas de producción agrícola. Son el acceso a servicios básicos y para el desarrollo local.

La presente investigación contempla el estudio de un tramo de la red vial Nacional, la cual se encuentra detallada y desarrollada en el ítem 3.9 Procedimiento de Recolección de Datos.

En relación con la categoría técnica, el DG-2018 clasifica las vías considerando la demanda de tránsito y la orografía del terreno:

- Demanda de tránsito: Se establece en función del volumen de tráfico expresado en el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA). Según este criterio, las vías se categorizan en clases que van desde Clase E (baja demanda) hasta Clase A (alta demanda), donde las vías de Clase A están diseñadas para soportar volúmenes de tráfico superiores a 5,000 vehículos por día.

- Orografía: El terreno se clasifica en plano, ondulado y montañoso, lo cual influye en los parámetros de diseño geométrico como radios de curvatura, pendientes máximas y visibilidad. Este criterio adapta el diseño de la vía a las condiciones topográficas y garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios.

El DG-2018 establece además especificaciones detalladas para cada tipo de vía, incluyendo anchos de calzada, carriles, bermas, y elementos de seguridad vial. Por ejemplo, las vías de la Red Vial Nacional de Clase A en terreno plano requieren anchos de calzada mayores y radios de curvatura más amplios que las vías de menor jerarquía o en terrenos montañosos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015).

El cumplimiento de estas normativas garantiza la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de la infraestructura vial en el Perú. La correcta clasificación y diseño de las vías permiten optimizar los recursos disponibles y atender adecuadamente las necesidades de movilidad y transporte de la población.

2.2.3.2. Vías asfaltadas

Las vías asfaltadas, también conocidas como carreteras pavimentadas con mezcla asfáltica, constituyen uno de los tipos más comunes de infraestructura vial en el Perú. Estas vías utilizan mezclas asfálticas como material de pavimentación, proporcionando una superficie de rodadura suave y durable que facilita el tránsito vehicular y contribuye al desarrollo económico y social al conectar áreas urbanas y rurales.

Según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), las vías asfaltadas se diseñan considerando criterios técnicos y normativos específicos que garantizan su funcionalidad y seguridad. Este manual establece las directrices para el diseño geométrico, estructural y de materiales, asegurando que las carreteras cumplan con los estándares requeridos para soportar las cargas de tránsito previstas y las condiciones ambientales del país.

Las vías asfaltadas se componen de varias capas estructurales, cada una con funciones específicas:

- Capa de rodadura: Es la capa superior en contacto directo con los vehículos. Está compuesta por una mezcla asfáltica diseñada para resistir las sollicitaciones del tránsito y las condiciones climáticas. Proporciona una superficie de rodadura suave, segura y confortable para los usuarios.
- Base y subbase: Son capas granulares o estabilizadas que brindan soporte estructural al pavimento. Distribuyen las cargas transmitidas por la capa de rodadura hacia el

suelo de fundación, reduciendo las tensiones y previniendo deformaciones excesivas.

- Subrasante: Es el suelo natural o compactado que sirve como soporte para las capas superiores del pavimento. Su adecuada preparación y compactación son garantizan la estabilidad y durabilidad de la estructura vial.

El diseño de las vías asfaltadas debe considerar las características del tránsito, la topografía, el clima y los materiales disponibles. Las normativas locales establecen parámetros como el ancho de calzada, los radios de curvatura, las pendientes máximas y los peraltes, adaptados a las condiciones específicas del proyecto y a la clasificación de la vía dentro de la red vial nacional, departamental o vecinal.

Las ventajas del uso de mezclas asfálticas en pavimentos flexibles incluyen su flexibilidad para adaptarse a deformaciones sin agrietarse, la rapidez en su construcción y reparación, y su capacidad para proporcionar una superficie de alta calidad para el tránsito. Sin embargo, se debe de llevar a cabo un mantenimiento adecuado para prolongar su vida útil y evitar deterioros prematuros como grietas, baches y deformaciones.

La durabilidad y desempeño de las vías asfaltadas dependen en gran medida de la calidad de los materiales y de la correcta ejecución durante su construcción. El control de calidad en cada etapa, desde la producción de la mezcla asfáltica hasta su colocación y compactación en obra, asegura que el pavimento cumpla con las especificaciones técnicas y pueda resistir las cargas y condiciones ambientales a las que estará sometido (MTC, 2018).

Además, el diseño estructural del pavimento debe considerar los principios establecidos en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Materiales y Pavimentos del MTC, que proporciona métodos para dimensionar el espesor de las capas en función del Tránsito Equivalente de Diseño (TED) y las características de los materiales empleados (MTC, 2014).

Las vías asfaltadas deben cumplir con las normativas de señalización y seguridad vial establecidas en el Manual de Dispositivos de Control de Tránsito Automotor para Calles y Carreteras del MTC, garantizando una adecuada orientación y protección para los usuarios de la vía.

2.2.3.3. Capas de una vía asfaltada

Las vías asfaltadas están constituidas por una estructura estratificada diseñada para ofrecer una superficie de rodadura durable y capaz de resistir las cargas del tráfico vehicular, las condiciones climáticas y otros factores que puedan afectar su integridad. Cada capa cumple un rol específico dentro del pavimento, contribuyendo al desempeño general y la vida útil de la vía.

Según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, la estructura típica de un pavimento flexible se compone de las siguientes capas:

2.2.3.3.1. Subrasante

Es la capa más profunda y está formada por el suelo natural, que debe ser preparado o mejorado para cumplir con los requisitos de capacidad de soporte y estabilidad necesarios. La subrasante actúa como el cimiento del pavimento y su adecuada preparación evita problemas futuros en la estructura vial (MTC, 2018).

2.2.3.3.2. Subbase

Ubicada sobre la subrasante, la subbase es una capa de materiales granulares compactados cuya función principal es distribuir las cargas transmitidas por el tráfico de manera uniforme hacia el suelo subyacente. Además, contribuye a mejorar el drenaje y proporciona estabilidad adicional al pavimento. Los materiales utilizados suelen ser gravas o agregados seleccionados que cumplen con las especificaciones técnicas establecidas (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015).

2.2.3.3.3. Base

Situada encima de la subbase, la capa de base proporciona soporte estructural al pavimento. Está compuesta por materiales granulares de mayor calidad y resistencia que los utilizados en la subbase. La base debe ser adecuadamente compactada para lograr la resistencia y estabilidad requeridas, y su correcta ejecución establece el desempeño del pavimento. Esta capa también ayuda a prevenir la ascensión capilar de agua hacia las capas superiores, protegiendo la integridad de la estructura (MTC, 2014).

2.2.3.3.4. Carpeta Asfáltica (Capa de rodadura)

Es la capa superior del pavimento y está en contacto directo con el tránsito vehicular. Compuesta por mezclas asfálticas diseñadas para ser duraderas y resistentes al desgaste, su función es soportar las cargas del tráfico y ofrecer una superficie de rodadura segura y confortable. La carpeta asfáltica debe cumplir con características específicas de resistencia, adherencia y textura superficial para garantizar una adecuada fricción entre los neumáticos y el pavimento, contribuyendo a la seguridad vial (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015).

2.2.3.4. Propiedades de la base

La base de un pavimento es una capa que influye directamente en la integridad, durabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial. Ubicada entre la subbase y la capa de

rodadura, está compuesta principalmente por materiales granulares y tiene la función de proporcionar soporte y distribuir las cargas generadas por el tráfico vehicular (Guerrero, 2021).

Una de las propiedades de la base es su capacidad de carga. Esta debe ser suficiente para soportar las cargas del tráfico sin experimentar deformaciones excesivas ni daños permanentes. Una base con buena capacidad de carga previene hundimientos y deformaciones en la superficie de rodadura, manteniendo así la seguridad y comodidad en la circulación (Mendieta, 2016).

La base debe resistir deformaciones y asentamientos bajo cargas dinámicas, garantizando que el pavimento se mantenga nivelado y estable a lo largo del tiempo. Así se evita irregularidades que puedan afectar negativamente la experiencia de los usuarios y la vida útil de la vía (Pari, 2018).

El drenaje es un aspecto crítico en el desempeño de la base. Debe facilitar la evacuación del agua para evitar la acumulación de humedad, lo cual podría provocar erosión y debilitamiento de la estructura vial. Un drenaje eficiente contribuye a prolongar la vida útil del pavimento y a reducir los costos de mantenimiento (P&H Construyendo Soluciones, 2022).

La base debe ser capaz de resistir los efectos de las fluctuaciones de temperatura sin deformarse ni agrietarse, lo que ayuda a mantener la integridad del pavimento frente a tensiones térmicas (De La Cruz, 2020).

La durabilidad es intrínseca a la base, asegurando que mantenga sus propiedades mecánicas frente a la acción del tráfico, el clima y otros factores ambientales. Además, debe poseer la rigidez necesaria para distribuir las cargas de manera uniforme, evitando concentraciones de tensiones que puedan generar fallas estructurales. Una cierta elasticidad también es beneficiosa, ya que permite absorber las deformaciones causadas por las cargas vehiculares, contribuyendo a la resiliencia del pavimento (Auccahuaqui & Corahua, 2016).

La interacción con las capas superiores es garantía de una transición adecuada entre las distintas capas del pavimento. La base debe ser compatible con la capa de rodadura para prevenir problemas de adherencia y desprendimientos, asegurando así la cohesión y continuidad estructural del sistema vial (Blogger, 2024).

Una construcción y compactación adecuadas aseguran una distribución uniforme de las cargas y previenen asentamientos no deseados. Esto se logra mediante un estricto control de calidad durante la construcción, siguiendo las especificaciones técnicas establecidas en las normativas vigentes (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2011).

2.2.3.5. Flexotracción

La flexotracción es un fenómeno mecánico que se refiere a la combinación de esfuerzos de tracción y compresión que experimenta un material cuando está sometido a fuerzas que generan momentos de flexión. Las cargas dinámicas inducidas por el tránsito vehicular generan momentos de flexión en las capas del pavimento, incluyendo la base. Estas cargas pueden provocar tensiones y deformaciones que, si no son adecuadamente consideradas en el diseño y construcción, pueden conducir a fisuras y deterioros prematuros del pavimento (Yepes, 2023).

Cuando un vehículo transita sobre una carretera, las ruedas aplican cargas que generan esfuerzos variables en las diferentes capas del pavimento. La flexotracción distribuye estas cargas de manera no uniforme a lo largo de la estructura, provocando tensiones de tracción en la fibra inferior y de compresión en la fibra superior de las capas sometidas a flexión. Si las tensiones de tracción superan la resistencia del material, pueden aparecer agrietamientos en la parte inferior de la capa, que pueden propagarse hacia la superficie y comprometer la integridad del pavimento (Icotec, 2009).

La capacidad de un material para resistir la flexotracción depende de sus propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción y compresión. En el diseño de pavimentos, se selecciona materiales que puedan manejar las tensiones inducidas por la flexotracción sin sufrir daños significativos. Además, se pueden emplear técnicas de refuerzo en la base, como el uso de geotextiles o geogrillas, para aumentar la capacidad del pavimento para resistir los momentos de flexión y mejorar su desempeño estructural (Geofantex, 2024).

El análisis de la flexotracción es una parte integral en el diseño estructural de pavimentos flexibles. Mediante modelos teóricos y ensayos de laboratorio, se pueden predecir las tensiones y deformaciones en las diferentes capas, lo que permite dimensionar adecuadamente el espesor de la base y seleccionar materiales que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad. De esta manera, se contribuye a prolongar la vida útil del pavimento y a reducir los costos asociados al mantenimiento y rehabilitación (Aristizabal et al., 2014).

2.2.3.6. Deformación vertical

La deformación vertical se refiere al cambio en la altura o elevación de una estructura o material debido a la aplicación de cargas, tensiones o fuerzas. Puede impactar significativamente la estabilidad, durabilidad y seguridad de la infraestructura vial.

2.2.3.6.1. Causas de la deformación

La deformación vertical en pavimentos puede ser provocada por diversos factores, entre los cuales se encuentran la carga del tráfico vehicular, los cambios de temperatura, los

asentamientos del suelo y el comportamiento mecánico de los materiales utilizados en la construcción. Las cargas dinámicas generadas por el paso de vehículos inducen tensiones y deformaciones en las diferentes capas del pavimento, las cuales pueden acumularse y generar daños si no se gestionan adecuadamente (Costa, 2019).

2.2.3.6.2. Efectos en el pavimento

Este tipo de deformación puede manifestarse en forma de hundimientos, baches y grietas en la superficie de rodadura. Tales defectos afectan la comodidad y seguridad de la conducción, además de acelerar el deterioro del pavimento y reducir su vida útil. La presencia de deformaciones facilita la infiltración de agua y otros agentes que pueden debilitar la estructura, incrementando los costos de mantenimiento y reparación (Tella, 2024).

2.2.3.6.3. Relación con la flexotracción

Existe una estrecha relación entre la deformación vertical y la flexotracción. Las cargas aplicadas sobre la superficie del pavimento generan momentos de flexión que pueden causar deformaciones en las capas inferiores. Si las tensiones inducidas superan la resistencia de los materiales, pueden producirse fallas estructurales. Por ello, se debe de considerar ambos fenómenos en el diseño y análisis de pavimentos para garantizar su integridad y durabilidad (Massenlli & Paiva, 2019).

2.2.3.6.4. Respuesta de los materiales

Los materiales empleados en las diferentes capas del pavimento responden de manera distinta ante las deformaciones verticales. La capacidad de estos materiales para resistir y distribuir eficazmente las deformaciones mantiene la integridad estructural. Materiales con propiedades elásticas adecuadas y una buena capacidad de soporte contribuyen a reducir las deformaciones y prolongar la vida útil del pavimento (Rondon & Reyes, 2009).

2.2.3.6.5. Medición y evaluación

La deformación vertical se mide y evalúa mediante técnicas como las pruebas de deflexión, las cuales permiten identificar áreas problemáticas y determinar si las deformaciones están dentro de los límites aceptables. Estas evaluaciones sirven para el mantenimiento preventivo y la planificación de intervenciones correctivas oportunas en la infraestructura vial (Bravo, 2020).

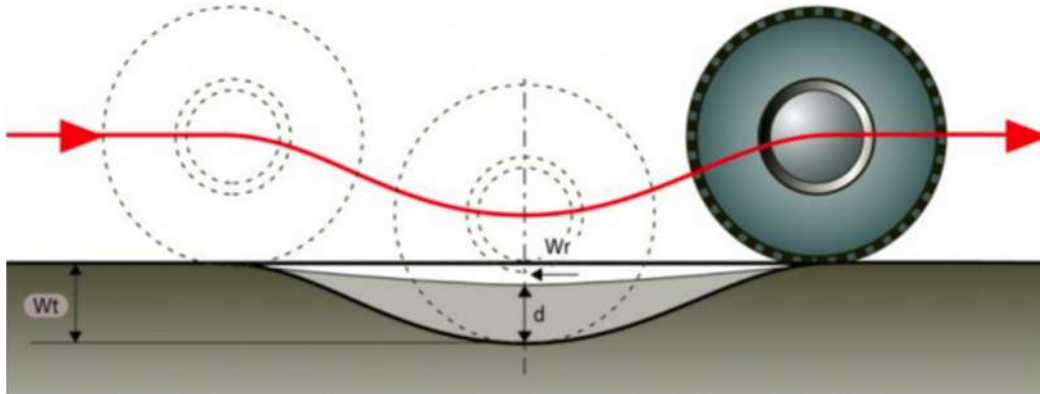
2.2.3.6.6. Importancia de la base

La base del pavimento es la encargada de la distribución de las deformaciones verticales. Una base adecuadamente diseñada y construida ayuda a distribuir las cargas de manera uniforme, minimizando las deformaciones en las capas superiores. El uso de materiales

de calidad y una correcta compactación garantizan el desempeño estructural y evitar daños prematuros en el pavimento (Ampuero, 2013).

Figura 14.

Deformación vertical de pavimento por carga vehicular



Nota: Tomado de Rovem Partner (2023)

2.2.3.7. Espesor de la base

El espesor de la base se refiere a la medida vertical de la capa de base, situada entre la subbase y la capa de rodadura. Este espesor influye directamente en la capacidad de carga, la durabilidad y la estabilidad de la infraestructura vial.

Un espesor adecuado permite una distribución uniforme de las cargas del tráfico a lo largo del pavimento. Si el espesor es insuficiente, pueden generarse tensiones concentradas y deformaciones prematuras en las capas superiores, afectando la integridad del pavimento. Además, un mayor espesor de la base suele implicar una mayor capacidad para soportar cargas pesadas, lo cual es necesario en carreteras con alto volumen de tráfico o donde circulan vehículos de gran tonelaje (Sánchez, 2003).

La resistencia a la deformación es otra propiedad que se ve influenciada por el espesor de la base. Una base más gruesa contribuye a prevenir hundimientos y baches en la superficie, mejorando el desempeño del pavimento y reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo. Asimismo, el espesor de la base puede afectar la forma en que se distribuyen las tensiones generadas por la flexotracción; una base más espesa puede absorber parte de estas tensiones, disminuyendo su impacto en las capas superiores (Rondon & Reyes, 2009).

Un mayor espesor puede contribuir al aislamiento térmico del pavimento, reduciendo las fluctuaciones de temperatura en las capas superiores y disminuyendo las tensiones térmicas que pueden provocar agrietamientos o deformaciones. De esta forma se mantiene la integridad estructural en condiciones climáticas adversas (URSA, 2020).

Sin embargo, el espesor de la base debe determinarse mediante análisis y diseño estructural, siguiendo las normativas vigentes y considerando factores como las cargas de

diseño, las propiedades de los materiales y las condiciones ambientales. Un espesor excesivo puede aumentar los costos de construcción y no ser económicamente eficiente, por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre el desempeño estructural y la viabilidad económica (Pérez, 2019).

2.2.3.8. Adherencia

La adherencia en pavimentos flexibles se refiere a la capacidad de las capas que conforman el pavimento como la subbase, base y carpeta de rodadura para mantenerse unidas y funcionar como una estructura integrada. La cohesión asegura la transferencia eficiente de cargas y el desempeño adecuado del pavimento a lo largo del tiempo. Una adherencia óptima ayuda a prevenir problemas como el deslizamiento entre capas, fisuras reflejas y fallas prematuras en la estructura vial.

Diversos factores pueden afectar la adherencia entre las capas de un pavimento:

- **Condiciones de la superficie:** La limpieza y preparación adecuada de las superficies antes de la colocación de una nueva capa son esenciales. Superficies libres de polvo, aceite y otros contaminantes mejoran significativamente la adherencia (Vargas, 2008).
- **Materiales de enlace:** El uso de emulsiones asfálticas, asfaltos líquidos y otros materiales de unión puede mejorar la adherencia entre capas. Estos materiales actúan como agentes ligantes, promoviendo una mejor cohesión entre las capas adyacentes (Vargas, 2008).
- **Temperatura:** La temperatura durante la colocación y compactación de las capas influye en la capacidad de los materiales para unirse adecuadamente. Temperaturas demasiado bajas pueden reducir la adhesividad de los materiales, mientras que temperaturas adecuadas facilitan la interacción y unión entre capas (Vargas, 2008).
- **Compactación:** Una compactación adecuada asegura que las capas estén bien unidas y que no existan vacíos que puedan comprometer la integridad estructural del pavimento. La densidad lograda durante la compactación afecta directamente la adherencia (Vargas, 2008).
- **Tráfico inicial:** Permitir el tráfico vehicular sobre un pavimento que no ha alcanzado la adherencia adecuada puede causar desplazamientos y fallas. Se ha de respetar los tiempos de curado y fraguado antes de abrir la vía al tránsito (Vargas, 2008).

Para mejorar la adherencia en pavimentos flexibles, se recomiendan las siguientes prácticas:

- Aplicación de una capa de liga: La utilización de una capa de liga, también conocida como riego de liga, entre las capas de material asfáltico puede mejorar significativamente la adherencia. Este riego consiste en aplicar una emulsión asfáltica que actúa como puente adhesivo entre capas (Rivera, 2022).
- Mezclas modificadas: El uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros o fibras puede aumentar la adherencia y la resistencia al deslizamiento entre capas, mejorando el desempeño general del pavimento (Rivera, 2022).
- Ensayos de adherencia: Realizar ensayos específicos durante la construcción permite verificar que se está logrando la adherencia deseada. Estos ensayos ayudan a identificar problemas potenciales y a tomar medidas correctivas oportunas (Rivera, 2022).
- La adherencia adecuada entre las capas prolonga la vida útil del pavimento y asegurar su desempeño bajo las cargas de tráfico previstas. Un control de calidad y la aplicación de prácticas constructivas adecuadas garantizan la integridad y durabilidad de las estructuras viales (Rivera, 2022).

2.2.3.9. Imprimación Asfáltica

La imprimación asfáltica es un proceso que consiste en la aplicación de una capa de material bituminoso sobre la superficie de la base granular antes de la colocación de la carpeta asfáltica. El propósito principal de esta práctica es preparar la base para recibir la capa de rodadura, mejorando la adherencia entre ambas y sellando la superficie para evitar la penetración de agua.

Esta imprimación cumple varias funciones:

- Mejora de la adherencia: Crea una unión firme entre la base y la capa asfáltica, lo cual estabiliza y hace durable el pavimento. Una adherencia adecuada previene problemas como el deslizamiento entre capas y fisuras reflejas (Construye Mejor, 2024).
- Sellado de la base: Sella la superficie granular, evitando la infiltración de agua que puede debilitar la estructura y causar problemas como deformaciones o bombeo. Especialmente en regiones frías, donde el agua puede congelarse y expandirse, generando daños adicionales (Construye Mejor, 2024).
- Mejora de la compacidad: Ayuda a compactar la superficie de la base, reduciendo la cantidad de polvo y mejorando la cohesión del material. Esto contribuye a una base más sólida y uniforme (Construye Mejor, 2024).

- Control del polvo: Al reducir la presencia de polvo, se facilita la aplicación de la capa asfáltica y se mejora la adherencia, evitando que partículas sueltas interfieran en el proceso (Construye Mejor, 2024).

Para llevar a cabo la imprimación asfáltica, se utilizan diferentes tipos de materiales:

- Emulsiones asfálticas: Son mezclas de asfalto, agua y agentes emulsionantes. Su facilidad de aplicación y capacidad para penetrar en la base granular las hacen muy comunes (Admin de ingecivil, 2018).
- Asfalto líquido: Se emplea cuando se requiere mayor penetración y adherencia, especialmente en bases con materiales de mayor tamaño (Admin de ingecivil, 2018).
- Corte asfáltico: Es una mezcla de asfalto con solventes que permite mejor penetración en bases porosas. Sin embargo, su uso ha disminuido debido a consideraciones ambientales (Admin de ingecivil, 2018).

El proceso de aplicación se realiza siguiendo una secuencia específica:

- Preparación de la superficie: La base granular debe estar bien compactada y limpia, libre de polvo, suciedad y materiales sueltos, para garantizar una buena adherencia (Pinto, 2022).
- Aplicación del material: Se aplica el material bituminoso de manera uniforme sobre la base, generalmente con un distribuidor de asfalto que asegura una dosificación precisa (Pinto, 2022).
- Tiempo de curado: Tras la aplicación, es necesario un tiempo de curado para que el material penetre y se adhiera adecuadamente. Este periodo varía según el tipo de material y las condiciones climáticas (Pinto, 2022).
- Control de calidad: Se verifican aspectos como la uniformidad y la cantidad de material aplicado para asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas (Pinto, 2022).

La implementación de la imprimación asfáltica ofrece varias ventajas:

- Aumento de la vida útil del pavimento: Al mejorar la adherencia y proteger la base, se contribuye a la durabilidad del pavimento, reduciendo la necesidad de reparaciones frecuentes (Construye Mejor, 2024).
- Reducción del riesgo de daños por humedad: Al sellar la base, se previene la infiltración de agua, evitando problemas como la erosión y la disminución de la capacidad de carga (Construye Mejor, 2024).

- Mejora en el desempeño estructural: Una buena adherencia entre capas garantiza una transferencia eficiente de cargas, que mejora el comportamiento mecánico del pavimento (Construye Mejor, 2024).

En las regiones frías, la imprimación asfáltica adquiere una relevancia adicional. Las condiciones climáticas adversas pueden acelerar el deterioro de los pavimentos si no se toman medidas adecuadas. La imprimación contribuye a proteger la base de los efectos del agua y las bajas temperaturas, reduciendo el riesgo de daños por congelación y descongelación.

Es necesario seleccionar el material de imprimación adecuado y aplicar correctamente el proceso, siguiendo las normas y especificaciones técnicas establecidas. Un control de calidad adecuado durante la construcción asegura que se logren los beneficios esperados y se eviten problemas futuros en la infraestructura vial.

2.2.3.10. Vida útil de un pavimento

La vida útil de un pavimento se define como el período durante el cual mantiene un nivel satisfactorio de servicio y funcionalidad antes de requerir una rehabilitación o reconstrucción significativa. Este lapso puede variar considerablemente en función de diversos factores que influyen en el desempeño y durabilidad de la infraestructura vial.

Los pavimentos flexibles y rígidos tienen diferentes características estructurales y comportamientos ante las cargas y condiciones ambientales, lo que afecta su longevidad. Las condiciones ambientales, como la exposición al sol, la lluvia y el intemperismo, así como la eficacia del sistema de drenaje. La acción del agua y las variaciones de temperatura pueden acelerar el deterioro del pavimento si no se gestionan adecuadamente (Leiva et al., 2016).

Un tráfico intenso y la circulación de vehículos pesados incrementan las sollicitaciones sobre el pavimento, acelerando su desgaste y potencialmente reduciendo su vida útil. Por ello, se debe de considerar estas variables en el diseño estructural para asegurar que el pavimento pueda soportar las condiciones de servicio previstas (Gonzalez, 2012).

La calidad de los materiales empleados, incluidos los agregados y las mezclas asfálticas, influye directamente en la durabilidad del pavimento. Materiales de alta calidad y correctamente seleccionados pueden extender significativamente la vida útil, mientras que materiales deficientes pueden provocar fallas prematuras. Asimismo, un proceso constructivo adecuado garantiza que el pavimento cumpla con las especificaciones técnicas y alcance el desempeño esperado a lo largo del tiempo (Ortiz, 2017).

Para extender la vida útil del pavimento, se debe de implementar actividades de mantenimiento oportunas. El mantenimiento regular, que incluye intervenciones preventivas y correctivas, puede mitigar el deterioro y prolongar la funcionalidad de la vía. Además, la

rehabilitación realizada en el momento adecuado puede evitar la necesidad de una reconstrucción total, optimizando los recursos y asegurando la continuidad del servicio (Grupo MOA, 2024).

2.2.3.11. Módulo o relación de Poisson

La relación de Poisson es una constante adimensional que expresa la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal de un material cuando es sometido a una carga axial. Se define como el cociente negativo entre ambas deformaciones:

$$\mu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Donde ε_t corresponde a la deformación perpendicular a la carga y ε_l a la deformación en la dirección de la carga. En un material que se alarga, normalmente su dimensión transversal disminuye; en uno que se comprime, su dimensión transversal aumenta. Esa proporción es la que representa la relación de Poisson.

Tabla 5.

Módulo o relación de Poisson

Capa	μ
Mezclas asfálticas	0.2
Capas granulares	
Material celular ligero	0.20
Subrasante	0.1

Fuente: Tomado de Agurto (2020)

A mayor valor de μ , mayor es la deformación lateral para una misma deformación longitudinal; a menor valor de μ , menor es ese cambio lateral.

2.2.3.12. Método de diseño AASHTO 93

El método AASHTO 93 constituye uno de los procedimientos más difundidos y utilizados a nivel mundial para el diseño estructural de pavimentos flexibles. Este método, desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), tiene un enfoque empírico basado en los resultados del AASHO Road Test realizado en Ottawa, Illinois, entre 1958 y 1960. Dicho experimento permitió establecer relaciones funcionales entre las cargas vehiculares, las características estructurales del pavimento y su desempeño a lo largo del tiempo.

El principio fundamental del método AASHTO 93 radica en la determinación del Número Estructural (SN), el cual representa la capacidad estructural requerida del pavimento para soportar las cargas de tránsito durante un periodo de diseño específico, manteniendo condiciones aceptables de serviciabilidad. Este número estructural integra el aporte de cada una de las capas del pavimento (carpeta asfáltica, base y subbase), considerando sus

propiedades mecánicas y condiciones de drenaje, lo cual se fundamenta bajo la siguiente ecuación general:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$$

Donde:

- a_i : coeficientes estructurales
- D_i : espesores de las capas
- m_i : coeficientes de drenaje

Estos coeficientes estructurales representan la contribución relativa de cada material a la capacidad estructural del pavimento, siendo función de propiedades como el módulo resiliente, la resistencia y la calidad del material.

Para esta metodología, también se realiza la estimación del tránsito de diseño, expresado en términos de Ejes Simples Equivalentes (ESALs). Este concepto permite transformar diferentes configuraciones de carga vehicular en una carga estándar equivalente, facilitando el análisis estructural del pavimento, y nos ayudará a cuantificar el daño acumulado producido por el tránsito a lo largo de la vida útil del pavimento. Además se usan parámetros como la serviciabilidad, confiabilidad, variabilidad los cuales son conceptos también introducidos por esta metodología.

A pesar de su amplia aplicación, el método AASHTO 93 presenta ciertas limitaciones inherentes a su naturaleza empírica:

- Está basado en condiciones específicas del AASHTO Road Test, lo que limita su extrapolación a diferentes contextos geográficos y climáticos.
- No considera explícitamente la distribución de esfuerzos y deformaciones dentro de la estructura del pavimento.
- No modela de manera directa los mecanismos de falla, como la fatiga o la deformación permanente.
- Depende en gran medida de correlaciones empíricas, lo que puede introducir incertidumbre en el diseño.

Estas limitaciones han motivado el desarrollo de enfoques más avanzados, como el método mecanístico-empírico, el cual complementa el análisis incorporando principios de la mecánica de materiales. En la presente investigación, el método AASHTO 93 es empleado para el diseño estructural del pavimento flexible considerando el uso de material granular convencional y su reemplazo por material celular ligero en la capa de base. Los resultados obtenidos mediante este enfoque permiten establecer una base comparativa frente al método

mecanístico–empírico, evaluando así las variaciones en el comportamiento estructural, espesores de diseño y costo de inversión por kilómetro.

2.2.3.13. Método de diseño mecanístico-empírico en pavimentos

El método mecanístico–empírico representa una evolución en el diseño de pavimentos, al integrar principios de la mecánica de materiales con modelos empíricos derivados de observaciones experimentales y de campo. Este enfoque permite analizar de manera más realista el comportamiento estructural del pavimento frente a cargas vehiculares, superando las limitaciones de los métodos puramente empíricos como el AASHTO 93.

En este método, el pavimento es idealizado como un sistema multicapa compuesto por materiales homogéneos, isotrópicos y linealmente elásticos, donde cada capa se caracteriza por propiedades mecánicas específicas, tales como el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (ν). A partir de la aplicación de cargas vehiculares, generalmente modeladas como cargas circulares uniformemente distribuidas, se determinan los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en puntos críticos de la estructura.

El análisis mecanístico se basa en teorías de elasticidad multicapa, que permiten calcular la respuesta estructural del pavimento ante la acción de cargas repetidas. Entre las respuestas más relevantes se encuentran:

- Deformación horizontal (ϵ_t) en la fibra inferior de la carpeta asfáltica
- Deformación vertical (ϵ_v) en la parte superior de la subrasante

Estas respuestas son fundamentales para evaluar los principales mecanismos de falla del pavimento, y bajo esta premisa se tienen los siguientes criterios de falla:

- Criterio por fatiga en pavimento:

Se produce por la repetición de cargas que generan fisuras en la carpeta asfáltica. Está asociada a la deformación horizontal de tracción (ϵ_t) en la parte inferior de la capa asfáltica. Se expresa como el número de repeticiones de carga admisibles antes de la falla:

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{k_2}$$

- Criterio por deformación permanente (ahuellamiento):

Se origina principalmente en la subrasante debido a la acumulación de deformaciones plásticas. Está relacionada con la deformación vertical (ϵ_v). Se expresa como:

$$N_r = k_2 \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{k_3}$$

Estos criterios permiten verificar si la estructura del pavimento cumple con la vida útil de diseño en función del tránsito proyectado. En la presente investigación, el método mecanístico–empírico es empleado para evaluar el comportamiento estructural del pavimento flexible considerando el uso de material celular ligero como reemplazo del material granular en la capa de base. A partir de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente, se determinan las deformaciones críticas del sistema y se verifican los criterios de falla por fatiga y deformación permanente. Los resultados obtenidos mediante este enfoque permiten comparar el desempeño estructural del pavimento frente al método AASHTO 93, evaluando la influencia del material celular ligero en la reducción de espesores, mejora del módulo de elasticidad y optimización del costo de inversión.

2.3. Marco Conceptual

1. **Optimización Estructural:** Proceso de mejorar la eficacia, funcionalidad y seguridad de las estructuras en proyectos de diseño e ingeniería, buscando la mejor distribución de materiales y cargas para maximizar la resistencia y minimizar el peso y costos (Martinez, 2024).
2. **Durabilidad:** Capacidad de un material o estructura para resistir el desgaste, la degradación y las condiciones ambientales adversas durante su vida útil (Villegas, 2013).
3. **Adherencia:** Capacidad de un material para unirse firmemente a otro, asegurando la cohesión entre capas en una estructura de pavimento (Villegas, 2013).
4. **Propiedades Mecánicas:** Características físicas de un material relacionadas con su comportamiento bajo cargas, incluyendo resistencia, elasticidad y deformación (Villegas, 2013).
5. **Flexibilidad:** Capacidad de un material o estructura para doblarse o deformarse sin romperse bajo la aplicación de cargas o fuerzas (Villegas, 2013).
6. **Resistencia a Fatiga:** Capacidad de un material para soportar ciclos repetidos de carga y descarga sin experimentar fallos estructurales (Villegas, 2013).
7. **Desempeño Climático:** Evaluación del comportamiento del pavimento bajo condiciones climáticas extremas, especialmente su capacidad para resistir ciclos de fluctuaciones térmicas sin comprometer su integridad (Villegas, 2013).
8. **Dilatación Térmica:** Medida de cuánto se expande o contrae un material debido a cambios en la temperatura; un coeficiente más alto indica una mayor expansión (Villegas, 2013).

9. Eficiencia Económica: Análisis de la viabilidad económica, considerando la optimización de costos en la construcción inicial y la reducción de gastos asociados al mantenimiento a lo largo de la vida útil del pavimento (Villegas, 2013).

10. Resistencia al Deslizamiento: Capacidad de un pavimento para proporcionar tracción y evitar que los vehículos y peatones se deslicen en condiciones húmedas o heladas (Villegas, 2013).

2.4. Formulación de la hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene una mejora en el comportamiento estructural del pavimento flexible del distrito de Sicuani - 2024.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene un incremento en la capacidad de soporte a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.
- Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene una mejora en el módulo de elasticidad a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.
- Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se optimiza los espesores a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.
- Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se optimiza los espesores de la carpeta asfáltica en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.
- El material celular ligero como capa estructural a nivel de base permite obtener una alternativa técnico-económica más favorable

2.5. Variables

2.5.1. Identificación de variables

Variable Independiente:

Material a nivel de Base

Dimensiones:

D1: Material celular ligero

D2: Material granular de cantera

Variable Dependiente 01:

Comportamiento estructural a nivel de base

Dimensiones:

D1: Capacidad de soporte

D2: Módulo de Elasticidad a nivel de base

D3: Espesor a nivel de base

Variable Dependiente 02:

Carpeta asfáltica

Dimensiones:

D1: Espesor de la carpeta asfáltica

Variable Dependiente 03:

Evaluación Técnico - Económica

Dimensiones:

D1: Costo de inversión por kilómetro

Capítulo III: Metodología de la Investigación

3.1. Metodología de la investigación

3.1.1. Método de investigación

Según Sampieri et al. (2018), el método de investigación se refiere al conjunto de pasos sistemáticos que guían el proceso para responder a una pregunta de investigación o resolver un problema. Es el camino ordenado que sigue el investigador para alcanzar los objetivos planteados, combinando principios teóricos y herramientas prácticas que aseguren la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Esta investigación se desarrolla bajo el método hipotético-deductivo porque parte de una hipótesis central sobre el comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular en la base de pavimentos flexibles. Desde esta premisa, se formulan supuestos que son contrastados mediante experimentos controlados, buscando corroborar o refutar las hipótesis iniciales a través de la observación sistemática y el análisis de datos cuantificables.

3.1.2. Enfoque de la investigación

Según Sampieri et al. (2018), el enfoque de una investigación es el paradigma o perspectiva general que define cómo se recopilan, analizan e interpretan los datos. Existen tres enfoques principales: cuantitativo, cualitativo y mixto. El enfoque cuantitativo se caracteriza por el uso de mediciones objetivas y análisis estadísticos para validar hipótesis, con base en datos numéricos recolectados mediante métodos estructurados.

Esta investigación utiliza un enfoque cuantitativo, ya que se centra en la obtención de datos numéricos provenientes de pruebas experimentales, como la resistencia y comportamiento estructural del material celular ligero. Estos datos se analizan estadísticamente para determinar la viabilidad técnica del material en comparación con el material granular, validando o refutando las hipótesis mediante métricas objetivas.

3.1.3. Tipo de investigación

Según Sampieri et al. (2018), el tipo de investigación se clasifica en dos grandes categorías: La investigación básica que se realiza con el objetivo de generar conocimiento nuevo y ampliar teorías existentes, sin una aplicación práctica inmediata. Es fundamentalmente teórica y se orienta al desarrollo científico general y la investigación aplicada que busca resolver problemas específicos mediante el uso del conocimiento existente, adaptándolo a contextos prácticos. Está enfocada en la aplicación directa de los resultados a situaciones reales.

Esta investigación corresponde a una investigación de tipo aplicado porque su objetivo es generar una solución práctica al evaluar el desempeño del material celular ligero como reemplazo del material granular en bases de pavimentos flexibles. Los resultados obtenidos tienen una finalidad concreta: mejorar la construcción vial en el distrito de Sicuani, optimizando los materiales utilizados y contribuyendo al desarrollo de infraestructuras sostenibles. Por tanto, se trata de un estudio con un propósito práctico y contextualizado en un problema real.

3.1.4. Nivel de investigación

Según Sampieri et al. (2018), el nivel de investigación indica el grado de profundidad con que se aborda el estudio. Puede ser exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo. El nivel descriptivo se enfoca en detallar las características o comportamientos de un fenómeno, sin analizar relaciones causales.

Esta investigación es de nivel descriptivo porque busca detallar las propiedades físicas y mecánicas del material celular ligero, así como su desempeño estructural en comparación con el material granular en pavimentos flexibles. Aunque incluye análisis experimentales, el propósito principal es caracterizar el material en términos técnicos.

3.1.5. Diseño de investigación

3.1.5.1. Diseño metodológico

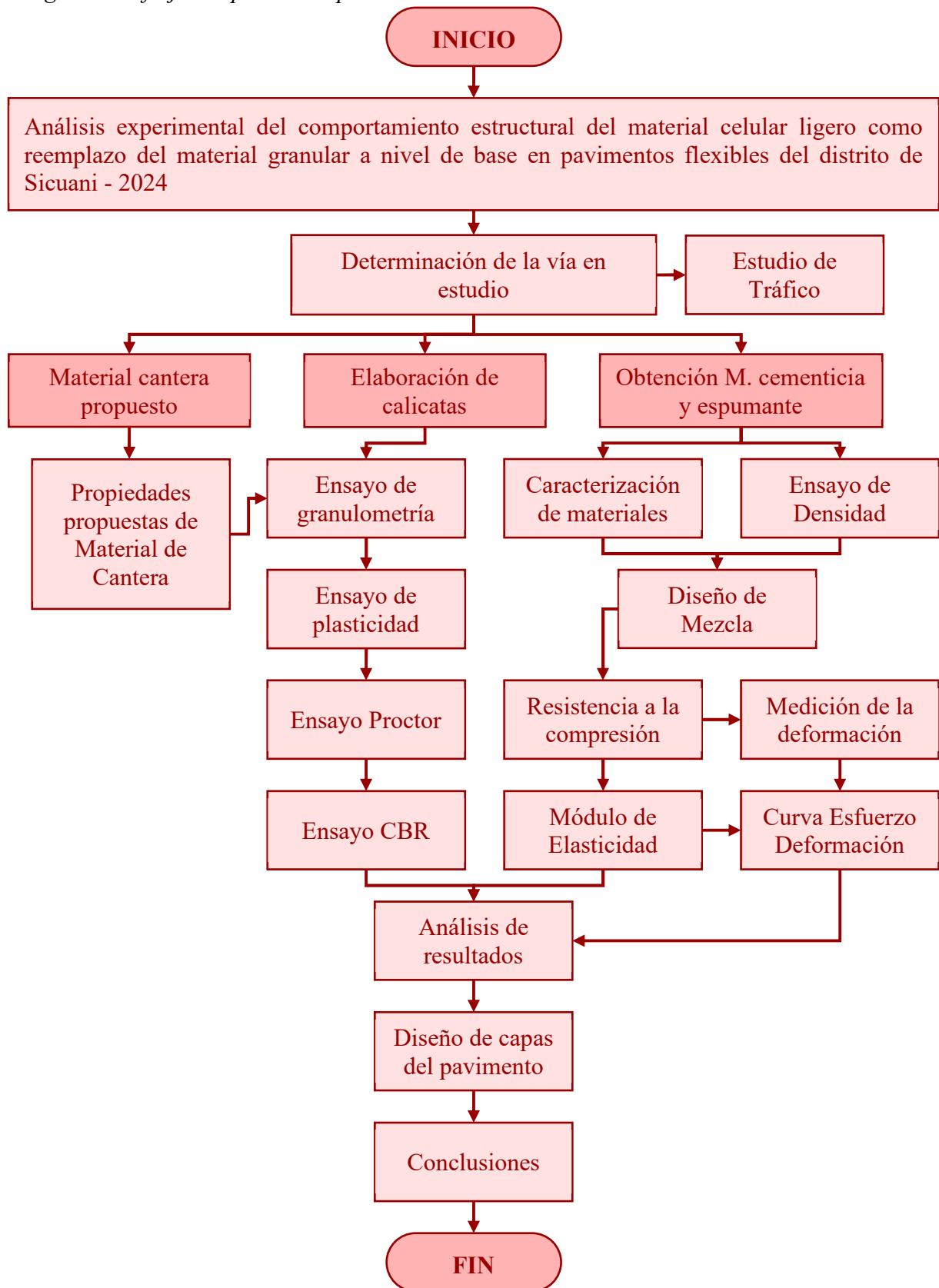
Según Sampieri et al. (2018), el diseño de investigación es el plan o estrategia que se sigue para responder a las preguntas de investigación. Entre los diseños más comunes están el experimental, el cuasiexperimental y el no experimental. El diseño cuasiexperimental se utiliza cuando el investigador manipula las variables independientes, pero no tiene control total sobre las condiciones experimentales.

El diseño de esta investigación es cuasiexperimental, ya que implica la manipulación de variables, como la composición y proporción del material celular ligero en las pruebas de laboratorio. Sin embargo, no existe un control total sobre las condiciones externas, como el comportamiento del material en su entorno natural, lo que limita el alcance a un entorno controlado parcialmente.

3.1.5.2. Diseño de ingeniería

Figura 15.

Diagrama de flujo del proceso experimental



Nota: Elaboración de propia autoría

3.1.6. Población

3.1.6.1. Descripción de la población

Según Sampieri et al. (2018), la población se define como el conjunto total de elementos, individuos, eventos o fenómenos que comparten una característica común y que son objeto de estudio. La población representa el universo al que se desea generalizar los resultados de la investigación. Puede ser finita o infinita, dependiendo de si sus elementos pueden ser contados o no. Es decir, la población establece los límites dentro de los cuales se seleccionará la muestra para llevar a cabo el análisis correspondiente.

En el caso de esta investigación, la población se define como el conjunto de materiales utilizados para la construcción de bases en pavimentos flexibles dentro del distrito de Sicuani, específicamente aquellos que comparten propiedades estructurales similares al material granular tradicional y al material celular ligero propuesto. Esta población incluye todos los posibles materiales que podrían ser evaluados o utilizados en condiciones análogas, considerando sus características mecánicas y estructurales, lo que permite generalizar los resultados obtenidos en los experimentos a materiales con propiedades comparables en la región y contextos similares.

3.1.6.2. Cuantificación de la población

La población comprende todos los materiales que cumplen las características de material granular tradicional y material celular ligero utilizados o utilizables en bases de pavimentos flexibles en el distrito de Sicuani. En este caso específico, dado que el estudio se enfoca en la “Vía Longitudinal Nacional PE-3S Tramo Sicuani-Senca Chectuyoc” y solo se trabajó con dos tipos de materiales (granular y celular ligero), las unidades analizadas de la población fueron representadas por estas dos categorías de materiales seleccionadas para la “Vía Longitudinal Nacional PE-3S Tramo Sicuani-Senca Chectuyoc”.

3.1.7. Muestra

3.1.7.1. Descripción de la muestra

Según Sampieri et al. (2018), la muestra es un subconjunto representativo de la población que se selecciona para llevar a cabo el estudio. Este subconjunto debe reflejar las características esenciales de la población para que los resultados obtenidos puedan ser generalizados. La muestra se utiliza cuando no es factible estudiar a toda la población debido a limitaciones de tiempo, recursos o accesibilidad, y su tamaño y selección garantizan la validez y confiabilidad de los resultados del estudio.

En esta investigación, la muestra corresponde a los especímenes seleccionados de material de subrasante, material granular tradicional y material celular ligero que son sometidos a ensayos en laboratorio. La cantidad de ensayos realizados sobre estos especímenes constituye el tamaño de la muestra, y su selección estuvo orientada a garantizar resultados representativos, confiables y comparables entre ambos materiales.

3.1.7.2. Cuantificación de la muestra

La cuantificación de la muestra corresponde a la cantidad de ensayos experimentales realizados sobre los especímenes de los materiales involucrados (material de subrasante, material granular tradicional para base y material celular ligero para base). Cada ensayo representa una unidad de análisis, y el número total de estos define el tamaño total de la muestra. Se consideró un total de 255 unidades muestrales, las cuales se encuentran distribuidas de la siguiente forma:

Material de Subrasante

La muestra para la subrasante está conformada por 165 unidades muestrales, las cuales corresponden a las 11 calicatas realizadas en la vía, para cada calicata corresponde el estudio de granulometría, plasticidad, proctor modificado y CBR (caracterización de materiales).

Donde se utiliza las siguientes nomenclaturas para mayor facilidad de interpretación:

- SR-01: Subrasante de la calicata 01
- SR-02: Subrasante de la calicata 02
- SR-03: Subrasante de la calicata 03
- SR-04: Subrasante de la calicata 04
- SR-05: Subrasante de la calicata 05
- SR-06: Subrasante de la calicata 06
- SR-07: Subrasante de la calicata 07
- SR-08: Subrasante de la calicata 08
- SR-09: Subrasante de la calicata 09
- SR-10: Subrasante de la calicata 10
- SR-11: Subrasante de la calicata 11

Tabla 6.

Unidades muestrales de suelos a nivel de subrasante

Muestras	Ensayos de suelos a nivel de subrasante				
	Granulometría	Límite Líquido	Límite Plástico	Proctor Modificado	CBR
SR-01	1	3	4	4	3
SR-02	1	3	4	4	3

Muestras	Ensayos de suelos a nivel de subrasante				
	Granulometría	Límite Líquido	Límite Plástico	Proctor Modificado	CBR
SR-03	1	3	4	4	3
SR-04	1	3	4	4	3
SR-05	1	3	4	4	3
SR-06	1	3	4	4	3
SR-07	1	3	4	4	3
SR-08	1	3	4	4	3
SR-09	1	3	4	4	3
SR-10	1	3	4	4	3
SR-11	1	3	4	4	3
Total			165		

Nota: Elaboración de propia autoría

Material Granular de Base

La muestra para la base está conformada por 45 unidades muestrales, las cuales corresponden a las 03 muestras obtenidas del talud de la cantera Chihuaco, para cada muestra corresponde el estudio de granulometría, plasticidad, proctor modificado y CBR.

Donde se utiliza las siguientes nomenclaturas para mayor facilidad de interpretación:

- T-01: Muestra 01 de material granular para base del talud 01
- T-02: Muestra 02 de material granular para base del talud 01
- T-03: Muestra 03 de material granular para base del talud 01

Tabla 7.

Unidades muestrales de material granular para base

Muestras	Ensayos de material granular para base				
	Granulometría	Límite Líquido	Límite Plástico	Proctor Modificado	CBR
T-01	1	3	4	4	3
T-02	1	3	4	4	3
T-03	1	3	4	4	3
Total			45		

Nota: Elaboración de propia autoría

Material celular ligero para base

La muestra para la base está conformada por 45 unidades muestrales, las cuales corresponden a las 5 densidades propuestas para el material celular ligero, para este material celular ligero corresponde un ensayo de densidad, resistencia a la compresión y deformación, realizando 3 pruebas por cada ensayo para determinar el promedio aritmético y evitar dispersión de datos.

Donde se utiliza las siguientes nomenclaturas para mayor facilidad de interpretación:

- CC-01: Material celular ligero para una densidad de 400kg/m³

- CC-02: Material celular ligero para una densidad de 500kg/m³
- CC-03: Material celular ligero para una densidad de 600kg/m³
- CC-04: Material celular ligero para una densidad de 700kg/m³
- CC-05: Material celular ligero para una densidad de 800kg/m³
- P-01: Prueba 01 de material celular ligero.
- P-02: Prueba 02 de material celular ligero.
- P-03: Prueba 03 de material celular ligero.

Tabla 8.

Unidades muestrales de MCL a nivel de base

Muestras	Densidad teórica de espécimen (kg/m ³)	Ensayos de MCL a nivel de base								
		Densidad experimental			Resistencia a la compresión			Deformación		
		P-01	P-02	P-03	P-01	P-02	P-03	P-01	P-02	P-03
CC - 01	400	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CC - 02	500	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CC - 03	600	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CC - 04	700	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CC - 05	800	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Subtotal			15			15			15
	Total						45			

Nota: Elaboración de propia autoría

3.1.7.3. Método de muestreo

Según Sampieri et al. (2018), los métodos de muestreo son las estrategias utilizadas para seleccionar un subconjunto de elementos (muestra) de una población, con el objetivo de analizarla y generalizar los resultados obtenidos. Estos métodos se dividen en dos grandes categorías: muestreo probabilístico y muestreo no probabilístico. En el muestreo probabilístico, todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser seleccionados, e incluye técnicas como el aleatorio simple, sistemático, estratificado y por conglomerados. Por otro lado, el muestreo no probabilístico no otorga las mismas probabilidades de selección a todos los elementos y se basa en criterios de accesibilidad o relevancia; este incluye métodos como el de conveniencia, intencional o dirigido, por cuotas y bola de nieve. La elección del método depende del tipo de investigación, las características de la población y los recursos disponibles.

El método de muestreo que corresponde a esta investigación es el muestreo no probabilístico intencional o dirigido, ya que se hizo la elaboración de calicatas para el estudio de la subrasante, elección de material de cantera para base y subbase, y una propuesta de densidades para el material celular ligero; estas fueron seleccionadas siguiendo criterios

técnicos específicos que aseguraron su relación con el análisis experimental. Se hizo uso de este método porque las muestras no se eligieron al azar, sino en base a características previamente definidas que representaron adecuadamente las condiciones reales de la “Vía Longitudinal Nacional PE-3S Tramo Sicuani-Sencca Chectuyoc”. Además, los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio, fueron promediados buscando así reflejar las propiedades más significativas de cada material de acuerdo a las condiciones de la investigación.

3.1.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.1.8.1. Técnica de recolección de datos

Según Sampieri et al. (2018), las técnicas de recolección de datos son procedimientos utilizados para obtener información relevante sobre las variables o fenómenos de estudio, permitiendo recopilar los datos necesarios para responder a las preguntas de investigación o contrastar hipótesis. Estas técnicas incluyen la observación, que registra fenómenos tal como ocurren en su contexto natural; las entrevistas, que recopilan información mediante preguntas directas a los participantes; las encuestas y cuestionarios, que estructuran preguntas para obtener datos cuantitativos; el análisis documental, que revisa documentos o registros relacionados con el tema de estudio; y las pruebas y mediciones, que aplican instrumentos para medir variables de manera directa, como ensayos en laboratorio o pruebas técnicas. La elección de la técnica depende de los objetivos de la investigación y las características del fenómeno analizado.

En esta investigación se hizo uso las técnicas de pruebas y mediciones, y observación directa para la recolección de datos. Las pruebas y mediciones corresponden a la realización de ensayos experimentales en laboratorio para la evaluación de las propiedades físico mecánicas del material granular tradicional, del material celular ligero y de los materiales de base y subbase provenientes de canteras, obteniendo así resultados cuantitativos como resistencia a la compresión, CBR, resistencia a la flexión, índice de plasticidad, entre otros. Complementariamente, se empleó la observación directa para registrar de manera sistemática el comportamiento de los materiales durante los ensayos, como deformaciones, fallos visibles y demás, garantizando los resultados obtenidos mediante las mediciones.

3.1.8.2. Instrumento de recolección de datos

Según Sampieri et al. (2018), los instrumentos de recolección de datos son herramientas diseñadas para recopilar información de manera precisa, válida y confiable, permitiendo medir las variables de estudio según los objetivos planteados. Entre los principales instrumentos se

encuentran los cuestionarios, que recopilan datos mediante preguntas estructuradas; las fichas de recolección de datos, utilizadas para registrar resultados de mediciones, observaciones y otros datos relevantes de manera estructurada y sistemática; y los equipos de medición, como balanzas, probetas, sensores o máquinas especializadas, que obtienen datos numéricos sobre propiedades físicas, químicas o mecánicas. La selección del instrumento depende de las técnicas aplicadas y del tipo de variables a estudiar.

En esta investigación se emplearon como instrumentos de recolección de datos las fichas de recolección de datos y los equipos de medición. Las fichas de recolección de datos se utilizaron para registrar de manera estructurada los resultados de los ensayos realizados en laboratorio, incluyendo valores de resistencia, CBR, entre otros, de los materiales; así como observaciones cualitativas, como deformación y fallas en los especímenes. Los equipos de medición, como balanzas, probetas, compactadores y prensas, fueron empleados para obtener datos sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, asegurando así la confiabilidad de los resultados obtenidos.

3.2. Procedimiento de recolección de datos

3.2.1. Determinación de la zona de estudio

La zona de estudio seleccionada dentro del distrito de Sicuani corresponde al Centro Poblado de Sencca Chectuyoc, el cual se caracteriza por presentar vías con baja capacidad portante, producto de la deficiente calidad del material subyacente y de condiciones constructivas limitadas propias del ámbito rural. Dichas vías muestran patologías evidentes a simple vista, tales como fisuras longitudinales y transversales, ahuellamiento, fracturas de borde, pérdida de material y hundimientos locales, indicadores de un deterioro progresivo asociado tanto a las condiciones del suelo como a la acción del tránsito y del clima.

Asimismo, este centro poblado se conecta directamente con la Vía Longitudinal de la Sierra Sur PE-3S - Tramo Sicuani - Sencca Chectuyoc, lo que incrementa la importancia funcional de la zona, al constituir un corredor que integra actividades económicas y de movilidad cotidiana entre el área urbana de Sicuani y sus centros poblados aledaños.

3.2.1.1. Ubicación de la zona de estudio

3.2.1.1.1. Ubicación geográfica

Geográficamente, se ubica en las coordenadas UTM, datum WGS84 zona 19 SUR:

Norte	:	Entre 8414933.72 a 8418390.20
Este	:	Entre 263502.54 a 260878.01
Altitud Máxima	:	3660.48 m.s.n.m.
Altitud Mínima	:	3615.28 m.s.n.m.

3.2.1.1.2. Ubicación geopolítica

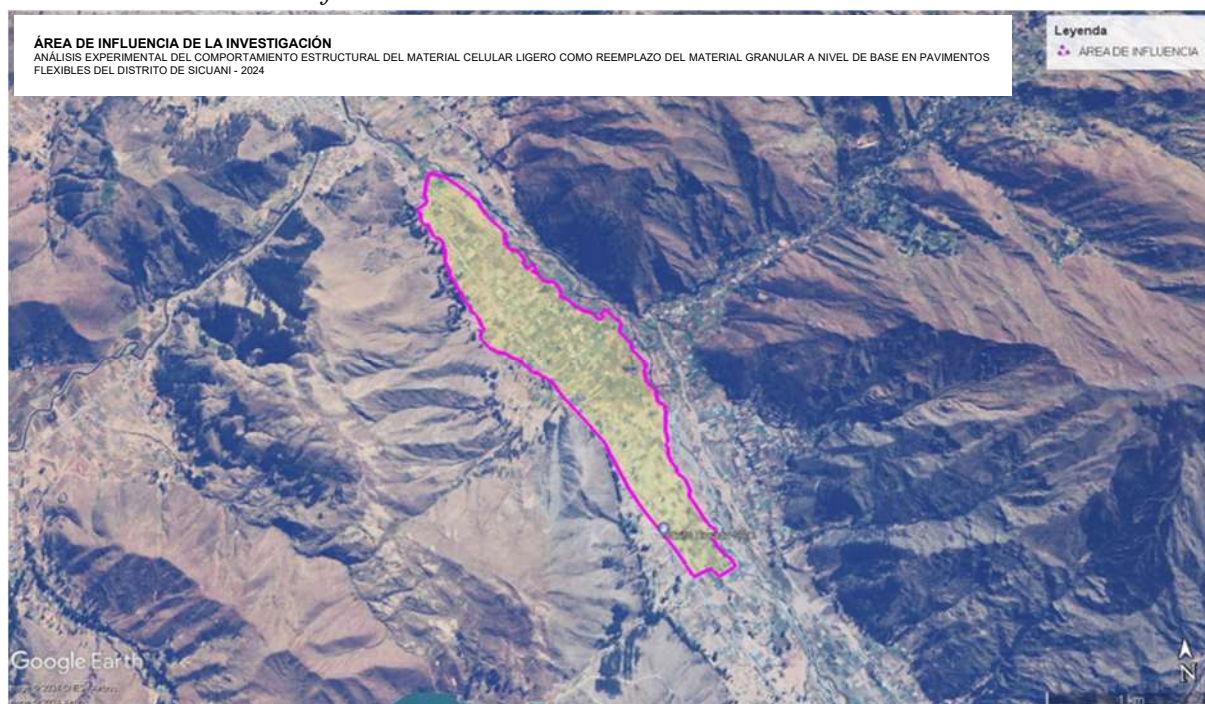
Región	:	Cusco - código de ubigeo (08)
Provincia	:	Canchis - código de ubigeo (0806)
Distrito	:	Sicuani - código de ubigeo (080601)
Sector	:	Comunidad Campesina Sencca Chectuyoc

3.2.1.1.3. Límites

Norte	:	Con del distrito de Sicuani
Este	:	Con la comunidad de Chauchapata
Sur	:	Con la comunidad de Chectuyoc Pucachupa
Oeste	:	Con la comunidad de Hercca

Figura 16.

Ubicación del área de influencia de la zona de estudio



Nota: Adaptado de Google Earth Pro

3.2.1.2. Vías de acceso

El acceso principal al Centro Poblado de Sencca Chectuyoc se realiza a través de la Vía Longitudinal de la Sierra Sur PE-3S – Tramo Sicuani – Sencca Chectuyoc, la cual conecta de manera directa al centro poblado con la ciudad de Sicuani y, a su vez, con la red vial nacional.

El primer tramo del recorrido corresponde a la ruta Cusco – Saylla – Oropesa – Lucre – Urcos – Quiquijana – Cusipata – Combapata – San Pedro – San Pablo – Sicuani, con una distancia aproximada de 140 km. El tiempo estimado de viaje en camioneta es de 3 horas y 07 minutos, circulando a una velocidad promedio de 60 km/h.

El segundo tramo comprende el recorrido desde Sicuani hasta el Grifo Dorado S.A.C., con una distancia aproximada de 6.90 km y un tiempo de viaje de 13 minutos, manteniendo una velocidad promedio de 60 km/h.

Finalmente, el tercer tramo corresponde al trayecto entre el Grifo Dorado S.A.C. y la Comunidad Campesina de Sencca Chectuyoc, con una longitud aproximada de 1.20 km y un tiempo de desplazamiento de 4 minutos en vehículo ligero.

Tabla 9.

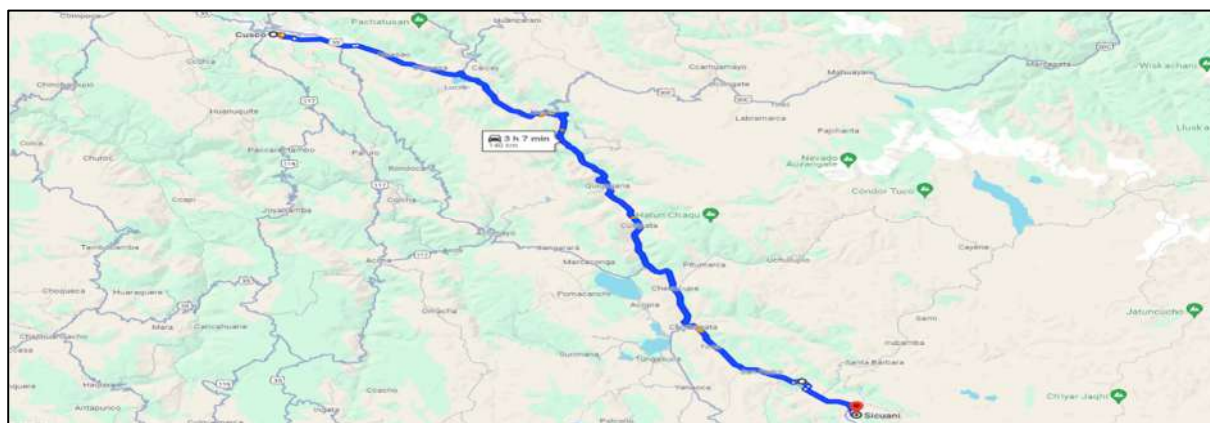
Vías de acceso a la zona de estudio

Vía	Tramo	Vías de acceso		Vehículo	Tiempo de recorrido (min)
		Tipo de carretera	Distancia (km)		
1	Cusco - Sicuani	Asfaltado	140	Auto	3 horas con 07 minutos
2	Sicuani - Grifo Dorado SAC	Asfaltado	6.9	Auto	13 minutos
2	Grifo Dorado SAC - CC Sencca Chectuyoc	Afirmado	1.2	Auto	4 minutos

Nota: Elaboración de propia autoría

Figura 17.

Vías de acceso de la ciudad del Cusco al distrito de Sicuani



Nota: Adaptado de Google Maps

Figura 18.

Vías de acceso de distrito de Sicuani Al Grifo Dorado SAC



Nota: Adaptado de Google Maps

Figura 19.

Vías de acceso del grifo Dorado SAC a la zona de estudio



Nota: Adaptado de Google Maps

3.2.1.3. Altitud

La zona de estudio se encuentra ubicada a una altitud promedio de 3,637.88 m s. n. m., condición característica del valle interandino de la provincia de Canchis y determinante para el comportamiento climático y geotécnico del área evaluada.

3.2.1.4. Extensión

La zona de estudio ubicada en la Comunidad Campesina de Sencca Chectuyoc corresponde al tramo de la Vía Longitudinal de la Sierra Sur PE-3S – Tramo Sicuani – Sencca Chectuyoc, el cual presenta una extensión total de 2,850.45 m.

3.2.2. Determinación del nivel de peligro de la zona

Con la finalidad de comprender mejor las condiciones físicas del área donde se ubica la vía en estudio, se realizó la determinación del nivel de peligro de la zona correspondiente a la Comunidad Campesina de Sencca Chectuyoc. Este análisis no constituye el objeto principal de la investigación, pero sí representa un sustento técnico complementario, debido a que las condiciones geomorfológicas, geológicas y topográficas del terreno guardan relación con la estabilidad del suelo, el comportamiento de la subrasante y, en consecuencia, con el desempeño estructural del pavimento flexible.

Durante el reconocimiento del área de influencia se advirtió que la vía se desarrolla en un entorno con proximidad al río Vilcanota, presencia de materiales de origen fluvial y sectores con condiciones geomorfológicas que pueden influir en la estabilidad del terreno. Por ello, se consideró pertinente evaluar el nivel de peligro de la zona a partir del análisis de tres componentes principales:

- Aspectos geomorfológicos,
- Aspectos geológicos, y

- Pendientes características del terreno.

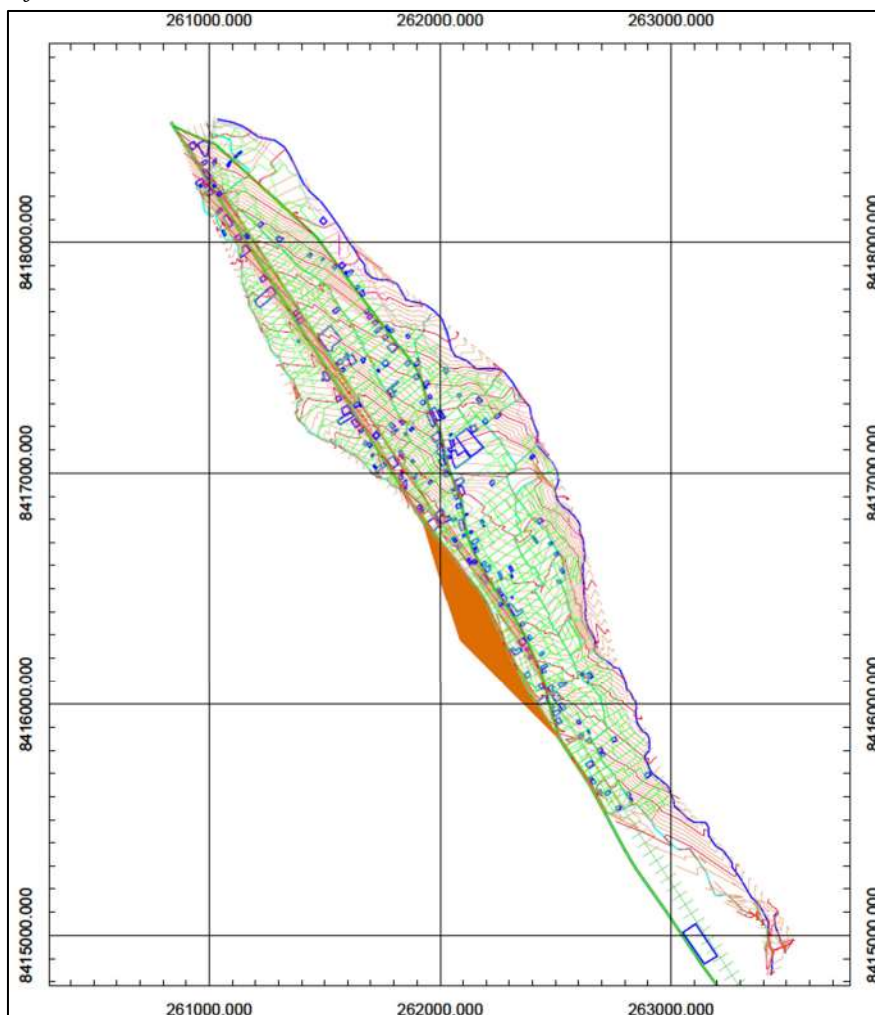
La integración de estos factores permitió obtener una lectura más clara del medio físico sobre el cual se emplaza la infraestructura vial y sustentar técnicamente la necesidad de analizar alternativas que mejoren su respuesta estructural.

3.2.2.1. Levantamiento topográfico

Como parte de la caracterización del área de estudio, se realizó el levantamiento topográfico correspondiente, con el propósito de conocer la configuración superficial del terreno y disponer de una base para el análisis físico de la zona. Este trabajo permitió identificar diferencias altimétricas, variaciones del relieve y la relación espacial entre la vía, el cauce del río y las unidades del terreno presentes en el entorno inmediato. La información obtenida sirvió de base para interpretar las pendientes, la geomorfología y la distribución de los materiales que conforman el área de estudio. Los resultados del levantamiento topográfico se muestran en la siguiente figura:

Figura 20.

Mapa topográfico de la zona de estudio



Nota: Elaboración propia

3.2.2.2. Características físicas de la zona de estudio

Durante la evaluación del área de estudio se identificó que las condiciones físicas del terreno tienen influencia directa en la estabilidad del medio y en la respuesta del suelo donde se apoya la infraestructura vial, se desarrolló el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ). En ese sentido, para determinar el nivel de peligro de la zona se analizaron tres aspectos principales: la geomorfología, la pendiente y la geología, debido a que estos factores permiten comprender mejor la susceptibilidad del terreno frente a procesos de erosión, saturación, inestabilidad y deformación.

3.2.2.2.1. Aspectos geomorfológicos

Durante la inspección del área de estudio se identificó que el entorno inmediato de la vía presenta formas de relieve asociadas al cauce del río, terrazas de acumulación y laderas de montaña, las cuales influyen directamente en la estabilidad del terreno. A partir del análisis cartográfico y del reconocimiento en campo, se determinaron cinco unidades geomorfológicas predominantes dentro del área evaluada: cauce de río, terraza aluvial, vertiente coluvio-deluvial, montaña en roca volcano-sedimentaria y montaña en roca sedimentaria. Estas unidades fueron consideradas en el análisis debido a que condicionan procesos como erosión, escorrentía, deposición de sedimentos y estabilidad superficial, los cuales pueden afectar la infraestructura vial. Las unidades geomorfológicas identificadas se presentan en la Tabla 10 y su representación cartográfica se muestra en la Figura 21.

Tabla 10.

Unidades Geomorfológicas

	Parámetro	Unidades Geomorfológicas
Descriptores	GEOM1	Cauce de río
	GEOM ²	Terraza aluvial
	GEOM3	Vertiente coluvio-deluvial
	GEOM4	Montaña en roca volcano sedimentaria
	GEOM5	Montaña en roca sedimentaria

Nota: Elaboración propia

A continuación, se presenta la descripción de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio:

Cauce de río

Corresponde al sector por donde discurre el flujo del río, caracterizado por procesos continuos de erosión, transporte y deposición de sedimentos. Se considera una zona altamente dinámica y con susceptibilidad elevada a eventos hidromorfológicos.

Terraza aluvial

Constituida por pequeñas plataformas sedimentarias formadas por acumulaciones fluviales que se depositan lateralmente al cauce del río. Representan antiguos niveles de inundación y zonas de relativa estabilidad, aunque susceptibles a socavación lateral en periodos de crecida.

Vertiente coluvio deluvial

Unidad compuesta por depósitos intercalados de origen coluvial y deluvial, producto de procesos gravitacionales (coluviales) combinados con transporte por escorrentía superficial (deluvial). Suelen presentar suelos heterogéneos, con variabilidad granulométrica y potencial moderado de inestabilidad superficial.

Montaña en roca volcano-sedimentaria

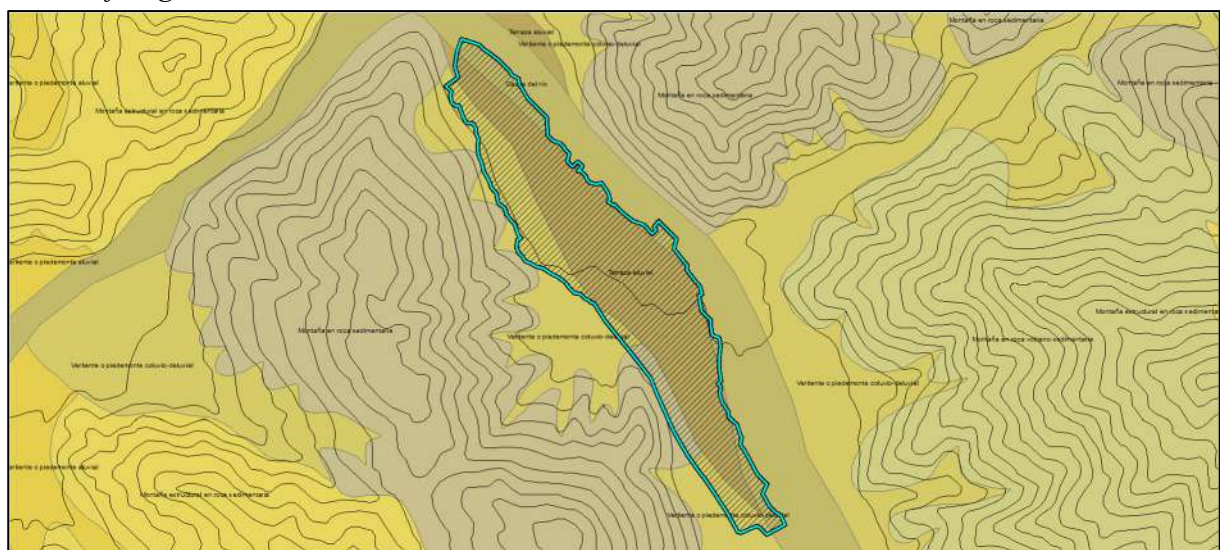
Laderas montañosas desarrolladas sobre rocas volcano-sedimentarias, afectadas por procesos denudativos dominados por erosión fluvial y meteorización. Estas unidades presentan pendientes pronunciadas y discontinuidades estructurales que pueden influir en la estabilidad.

Montaña en roca sedimentaria

Corresponde a elevaciones que forman parte de las cordilleras asociadas a actividad tectónica. Su morfología actual es resultado de procesos degradacionales exógenos: lluvia, escorrentía, infiltración de aguas subterráneas y acción gravitacional. Estas unidades suelen presentar suelos delgados y laderas susceptibles a procesos erosivos y deslizamientos superficiales.

Figura 21.

Geomorfología de la zona de estudio



Nota: Elaboración propia

3.2.2.2. Pendiente

Durante la evaluación topográfica y el reconocimiento del área se verificó que la pendiente constituye un factor importante en el comportamiento físico del terreno, ya que influye en la escorrentía superficial, en la erosión, en la estabilidad de laderas y en la susceptibilidad a saturación. En la zona de estudio se identificaron sectores con diferentes rangos de pendiente, lo cual permitió reconocer áreas con distinta predisposición frente a procesos de inestabilidad. La clasificación de pendientes fue considerada dentro del análisis del nivel de peligro por su relación directa con la estabilidad del terreno y con las condiciones de soporte de la infraestructura vial.

Tabla 11.

Clasificación de pendientes

	Parámetro	Pendiente
Descriptores	PEN1	0% a 2%
	PEN2	2% a 4%
	PEN3	4% a 6%
	PEN4	6% a 8%
	PEN5	>8%

Nota: Elaboración propia

El relieve de la zona de estudio presenta una topografía heterogénea, con variaciones que van desde sectores prácticamente planos en la parte baja, próximos al cauce del río Vilcanota, hasta laderas de montaña con pendientes más pronunciadas. En la zona predominan las pendientes moderadas a fuertes, mientras que las pendientes suaves se concentran principalmente en las áreas de mayor influencia del cauce.

A continuación, se detalla la correspondencia de los rangos de pendiente identificados en el área de estudio.

Pendiente 0 a 2% ($\approx 0^\circ$ a 1.15°)

Corresponde a superficies casi planas, localizadas principalmente en las zonas próximas al cauce del río Vilcanota. Este sector constituye la franja más estable en términos topográficos.

Pendiente 2 a 4% ($\approx 1.15^\circ$ a 2.29°)

Áreas ligeramente inclinadas, también ubicadas cerca del cauce. Presentan baja susceptibilidad a procesos erosivos, aunque pueden verse afectadas en periodos de crecidas.

Pendiente 4 a 6% ($\approx 2.29^\circ$ a 3.43°)

Pendientes moderadas, que representan zonas de transición hacia laderas más pronunciadas. Tienen una mayor incidencia de escorrentía superficial.

Pendientes entre 6 a 8% ($\approx 3.43^\circ$ a 4.57°)

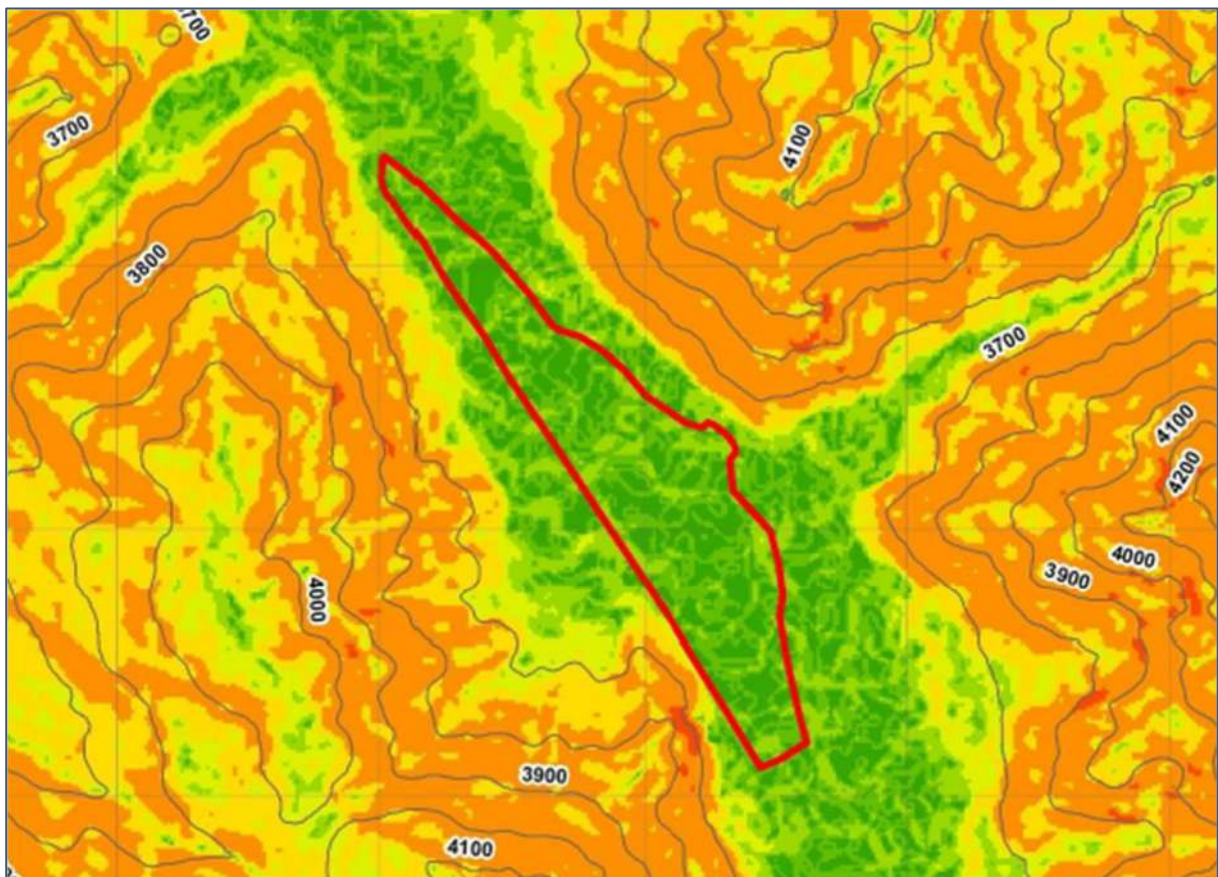
Superficies moderadas a fuertes, alejadas progresivamente del cauce. Suelen presentar mayor susceptibilidad a erosión y procesos de inestabilidad superficial.

Pendientes entre $>8\%$ ($\approx > 4.57^\circ$)

Corresponden a laderas fuertes a muy fuertes, típicas del sistema de montaña presente en Sencca Chectuyoc. Estas áreas pueden alcanzar ángulos de 10° a 15° o superiores, dependiendo de la morfología local, presentando mayor riesgo de erosión, movimientos superficiales y afectación estructural de las vías.

Figura 22.

Pendiente de la zona de estudio



Nota: Elaboración propia

3.2.2.2.3. Aspectos geológicos

A partir de la revisión cartográfica y de la observación del terreno, se identificaron las principales unidades litológicas presentes en el área de estudio, las cuales influyen en la respuesta geotécnica del suelo y en la estabilidad del medio físico. La naturaleza de los materiales presentes condiciona aspectos como resistencia, permeabilidad, susceptibilidad a saturación y comportamiento frente a sollicitaciones mecánicas. Por ello, el análisis geológico fue incorporado como parte de la evaluación del nivel de peligro, permitiendo reconocer

sectores con distinta capacidad de respuesta del terreno frente a procesos de inestabilidad y frente al funcionamiento estructural de la vía.

Tabla 12.

Unidades Litológicas

	Parámetro	Unidades Litológicas
	LITO 1	Suelo fluvial
	LITO 2	Depósito fluvial
Descriptores	LITO 3	Depósito fluvial-aluvial
	LITO 4	Depósito de lacustres
	LITO 5	Areniscas

Nota: Elaboración propia

A continuación, se describen las unidades litológicas presentes en el área de estudio:

Suelo fluvial

Corresponde a depósitos recientes asociados al cauce del río, conformados principalmente por cantos rodados redondeados y material grueso transportado por arrastre hidráulico. Presentan alta permeabilidad y moderada susceptibilidad a procesos de erosión fluvial.

Depósito fluvial

Se compone de bancos y acumulaciones de material fluvial transportado desde zonas altas hacia sectores más bajos del valle. Incluye bloques y gravas redondeadas de diferentes tamaños producto del transporte prolongado dentro del sistema fluvial.

Suelo fluvio-aluvial

Unidad conformada por fragmentos heterométricos redondeados de origen metamórfico, inmersos en una matriz areno-limosa. Su disposición es caótica y representa la unidad de mayor extensión en el área de estudio. Su variabilidad granulométrica y matriz fina le confieren comportamientos geotécnicos intermedios con susceptibilidad a saturación superficial.

Depósito Lacustre

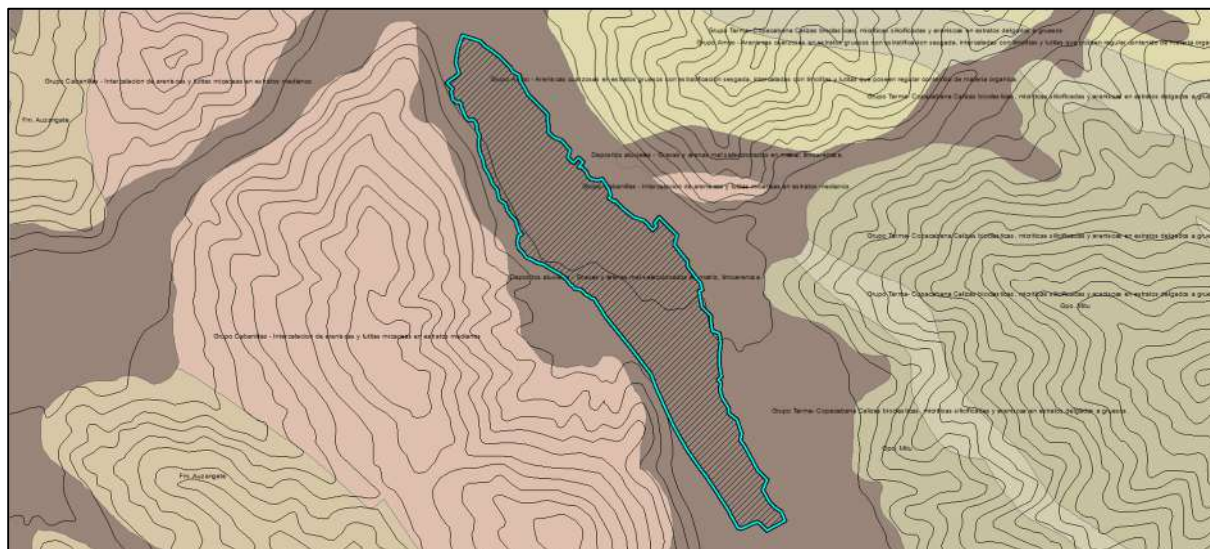
Formación compuesta por sedimentos finos con abundante material orgánico, producto de procesos de sedimentación en ambientes de baja energía. Presentan baja resistencia al corte y son susceptibles a deformaciones volumétricas, especialmente cuando se altera su humedad.

Areniscas

Afloramientos de rocas areniscas, pertenecientes a las formaciones geológicas de la zona. Presentan una resistencia mayor en comparación con los depósitos no consolidados, aunque pueden desarrollar planos de debilidad a través de fracturas o estratificación.

Figura 23.

Litología de la zona de estudio



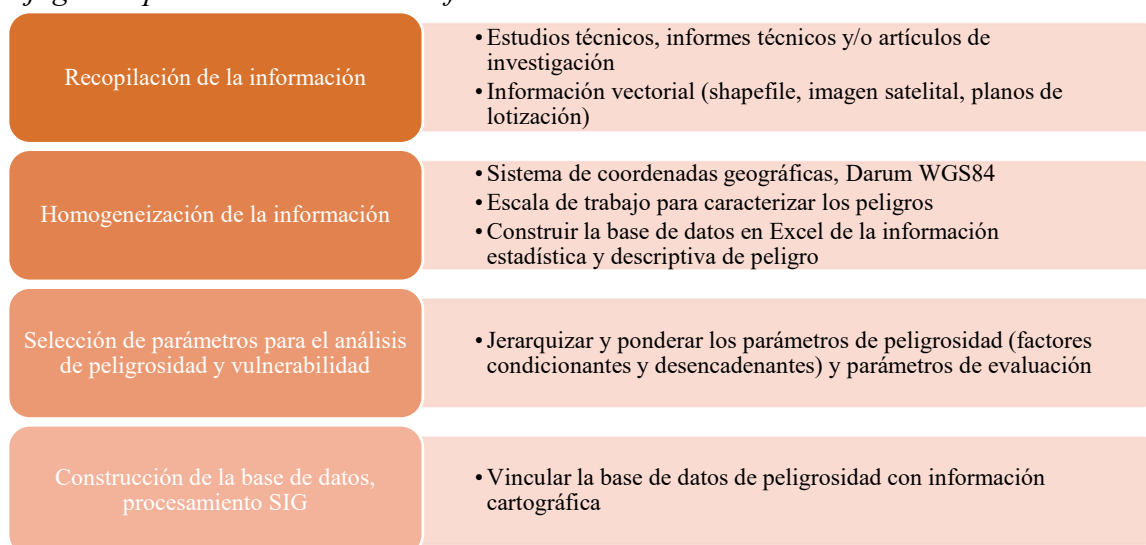
Nota: Elaboración propia

3.2.2.3. Análisis y sistematización de la información

Una vez identificadas las condiciones físicas del área de estudio, se procedió al análisis y sistematización de la información recopilada, con la finalidad de organizar los datos obtenidos y establecer una valoración del nivel de peligro de la zona. Para ello, se siguió el procedimiento mostrado en la Figura 24, tomando como base el Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres de la Provincia de Canchis al 2023, los estudios de peligrosidad elaborados por la Municipalidad Provincial de Canchis y la metodología propuesta por el CENEPRED (2015). Este proceso permitió ordenar, jerarquizar e integrar la información territorial de manera consistente.

Figura 24.

Flujograma para el análisis de la información



Nota: Adaptado del CENEPRED (2015)

La sistematización se realizó con el propósito de interpretar cómo las condiciones geomorfológicas, geológicas y topográficas de Sencca Chectuyoc influyen en la estabilidad del terreno y en el comportamiento del suelo que sirve de soporte a la infraestructura vial. En ese sentido, esta parte del estudio no se incorpora como variable principal de la investigación, sino como un sustento técnico complementario que ayuda a comprender el contexto físico donde se evalúa el reemplazo del material granular convencional por material celular ligero en la capa de base del pavimento flexible.

De acuerdo con los estudios revisados y con las observaciones efectuadas en la zona, las vías próximas a la Comunidad Campesina de Sencca Chectuyoc presentan condiciones de riesgo asociadas, entre otros factores, a la baja capacidad portante del suelo. Esta situación guarda relación con el deterioro progresivo de la estructura del pavimento y refuerza la necesidad de evaluar alternativas de mejora estructural. Por ello, la información recopilada fue procesada mediante criterios de ponderación aplicados a los factores físicos identificados, con el fin de determinar el nivel de peligro de la zona y vincular dicho análisis con las condiciones geotécnicas del tramo en estudio.

3.2.2.3.1. Ponderación de las unidades geomorfológicas

Para establecer la importancia relativa de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio, se aplicó un procedimiento de ponderación mediante comparación por pares. Este análisis permitió jerarquizar cada unidad en función de su influencia sobre la estabilidad del terreno y sobre la susceptibilidad del área frente a procesos físicos de inestabilidad.

Tabla 13.

Descriptores de las unidades geomorfológicas

	Parámetro	Unidades Geomorfológicas
	GEOM1	Cauce de río
	GEOM ²	Terraza aluvial
Descriptores	GEOM3	Vertiente coluvio-deluvial
	GEOM4	Montaña en roca volcánico sedimentaria
	GEOM5	Montaña en roca sedimentaria

Nota: Elaboración propia

Posteriormente, se elaboró la matriz de comparación por pares, con el fin de identificar cuáles unidades geomorfológicas representan un mayor nivel de peligro respecto a las demás, considerando como criterio principal la capacidad portante del suelo.

Tabla 14.*Matriz de comparación de pares para las unidades geomorfológicas*

Parámetro	GEOM1	GEOM ²	GEOM3	GEOM4	GEOM5
GEOM1	1.00	2.00	5.00	7.00	9.00
GEOM ²	0.50	1.00	2.00	5.00	7.00
GEOM3	0.20	0.50	1.00	3.00	5.00
GEOM4	0.14	0.20	0.33	1.00	3.00
GEOM5	0.11	0.14	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.95	3.84	8.53	16.33	25.00

Nota: Elaboración propia

A partir de esta matriz, se construyó la matriz de normalización, la cual permitió obtener los pesos y la jerarquía asociada a cada unidad geomorfológica.

Tabla 15.*Matriz de normalización de las unidades geomorfológicas*

Parámetro	GEOM1	GEOM ²	GEOM3	GEOM4	GEOM5	PC
GEOM1	0.51	0.52	0.59	0.43	0.36	0.481
GEOM ²	0.26	0.26	0.23	0.31	0.28	0.267
GEOM3	0.10	0.13	0.12	0.18	0.20	0.147
GEOM4	0.07	0.05	0.04	0.06	0.12	0.069
GEOM5	0.06	0.04	0.02	0.02	0.04	0.036

Nota: Elaboración propia

Con base en las matrices de comparación y normalización, se determinó el Índice de Consistencia (IC) y la Relación de Consistencia (RC), utilizando un Índice Aleatorio (IA) de 1.115, correspondiente al número de elementos evaluados ($n = 5$ unidades geomorfológicas).

Los resultados se evaluaron según el siguiente criterio:

- $RC \leq 0.10 \Rightarrow$ Consistencia razonable
- $RC > 0.10 \Rightarrow$ Inconsistencia

Para el caso de las unidades geomorfológicas, se obtuvo un $RC = 0.035 \leq 0.10$, por consiguiente, el análisis realizado presenta consistencia razonable.

Tabla 16.*Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de las unidades geomorfológicas*

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

*Nota: Adaptado del CENEPRED (2015)***Tabla 17.***Índice y relación de consistencia de las unidades geomorfológicas*

IC	0.039
RC	0.035

Nota: Elaboración propia

3.2.2.3.2. Ponderación de la pendiente

La pendiente fue ponderada como un factor condicionante del nivel de peligro, debido a que influye en la escorrentía, en la erosión y en la estabilidad general del terreno. Para ello, se realizó una comparación por pares entre los diferentes rangos de pendiente identificados en el área, asignándoles valores según su incidencia relativa en la susceptibilidad física de la zona.

Tabla 18.

Descriptores de la pendiente

	Parámetro	Pendiente
Descriptores	PEN1	0% a 2%
	PEN2	2% a 4%
	PEN3	4% a 6%
	PEN4	6% a 8%
	PEN5	>8%

Nota: Elaboración propia

Posteriormente, se construyó la matriz de comparación de pares, identificando los rangos de pendiente con mayor peligro relativo, tomando como referencia su influencia directa en la capacidad portante y en la estabilidad superficial del terreno.

Tabla 19.

Matriz de comparación de pares para la pendiente

Parámetro	PEN1	PEN2	PEN3	PEN4	PEN5
PEN1	1.00	3.00	5.00	7.00	8.00
PEN2	0.33	1.00	3.00	4.00	6.00
PEN3	0.20	0.33	1.00	3.00	5.00
PEN4	0.14	0.25	0.33	1.00	3.00
PEN5	0.13	0.17	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.80	4.75	9.53	15.33	23.00

Nota: Elaboración propia

A partir de esta matriz se generó la matriz de normalización, de donde se obtuvieron los pesos y jerarquías para cada rango de pendiente.

Tabla 20.

Matriz de normalización de la pendiente

Parámetro	PEN1	PEN2	PEN3	PEN4	PEN5	PC
PEN1	0.56	0.63	0.52	0.46	0.35	0.503
PEN2	0.19	0.21	0.31	0.26	0.26	0.246
PEN3	0.11	0.07	0.10	0.20	0.22	0.140
PEN4	0.08	0.05	0.03	0.07	0.13	0.073
PEN5	0.07	0.04	0.02	0.02	0.04	0.038

Nota: Elaboración propia

El cálculo del IC y RC se realizó con un Índice Aleatorio (IA) de 1.115, correspondiente a n = 5 rangos de pendiente.

Aplicando el mismo criterio de evaluación se obtuvo un $RC = 0.060 \leq 0.10$, por lo tanto, el análisis presenta consistencia razonable, y los pesos obtenidos son válidos para la ponderación del nivel de peligro.

Tabla 21.

Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de la pendiente

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Nota: Adaptado del CENEPRED (2015)

Tabla 22.

Índice y relación de consistencia de la pendiente

IC	0.067
RC	0.060

Nota: Elaboración propia

3.2.2.3.3. Ponderación de las unidades litológicas

Las unidades litológicas fueron ponderadas en función de sus características generales y de su posible influencia en la respuesta geotécnica del terreno. Para ello, se aplicó una comparación por pares que permitió jerarquizar las litologías presentes según su incidencia relativa en el nivel de peligro del área de estudio.

Tabla 23.

Descriptores de las unidades litológicas

	Parámetro	Unidades Litológicas
Descriptores	LITO 1	Suelo fluvial
	LITO 2	Depósito fluvial
	LITO 3	Depósito fluvial-aluvial
	LITO 4	Depósito de lacustres
	LITO 5	Areniscas

Nota: Elaboración propia

Se elaboró la matriz de comparación de pares, evaluando qué unidades litológicas representan un mayor nivel de peligro en función de su comportamiento geotécnico y su contribución a la baja capacidad portante del suelo.

Tabla 24.

Matriz de comparación de pares para las unidades litológicas

Parámetro	LITO 1	LITO 2	LITO 3	LITO 4	LITO 5
LITO 1	1.00	2.00	4.00	7.00	9.00
LITO 2	0.50	1.00	2.00	5.00	7.00
LITO 3	0.25	0.50	1.00	3.00	5.00
LITO 4	0.14	0.20	0.33	1.00	2.00
LITO 5	0.11	0.14	0.20	0.50	1.00
SUMA	2.00	3.84	7.53	16.50	24.00

Nota: Elaboración propia

Posteriormente, la matriz de normalización permitió obtener los pesos y jerarquías de cada unidad litológica.

Tabla 25.

Matriz de normalización de las unidades litológicas

Parámetro	LITO 1	LITO 2	LITO 3	LITO 4	LITO 5	PC
LITO 1	0.50	0.52	0.53	0.42	0.38	0.470
LITO 2	0.25	0.26	0.27	0.30	0.29	0.274
LITO 3	0.12	0.13	0.13	0.18	0.21	0.156
LITO 4	0.07	0.05	0.04	0.06	0.08	0.062
LITO 5	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.038

Nota: Elaboración propia

El cálculo del IC y RC se efectuó usando un Índice Aleatorio (IA) de 1.115, correspondiente a $n = 5$ unidades litológicas. Los resultados fueron evaluados de acuerdo con el mismo criterio y se obtuvo un $RC = 0.016 \leq 0.10$, en consecuencia, el análisis es consistente y razonable, garantizando que los pesos asignados son confiables.

Tabla 26.

Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de las unidades litológicas

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Nota: Adaptado del CENEPRED (2015)

Tabla 27.

Índice y relación de consistencia de las unidades litológicas

IC	0.018
RC	0.016

Nota: Elaboración propia

3.2.2.3.4. Valores ponderados

Una vez obtenidas las ponderaciones individuales de los factores geomorfológicos, de pendiente y litológicos, se integraron los valores resultantes con la finalidad de consolidar una base de evaluación del nivel de peligro. Esta integración permitió resumir la importancia relativa de cada uno de los factores físicos analizados dentro del conjunto del área de estudio.

Tabla 28.

Resumen de valores Ponderados

Unidades Geomorfológicas		Pendiente		Unidades Litológicas	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Peso
GEOM1	0.481	PEN1	0.503	LITO 1	0.470
GEOM ²	0.267	PEN2	0.246	LITO 2	0.274
GEOM3	0.147	PEN3	0.140	LITO 3	0.156
GEOM4	0.069	PEN4	0.073	LITO 4	0.062
GEOM5	0.036	PEN5	0.038	LITO 5	0.038

Nota: Elaboración propia

3.2.2.3.5. Ponderación de los aspectos físicos

Para determinar el nivel de peligro global, se realizó la combinación ponderada de los tres aspectos físicos mediante un nuevo proceso de Análisis Jerárquico (PAJ). En este caso, los descriptores fueron:

- Unidades geomorfológicas,
- Pendiente,
- Unidades litológicas.

Tabla 29.

Descriptores de los aspectos físicos

	Parámetro	Aspectos físicos
Descriptores	GEOM	Geomorfología
	PEN	Pendiente
	LITO	Litología

Nota: Elaboración propia

Se elaboró la matriz de comparación de pares, evaluando cuáles de estos aspectos posee mayor relevancia respecto a los demás, considerando su relación con la capacidad portante del suelo.

Tabla 30.

Matriz de comparación de pares para los aspectos físicos

Parámetro	GEOM	PEN	LITO
GEOM	1.00	3.00	5.00
PEN	0.33	1.00	3.00
LITO	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.53	4.33	9.00

Nota: Elaboración propia

Posteriormente, se construyó la matriz de normalización, obteniéndose los pesos y jerarquías correspondientes.

Tabla 31.

Matriz de normalización de los aspectos físicos

Parámetro	GEOM	PEN	LITO	PC
GEOM	0.65	0.69	0.56	0.633
PEN	0.22	0.23	0.33	0.260
LITO	0.13	0.08	0.11	0.106

Nota: Elaboración propia

El cálculo del IC y RC se realizó utilizando un Índice Aleatorio (IA) de 0.525, correspondiente a $n = 3$ aspectos físicos. Aplicando el mismo criterio se obtuvo un $RC = 0.037 \leq 0.10$, por lo tanto, el análisis es consistente y razonable.

Tabla 32.*Índice Aleatorio de la matriz de comparación de pares de los aspectos físicos*

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

*Nota: Adaptado del CENEPRED (2015)***Tabla 33.***Índice y relación de consistencia de los aspectos físicos*

IC	0.019
RC	0.037

Nota: Elaboración propia

Finalmente, se calcularon los valores combinados del nivel de peligro mediante la siguiente ecuación ponderada:

$$P = \text{GEOM}_x (\text{Peso}_x) + \text{PEN}_y (\text{Peso}_y) + \text{LITO}_z (\text{Peso}_z)$$

Donde:

- P = nivel de peligro
- GEOM, PEN, LITO = valores de cada aspecto físico
- Peso_x, Peso_y, Peso_z = pesos obtenidos mediante PAJ

Tabla 34.*Matriz de cálculo de los niveles de peligro*

Aspectos físicos						Nivel de Peligro (P)
Unidades Geomorfológicas		Pendiente		Unidades Litológicas		
Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	
0.481		0.503		0.470		0.486
0.267		0.246		0.274		0.263
0.147	0.633	0.140	0.260	0.156	0.106	0.146
0.069		0.073		0.062		0.069
0.036		0.038		0.038		0.037

*Nota: Elaboración propia***Tabla 35.***Rango de niveles de peligro*

Nivel	Rango
Muy alto	0.263 ≤ P < 0.486
Alto	0.146 ≤ P < 0.263
Medio	0.069 ≤ P < 0.146
Bajo	0.037 ≤ P < 0.069

Nota: Elaboración propia

3.2.2.3.6. Estratificación del nivel de peligro

A partir de los valores ponderados, se establecieron los rangos de estratificación del nivel de peligro, los cuales se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36.*Estratificación de los niveles de peligro*

Descripción	Niveles de Peligro	Rango
Unidades geomorfológicas: cauce fluvial; pendiente: 0% a 2%; unidades litológicas: depósito fluvial	Muy alto	$0.263 \leq P < 0.486$
Unidades geomorfológicas: terraza aluvial; pendiente: 2% a 4%; unidades litológicas: depósito fluvial 1	Alto	$0.146 \leq P < 0.263$
Unidades geomorfológicas: vertiente coluvio-deluvial; pendiente: 4% a 6%; unidades litológicas: depósito fluvio-aluvial	Medio	$0.069 \leq P < 0.146$
Unidades geomorfológicas: montaña en roca volcánico-sedimentaria, montaña en roca sedimentaria; pendiente: 6% a 8% y $> 8\%$; unidades litológicas: depósitos lacustres y areniscas	Bajo	$0.037 \leq P < 0.069$

Nota: Elaboración propia

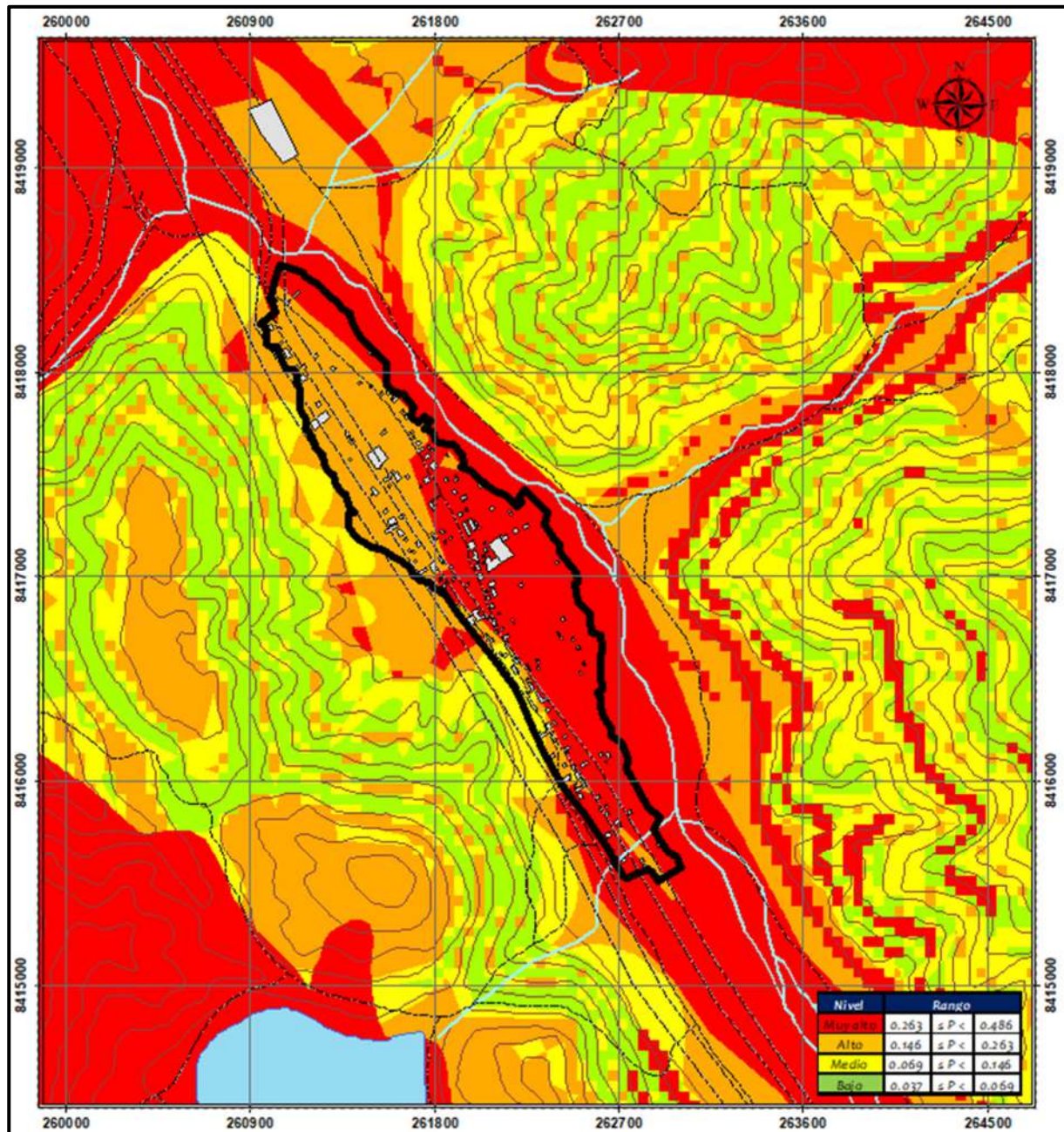
De esta manera se definieron los rangos que permitieron representar gráficamente los niveles de peligro, tal como se muestra en la Figura 25.

Los resultados permiten concluir que las vías de la Comunidad Campesina de Sencca Chectuyoc se encuentran dentro de un nivel de peligro Alto y Muy alto, lo que confirma que la capacidad portante del suelo es deficiente, tanto desde el punto de vista geológico como geomorfológico, validando el análisis realizado.

En el área delimitada de estudio, donde se encuentran las vías principales de la comunidad se observa que gran parte del trazado vial se ubica dentro de zonas de peligro Alto y Muy alto, lo cual confirma las limitaciones geotécnicas del terreno y la deficiente capacidad portante del suelo, directamente asociada al deterioro prematuro de los pavimentos y a la necesidad de implementar alternativas de mejora como el Material Celular Ligero (MCL).

Figura 25.

Zonificación del nivel de peligrosidad



Nota: Elaboración propia

3.2.3. Estudio de tráfico

Como parte del criterio para determinar el número de calicatas y caracterizar adecuadamente las condiciones de diseño del pavimento, se consideró el Índice Medio Diario Anual (IMDA) de la vía. Para ello, se realizó el conteo vehicular correspondiente y el estudio de tráfico asociado al tramo en evaluación.

3.2.3.1. Cronograma de campo

La programación de las estaciones de conteo vehicular se definió en concordancia con los tiempos establecidos para el desarrollo de los estudios contemplados en esta investigación.

La Tabla 37, la Tabla 38 y la Figura 26 presentan la ubicación, distribución temporal y actividades ejecutadas como parte del estudio de tráfico de la vía en estudio.

Se estableció un período de 07 días calendario para la realización del conteo vehicular. Se instaló una estación de aforo en la intersección de la vía principal con la trocha carrozable adyacente al Grifo Dorado S.A.C., y desde esta ubicación se efectuó el registro de vehículos en ambos sentidos de circulación: Sicuani → Marangani y Marangani → Sicuani.

El conteo se realizó de manera continua durante un período de 24 horas, permitiendo registrar de forma representativa el flujo vehicular diario y caracterizar adecuadamente el tránsito que actúa sobre la vía evaluada.

Tabla 37.

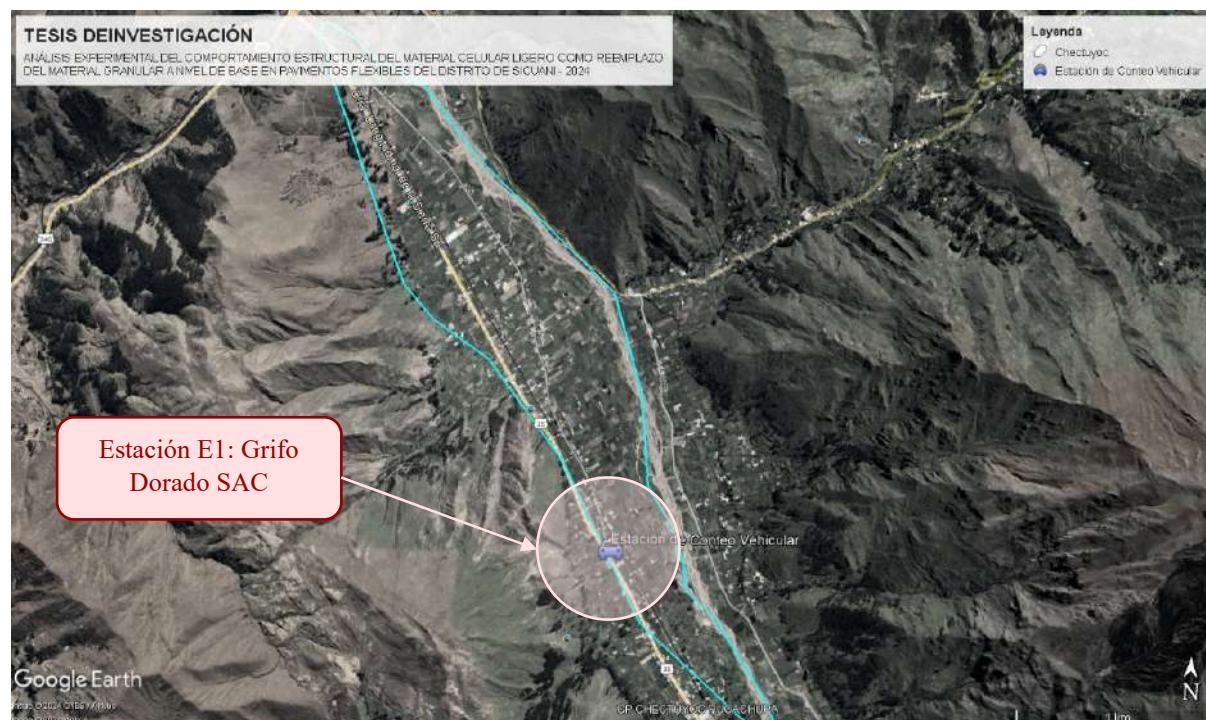
Ubicación de las Estaciones de Conteo

N°	Estación	Estación Para El Conteo Vehicular			N° días	Inicio	Termino	Horario
		Ubicación	Sentido					
E1	Grifo	Este: 262520.00	Sicuani - Marangani	07	07/10/2024	13/10/2024	0:00-24:00	
	Dorado SAC	Norte: 8415844.00	Marangani - Sicuani	07	07/10/2024	13/10/2024	0:00-24:00	

Nota: Elaboración propia

Figura 26.

Ubicación de Estación de Conteo



Nota: Adaptado de Google Earth

Tabla 38.
Cronograma de Campo

Tarea	Año 2024									
	Octubre									
	Sab 05	Dom 06	Lun 07	Mar 08	Mie 09	Jue 10	Vie 11	Sab 12	Dom 13	Lun 14
Trabajo de Campo										
Conteo (07 días)										
Estación: E-1										
Nº días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Nota: Elaboración propia

3.2.3.2. Cálculos para hallar el promedio diario anual (IMD)

Para determinar el Índice Medio Diario Anual (IMD) de la vía en estudio, se empleó la metodología establecida por el Manual de Carreteras – Aforo y Estudios de Tráfico del MTC, la cual se basa en el cálculo del volumen promedio semanal y su posterior corrección mediante el factor estacional correspondiente al mes del aforo.

El cálculo se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$IMD = IMD_s \times FC_m$$

$$IMD_s = \frac{V_L + V_S + V_D}{7}$$

Donde:

IMD_s = Volumen clasificado promedio de la semana

V_L = Volumen clasificado día laboral (lun, mar, mie, jue y vie)

V_S = Volumen clasificado días no laborables (sábado),

V_D = Volumen clasificado días no laborables (domingo),

FC_m = Factor de corrección según el mes que se efectuó el aforo.

Obtención de los Factores de Corrección

El factor de corrección estacional (FC_m) se determina a partir de una serie anual de tráfico registrada por una Unidad de Peaje, con la finalidad de ajustar el volumen observado y eliminar fluctuaciones debidas a: variaciones estacionales del tránsito, actividad recreacional, festividades, temporadas de cosecha, condiciones climáticas, vacaciones escolares, y otros patrones de viaje propios de la región.

Para la presente investigación, el FC_m se obtuvo a partir de la información proporcionada por Provías Nacional – Unidades de Peaje, utilizando los registros de la Unidad de Peaje de Aguas Calientes, ubicada en la carretera Cusco – Puno, km 1152+400, por ser la estación más cercana y representativa de las condiciones del corredor vial donde se ubica la vía evaluada.

La Tabla 39, presenta el factor de corrección mensual (FC_m) utilizado para ambos sentidos, el cual corresponde al mes en que se ejecutó el aforo.

Tabla 39.

Factor de Corrección Mensual - octubre 2017

Mes	Punto de Control	Factor de Corrección Vehículos Ligeros	Factor de Corrección Vehículos Pesados
Octubre	Aguas Calientes	1.0294	0.9434

Nota: Tomado de Provias Nacional (2010-2017)

Efectuados los aforos vehiculares, se procedió a consolidar y verificar la consistencia de los datos registrados en campo para cada estación y día de conteo. Una vez validados, se determinó el volumen promedio semanal (IMD_s) mediante la distribución de los flujos obtenidos durante la semana del estudio. Posteriormente, para obtener el Índice Medio Diario Anual (IMD), se aplicó al IMD_s el factor de corrección mensual (FC_m) correspondiente al mes en que se realizó el aforo.

3.2.3.3. Conteo vehicular de 24 horas

En el Anexo 6 se presentan los formatos de campo empleados para la realización del estudio de conteo y clasificación vehicular.

El levantamiento de la información se ejecutó mediante el trabajo simultáneo de dos brigadas de tráfico, cada una conformada por:

- Un jefe de brigada (tesista), responsable de la supervisión y validación del registro.
- Un asistente de apoyo, encargado del conteo manual y clasificación del tránsito.

Ambas brigadas realizaron sus actividades en turnos rotativos, asegurando la continuidad del registro durante 24 horas ininterrumpidas.

La clasificación vehicular se efectuó utilizando la tipología establecida en el Manual de Carreteras del MTC, considerando las siguientes categorías:

- Autos
- Station Wagon
- Camionetas Pick-Up
- Camionetas Panel
- Camionetas Rural (Combi)
- Microbuses de 2 ejes
- Buses de 2 ejes
- Buses de 3 ejes a más
- Camiones de 2 ejes

- Camiones de 3 ejes
- Camiones de 4 ejes
- Semitrailers
- Trailers

Esta clasificación permitió identificar adecuadamente las cargas equivalentes inducidas por cada tipo vehicular, información fundamental para el cálculo posterior del Índice Medio Diario Anual (IMD), IMDA, ESALs y para el diseño estructural del pavimento.

3.2.3.4. Resultados del conteo vehicular

Como resultado del conteo vehicular ejecutado durante 24 horas continuas por 7 días, se obtuvo un total de 14 330 vehículos, considerando ambos sentidos de circulación. De este volumen total:

- 10 039 vehículos correspondieron a tránsito ligero, y
- 4 291 vehículos correspondieron a tránsito pesado.

A cada una de estas categorías se les aplicó el factor de corrección mensual (FC_m) correspondiente, con el propósito de obtener el Índice Medio Diario Anual (IMD) representativo para el corredor vial en estudio:

Para vehículos ligeros

$$IMD_{s \text{ ligero}} = \frac{V_L + V_S + V_D}{7}$$

$$IMD_{s \text{ ligero}} = \frac{10\ 039}{7}$$

$$IMD_{s \text{ ligero}} = 1\ 434$$

$$IMD_{\text{ligero}} = IMD_{s \text{ ligero}} \times FC_m$$

$$IMD_{\text{ligero}} = 1\ 434 \times 1.0294$$

$$IMD_{\text{ligero}} = 1476$$

Para vehículos pesados

$$IMD_{s \text{ pesado}} = \frac{V_L + V_S + V_D}{7}$$

$$IMD_{s \text{ pesado}} = \frac{4\ 291}{7}$$

$$IMD_{s \text{ pesado}} = 613$$

$$IMD_{\text{pesado}} = IMD_s \times FC_m$$

$$IMD_{\text{pesado}} = 613 \times 0.9434$$

$$IMD_{\text{pesado}} = 578$$

IMD Total

$$IMD = IMD_{\text{ligero}} + IMD_{\text{pesado}}$$

$$IMD = 1\,476 + 578$$

$$IMD = 2\,054$$

Con los valores registrados durante la semana de aforo y aplicando el factor de corrección mensual (FC_m) correspondiente al mes de octubre, se obtuvo un Índice Medio Diario Anual (IMD) de 2 054 veh/día, valor representativo para el tramo en estudio.

En la: Tabla 105 (conteo del lunes 07 de octubre), Tabla 106 (conteo del martes 08 de octubre), Tabla 107 (conteo del miércoles 09 de octubre), Tabla 108 (conteo del jueves 10 de octubre), Tabla 109 (conteo del viernes 11 de octubre), Tabla 110 (conteo del sábado 12 de octubre), Tabla 111 (conteo del domingo 13 de octubre) y Tabla 112 (conteo semanal del 07 al 13 de octubre) del Anexo 6 se presentan las hojas de cálculo correspondientes al conteo y clasificación vehicular obtenidas en campo.

Asimismo, en la Tabla 41 se muestra el resumen del conteo vehicular para vehículos ligeros y pesados durante los 7 días de registro. De acuerdo con estos resultados, en la estación E1: Grifo Dorado SAC, se identifica:

- El mayor volumen vehicular el día jueves, con 2 288 veh/día, y
- El menor volumen vehicular el día lunes, con 1 712 veh/día.

Dado que los conteos se realizaron en el mes de octubre, se aplicó el factor de corrección mensual (FC_m) correspondiente para cada categoría vehicular (ligero y pesado). En la Estación E1, el flujo presenta un tránsito continuo tanto de vehículos livianos como de vehículos pesados, lo que refuerza la importancia del análisis para el diseño estructural del pavimento y el cálculo de los ESALs.

Tabla 40.

Resumen conteo semanal para todos los vehículos

Conteo Vehicular Total	
Día	N° vehículos
Lunes	1712
Martes	2006
Miércoles	1977
Jueves	2288
Viernes	2189

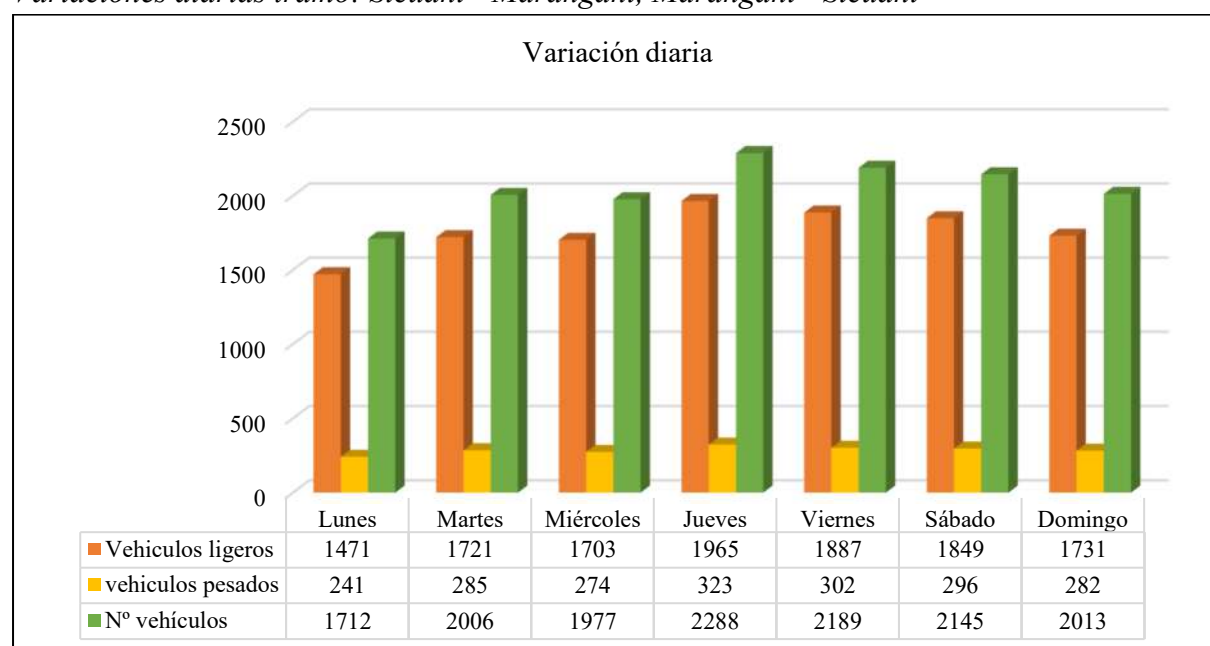
Conteo Vehicular Total	
Día	N° vehículos
Sábado	2145
Domingo	2013
Total	14330

Nota: Elaboración propia

La Figura 27, Figura 28, Tabla 41 y Tabla 42, presentadas a continuación, muestran las curvas de variación diaria y horaria del tránsito para cada sentido de circulación, así como el porcentaje de participación de cada grupo vehicular dentro del IMD registrado en el punto de control.

Figura 27.

Variaciones diarias tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani



Nota: Elaboración propia

Tabla 41.

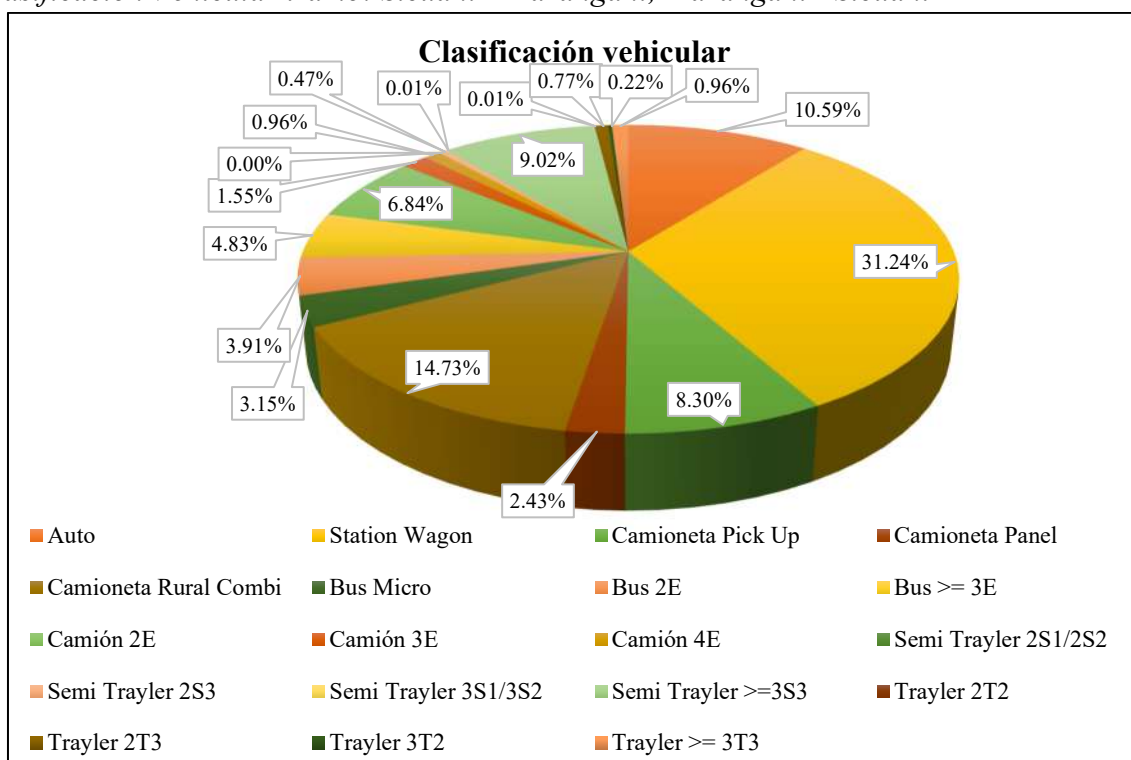
Resumen de conteo vehicular para vehículos ligeros y pesados

Conteo Vehicular			
Día	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	N° vehículos
Lunes	1471	241	1712
Martes	1721	285	2006
Miércoles	1703	274	1977
Jueves	1965	323	2288
Viernes	1887	302	2189
Sábado	1849	296	2145
Domingo	1731	282	2013
Total			14330

Nota: Elaboración propia

Figura 28.

Clasificación Vehicular tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani



Nota: Elaboración propia

Tabla 42.

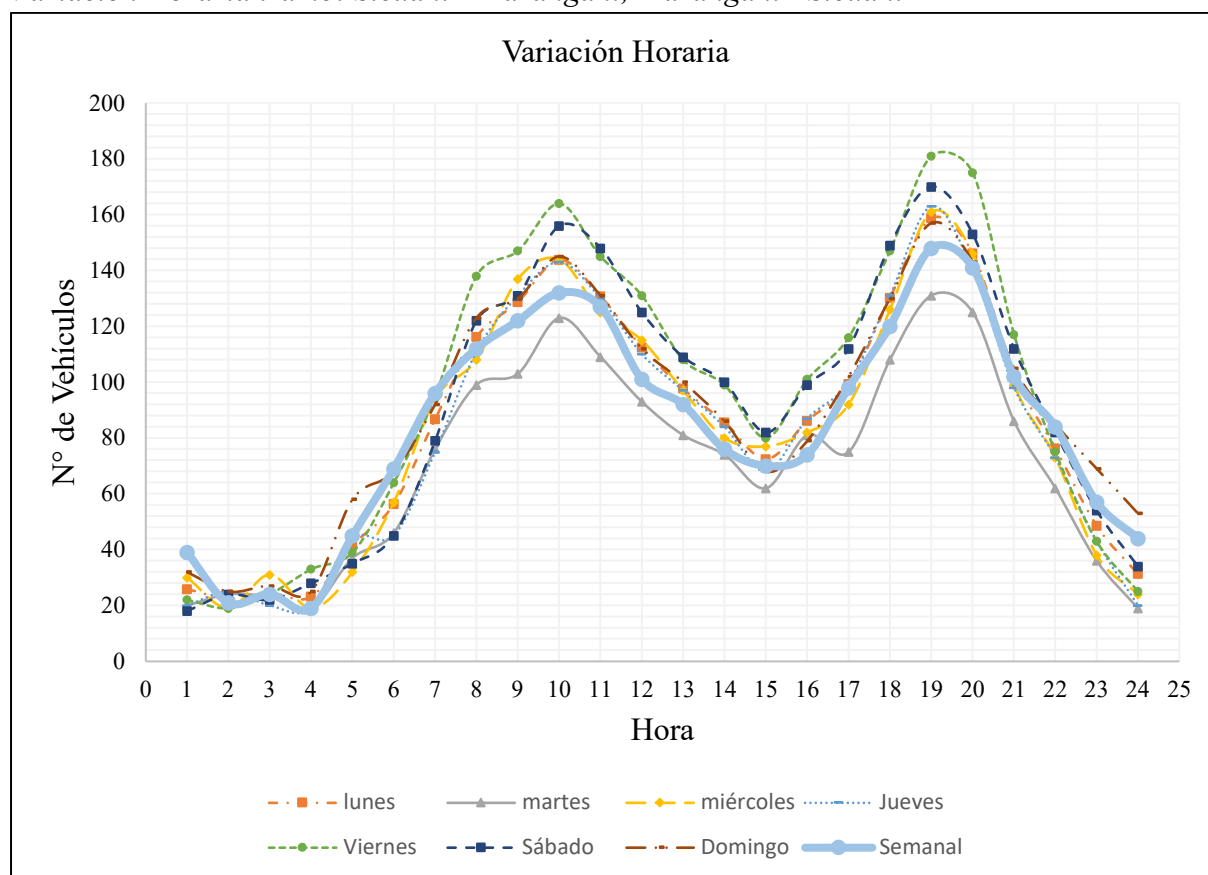
Clasificación Vehicular tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani

Clasificación Vehicular			
	Auto		1517
	Station Wagon		4477
Vehículos Ligeros	Camioneta	Pick Up	1190
		Panel	348
	Bus	Rural Combi	2111
		Micro	452
		>= 3E	567
	Camión	2E	560
		3E	987
		4E	224
		Semi Traylor	2S1/2S2
		2S3	77
	3S1/3S2	7	
	>=3S3	1295	
Vehículos Pesados	Traylor	2T2	7
		2T3	112
		3T2	35
		>= 3T3	140
		Total	

Nota: Elaboración propia

Figura 29.

Variación Horaria tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani



Nota: Elaboración propia

Tabla 43.

Variación Horaria tramo: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani

Variación horaria								
N° vehículos								
Hora	Promedio Semanal	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00-01:00	26	20	30	20	22	18	32	39
01:00-02:00	22	24	19	25	19	24	25	21
02:00-03:00	24	23	31	20	24	22	27	24
03:00-04:00	23	19	19	19	33	28	25	19
04:00-05:00	41	37	32	44	39	35	58	45
05:00-06:00	56	46	57	45	64	45	68	69
06:00-07:00	87	76	94	75	95	79	92	96
07:00-08:00	116	99	108	111	138	122	123	112
08:00-09:00	129	103	137	131	147	131	130	122
09:00-10:00	144	123	144	143	164	156	145	132
10:00-11:00	131	109	125	130	145	148	131	127
11:00-12:00	112	93	115	110	131	125	112	101
12:00-13:00	98	81	97	97	108	109	100	92
13:00-14:00	86	74	80	84	99	100	86	76
14:00-15:00	72	62	77	68	80	82	68	70

Variación horaria								
N° vehículos								
Hora	Promedio Semanal	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
15:00-16:00	86	81	82	87	101	99	79	74
16:00-17:00	99	75	92	100	116	112	102	98
17:00-18:00	130	108	126	131	147	149	130	120
18:00-19:00	159	131	161	163	181	170	157	148
19:00-20:00	146	125	146	140	175	153	143	141
20:00-21:00	103	86	99	98	117	112	105	102
21:00-22:00	76	62	73	73	75	82	85	84
22:00-23:00	49	36	38	43	43	54	69	57
23:00-24:00	31	19	24	20	25	34	53	44
Total	2047	1712	2006	1977	2288	2189	2145	2013

Nota: Elaboración propia

3.2.3.5. Proyección del tráfico

El tráfico futuro que actuará sobre la vía está conformado por tres componentes:

- Tráfico normal: corresponde al flujo existente cuya evolución responde a un crecimiento inercial propio de la dinámica demográfica y económica de la zona.
- Tráfico derivado o desviado: volumen de tránsito que puede ser atraído hacia la vía o desviado desde otra carretera debido a las condiciones de accesibilidad o conectividad.
- Tráfico inducido: incremento generado por la mejora de la vía, que permite reducir tiempos de viaje y costos de operación vehicular, incentivando un mayor uso.

Para la proyección del tráfico futuro, se empleó la metodología basada en la evolución de indicadores macroeconómicos, considerando para este caso la proyección poblacional y el crecimiento del Producto Bruto Interno (PBI), tal como establece el Manual de Carreteras – Aforos y Estudios de Tráfico (MTC).

La proyección del volumen vehicular se calculó mediante la expresión:

$$T_n = T_o(1 + r)^n$$

Donde:

- T_n = Tráfico proyectado en el año n,
- T_o = Tráfico actual (año base),
- r = Tasa anual de crecimiento,
- n = Número de años en el período de diseño.

Para la presente investigación se adoptaron las siguientes tasas anuales de crecimiento:

- Vehículos livianos: 0.75 %

- Vehículos pesados: 4.43 %

Asimismo, se consideró un horizonte de diseño de 10 años, obteniéndose la proyección de tráfico correspondiente, cuyos resultados detallados se presentan en el Anexo 7.

Tabla 44.

Proyección del Tráfico (2024-2034)

Año	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
IMDa	2,054	2,080	2,106	2,133	2,160	2,188	2,217	2,247	2,278	2,309	2,341

Nota: Elaboración propia

3.2.4. *Elaboración de calicatas*

Una vez definida la vía de estudio, se procedió a la ejecución de calicatas distribuidas a lo largo del tramo, siguiendo los criterios establecidos en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos, el cual determina el número mínimo de calicatas necesarias para la exploración geotécnica en función del IMD y de la clase o tipo de carretera.

Con base en el IMD obtenido en el acápite anterior, se cuenta con:

- IMD actual: 2 083 veh/día
- IMD futuro (horizonte 10 años): 2 383 veh/día
- Calzada de dos carriles

De acuerdo con la clasificación del Manual de Carreteras, las vías con estos volúmenes de tránsito se catalogan como Carreteras de Primera Clase, criterio que se encuentra sustentado en la Figura 30. Bajo esta clasificación, el manual establece el número y espaciamiento recomendados de calicatas para la adecuada caracterización del suelo de fundación.

En cumplimiento de dicha normativa, se procedió a desarrollar las calicatas correspondientes, asegurando su distribución representativa en la zona de estudio y garantizando la obtención de muestras suficientes y confiables para los ensayos de caracterización física y mecánica del terreno.

Para una carretera de primera clase, el Manual de Carreteras recomienda la ejecución de 4 calicatas por cada kilómetro, con una profundidad mínima de 1.50 m y dimensiones de 0.80 m × 0.80 m como mínimo. En cumplimiento de esta directriz, las calicatas fueron desarrolladas a lo largo de la Vía Longitudinal 3S, correspondiente al tramo evaluado.

La vía presenta una longitud total de 2 850.45 m, equivalente a 2.8 km. Aplicando el criterio normativo antes mencionado, se obtuvo un total de 11 calicatas requeridas para la caracterización adecuada del suelo de subrasante.

Figura 30.*Número de calicatas para exploración de suelos*

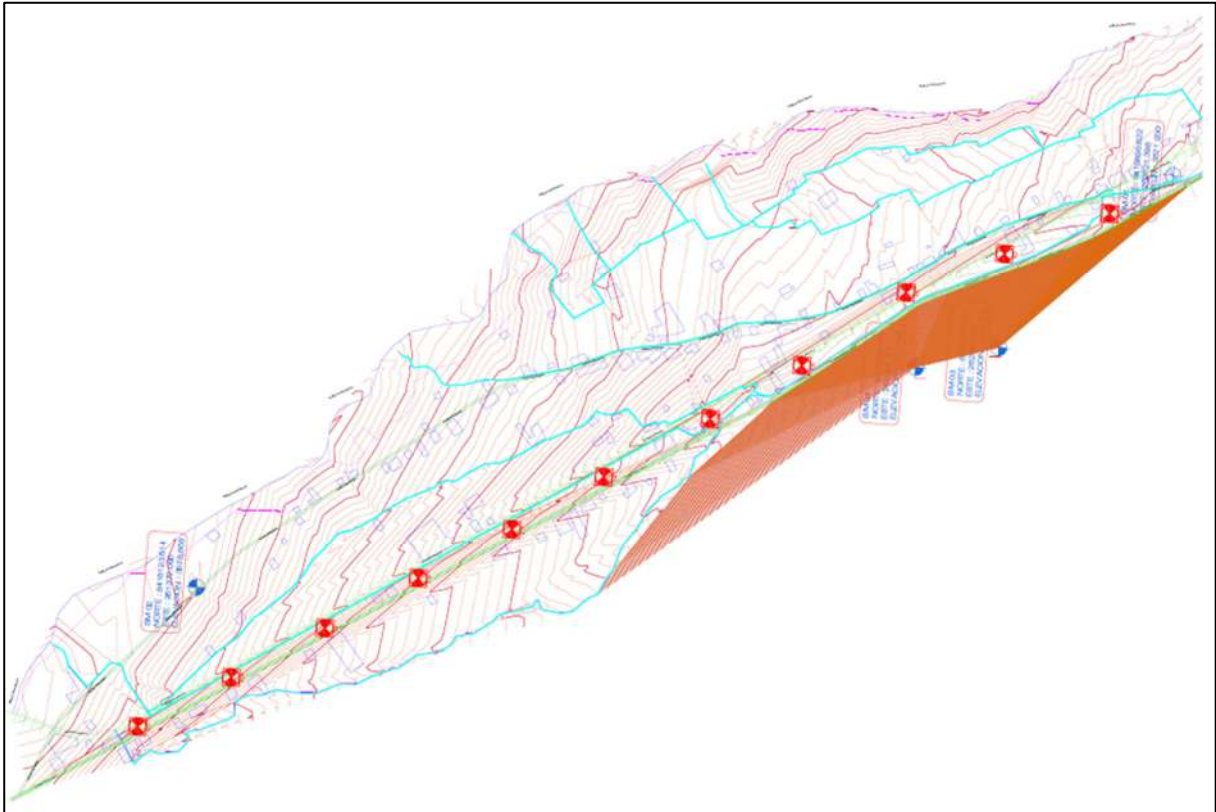
Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	4 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	3 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	2 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	1 calicata x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada

Nota: Elaboración propia

En la Figura 31 se muestra el plano de ubicación de las calicatas ejecutadas a lo largo de la vía, las cuales fueron distribuidas de manera uniforme para asegurar una representación fiel de las condiciones geotécnicas del tramo estudiado.

Figura 31.

Plano de calicatas elaboradas



Nota: Elaboración propia

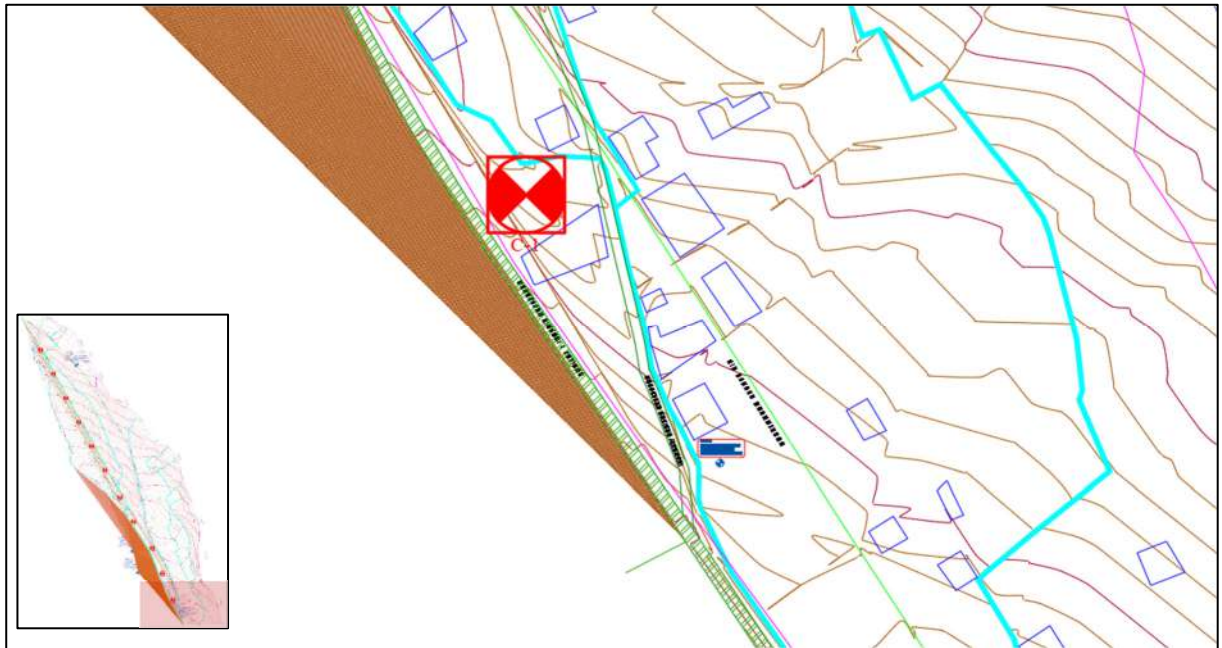
Tabla 45.

Coordenadas de las Calicatas

Calicata	E	N
C-1	262,420.30	8,416,041.30
C-2	262,305.96	8,416,281.57
C-3	262,196.59	8,416,506.38
C-4	262,005.21	8,416,738.09
C-5	261,863.99	8,416,944.38
C-6	261,707.61	8,417,184.07
C-7	261,567.25	8,417,390.95
C-8	261,434.59	8,417,602.84
C-9	261,299.85	8,417,813.43
C-10	261,166.67	8,418,025.00
C-11	261,033.70	8,418,236.17

Nota: Elaboración propia

Figura 32.
Calicata 1



Nota: Elaboración propia

Figura 33.
Calicata 2 y calicata 3



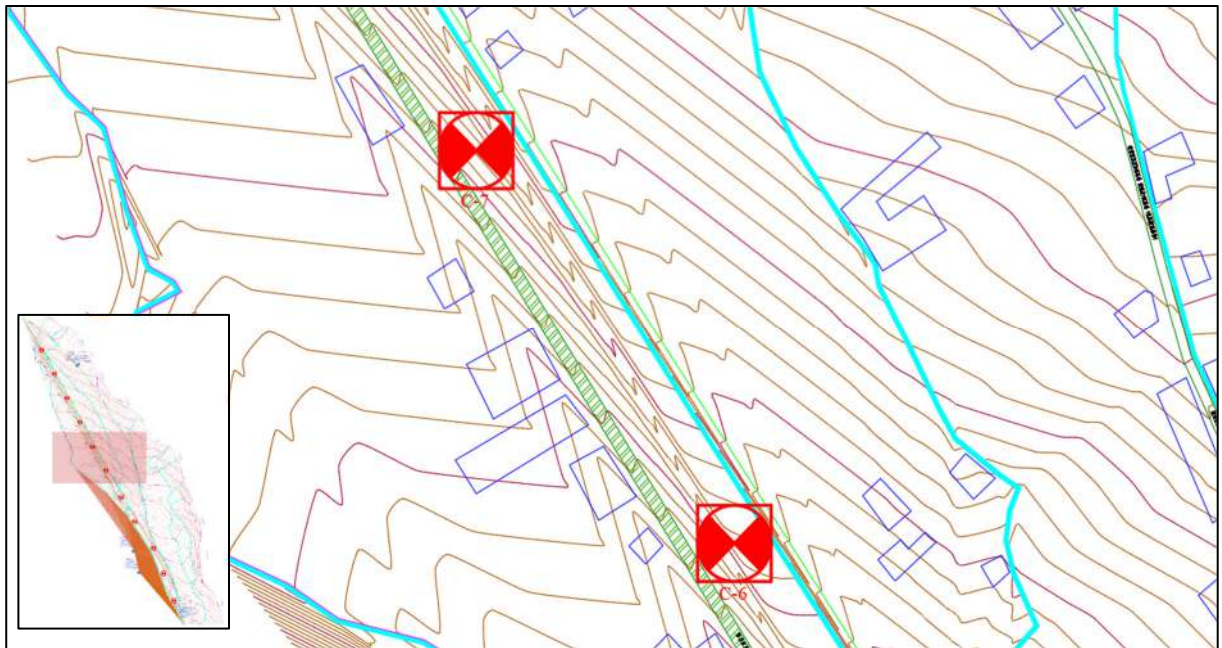
Nota: Elaboración propia

Figura 34.
Calicata 4 y calicata 5



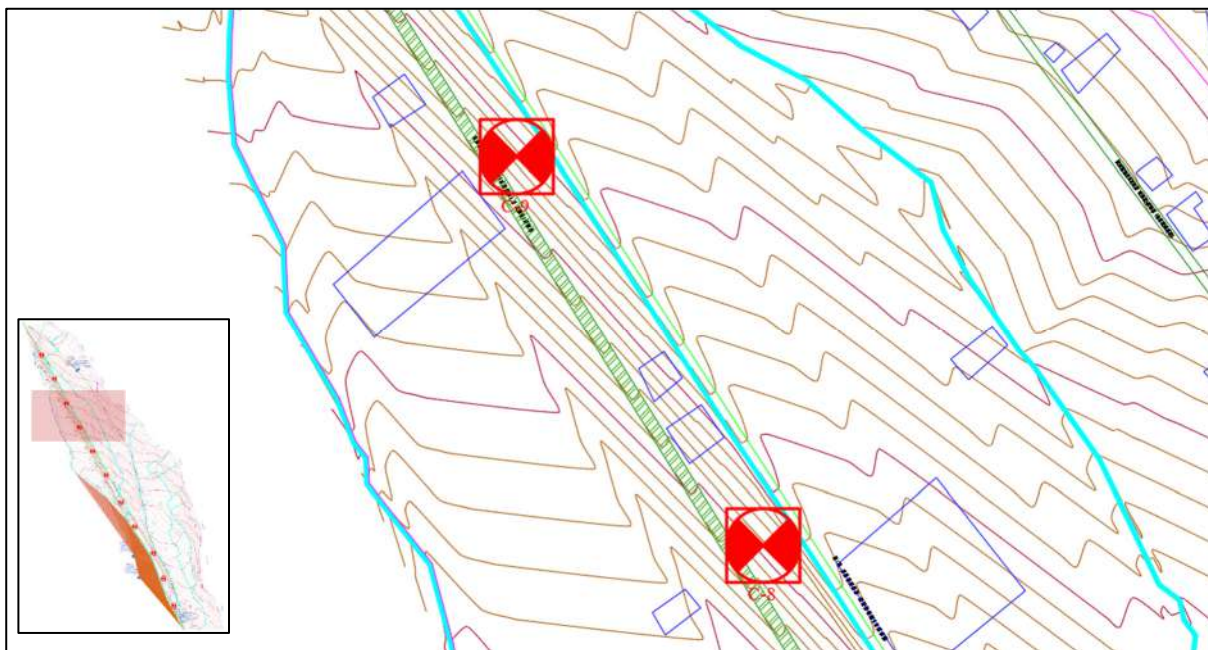
Nota: Elaboración propia

Figura 35.
Calicata 6 y calicata 7



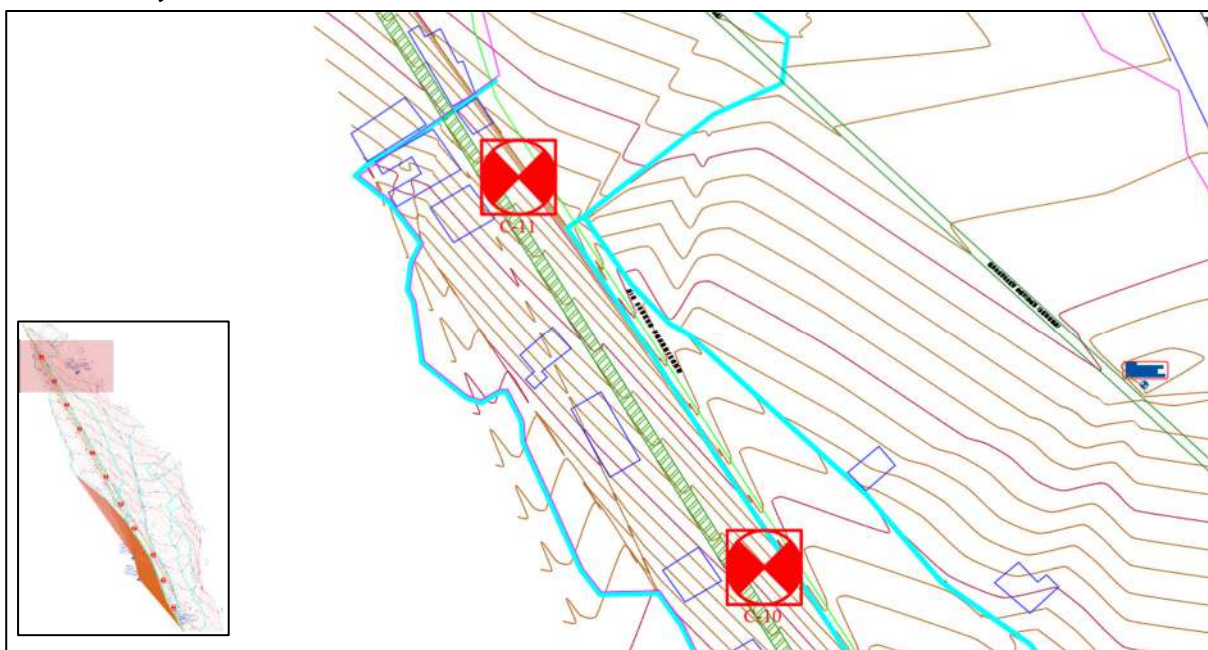
Nota: Elaboración propia

Figura 36.
Calicata 8 y calicata 9



Nota: Elaboración propia

Figura 37.
Calicata 10 y calicata 11



Nota: Elaboración propia

En la Figura 38 y Figura 39 se presenta el proceso de excavación y elaboración de la Calicata 1, mostrando las etapas principales del trabajo de campo. La evidencia fotográfica correspondiente al desarrollo del resto de calicatas se encuentra detallada en el Anexo 9.

Figura 38.

Replanteo y perforación de calicata C-1



Nota: Elaboración propia

Figura 39.

Verificación de profundidad de perforación y muestreo de calicata C-1



Nota: Elaboración propia

3.2.4.1. Ensayo de Granulometría

El análisis granulométrico se realizó con el propósito de determinar la distribución de tamaños de partículas presentes en los materiales correspondientes a las tres capas evaluadas: subrasante, subbase y base. Para ello, se partió de una muestra representativa previamente obtenida en campo, la cual fue secada en estufa a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta

alcanzar peso constante, garantizando con ello la eliminación completa de humedad antes del tamizado.

Una vez seca, la muestra fue sometida al proceso de tamizado utilizando una serie de tamices estandarizados, iniciando por el tamiz de mayor apertura (1/2") y culminando en el tamiz más fino (#200). Después del tamizado, se registró el peso de material retenido en cada tamiz, calculándose dicho valor mediante la diferencia entre el peso del tamiz con material y el peso del tamiz vacío:

$$W_r = W_{\text{tamiz}} - W_{\text{base}}$$

Con este peso retenido se determinó el porcentaje retenido en cada tamiz, empleando la relación:

$$\%R = \left(\frac{W_r}{W_{\text{total}}} \right) \times 100$$

Donde:

- W_{tamiz} : es el peso total de la muestra y el tamiz después del tamizado
- W_{base} : es el peso del tamiz vacío.

Posteriormente, se determinó el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, calculando la diferencia entre el 100 % y la sumatoria de los porcentajes retenidos en los tamices anteriores:

$$\%P = 100 - \sum \%R$$

Este procedimiento permitió establecer la proporción de material que atraviesa sucesivamente cada malla del tamiz y, por ende, la evolución de la distribución granulométrica a lo largo de todo el análisis.

Finalmente, con los datos obtenidos de porcentaje retenido y porcentaje acumulado que pasa, se construyó la curva granulométrica, la cual permitió visualizar de manera clara la distribución de tamaños de partículas del material.

3.2.4.2. Ensayo de Índice de plasticidad

Para la determinación de los límites de consistencia de las muestras de subrasante, se siguió el procedimiento establecido en las normas del MTC y ASTM, utilizando el aparato de Casagrande para obtener el Límite Líquido (LL). En este ensayo se registró el contenido de humedad al cual el surco trazado en la pasta de suelo se cerraba después de 25 golpes del dispositivo. Para ello, se determinó la masa de agua evaporada por diferencia entre la masa del suelo húmedo y la masa del suelo seco, de acuerdo con la expresión:

$$M_{\text{agua}} = (M_{\text{suelo húmedo}} + M_{\text{recipiente}}) - (M_{\text{suelo seco}} + M_{\text{recipiente}})$$

La masa de suelo seco se obtuvo restando la masa del recipiente:

$$M_{\text{suelo seco}} = (M_{\text{suelo seco}} + M_{\text{recipiente}}) - M_{\text{recipiente}}$$

Con estos valores, la humedad natural se calculó como:

$$\omega_{(\%)} = \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{seco}}} \times 100\%$$

Este valor representó el Límite Líquido (LL).

Posteriormente, para la determinación del Límite Plástico (LP), se procedió a enrollar cilindros de suelo de aproximadamente 3 mm de diámetro, reduciendo gradualmente el contenido de humedad hasta que las muestras no presentaran agrietamiento durante el enrollado. Para el cálculo de la humedad correspondiente se empleó el mismo procedimiento descrito para el límite líquido, determinando la masa de agua evaporada, la masa de suelo seco y la humedad natural con las mismas ecuaciones anteriores.

El valor de humedad obtenido en este proceso se asumió como el Límite Plástico (LP).

Finalmente, con los valores de LL y LP, se calculó el Índice de Plasticidad (IP) mediante la expresión:

$$IP = LL - LP$$

3.2.4.3. Ensayo de Proctor modificado

La Máxima Densidad Seca (MDS) y el Contenido Óptimo de Humedad (COH) se determinaron mediante el ensayo Proctor Modificado, siguiendo los procedimientos de compactación establecidos en laboratorio. Este ensayo permite evaluar la relación entre la humedad del suelo y su densidad resultante, identificando las condiciones óptimas en las que el material alcanza su mayor grado de compactación.

Para iniciar el análisis, se determinó la densidad húmeda del material, calculada como el cociente entre la masa del suelo compactado en el molde y el volumen del mismo:

$$\gamma_{\text{húmeda}} = \frac{M_{\text{compactada}}}{V_{\text{molde}}}$$

Seguidamente, se obtuvo el contenido de humedad, calculado como el porcentaje de masa de agua evaporada respecto a la masa del suelo seco:

$$\omega = \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{seco}}} \times 100\%$$

La masa de agua se determinó mediante la diferencia entre la masa de la muestra compactada y la masa de la muestra seca:

$$M_{\text{agua}} = M_{\text{compactada}} - M_{\text{seca}}$$

Con el valor de densidad húmeda y el contenido de humedad, se obtuvo la densidad seca, aplicando la expresión:

$$\gamma_{seca} = \frac{\gamma_{húmeda}}{1 + \frac{\omega}{100}}$$

Este cálculo se realizó para diferentes niveles de humedad, obteniendo así un conjunto de valores de densidad seca correspondientes a cada variación en el contenido de humedad. Posteriormente, los resultados fueron representados en una curva de compactación, graficando la densidad seca en función del contenido de humedad.

La curva obtenida permitió identificar de manera clara el punto máximo de densidad seca alcanzada, el cual corresponde a la Máxima Densidad Seca (MDS). A su vez, el contenido de humedad asociado a ese punto representó el Contenido Óptimo de Humedad (COH).

3.2.4.4. Ensayo de CBR

Para la ejecución del ensayo CBR (California Bearing Ratio) se seleccionaron muestras de suelo previamente secadas al aire. Antes de su preparación, las muestras fueron tamizadas para retirar partículas mayores a 19 mm, de acuerdo con los requisitos establecidos en el Manual de Ensayos de Materiales del MTC. Una vez acondicionada la muestra, se procedió a su compactación empleando un molde estándar de volumen conocido (V_{molde}).

El suelo fue compactado en tres capas, aplicando 12, 25 y 56 golpes con el martillo de compactación, según lo indicado por la norma para reproducir las condiciones de energía y lograr la máxima densidad seca previamente determinada mediante el ensayo Proctor Modificado. Una vez compactadas, las muestras fueron sumergidas en agua durante 96 horas, garantizando su saturación completa antes del ensayo de penetración.

Posteriormente, se aplicaron cargas para medir la resistencia del material a penetraciones de 2.5 mm y 5.0 mm, registrándose la carga aplicada (P) para cada profundidad. Dicha carga fue transformada a presión unitaria, dividiéndola entre el área de la base del pistón:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Una vez obtenida la presión unitaria, se determinó el índice CBR comparando la presión medida con la presión estándar establecida por la normativa, cuyos valores son: 70.3 kg/cm² para una penetración de 2.5 mm y 105.1 kg/cm² para una penetración de 5.0 mm.

El valor del CBR se obtuvo mediante:

$$CBR = \frac{\sigma}{\sigma_{estándar}} \times 100\%$$

Finalmente, el mayor valor entre los CBR calculados para las penetraciones de 2.5 mm y 5.0 mm se adoptó como el CBR del material, siguiendo los criterios establecidos por la norma.

3.2.4.5. Módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia (MR) se estimó utilizando una correlación empírica brindada por el Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras NCHRP 1-37^a “Guía para diseño mecanicista”, la cual relaciona este parámetro con el índice CBR. Para este propósito se empleó la expresión:

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$$

La aplicación de esta correlación permitió obtener un valor representativo del comportamiento elástico del material bajo cargas repetitivas. Esta metodología fue adoptada debido a las limitaciones presupuestarias asociadas a la ejecución directa de ensayos de módulo resiliente, los cuales requieren equipos especializados y presentan costos significativamente más elevados.

3.2.4.6. Módulo de elasticidad

En el diseño estructural de pavimentos mediante modelos de capas elásticas, el módulo resiliente (MR) se emplea como una estimación del módulo de elasticidad del suelo bajo cargas repetitivas. Diversos autores y guías de diseño, como la Guía AASHTO 1993 y Huang (1993), consideran al módulo resiliente como un módulo elástico efectivo bajo cargas repetidas, similar en concepto al módulo de elasticidad estático. En consecuencia, en la presente investigación se adopta la relación simplificada:

$$E_s = MR$$

Donde ambos se expresan en las mismas unidades, generalmente psi o MPa.

3.2.5. Caracterización de suelo de subrasante

Tras la excavación de las once (11) calicatas, se procedió a la caracterización de las muestras extraídas de la subrasante con el fin de determinar el tipo de suelo presente a lo largo del tramo en estudio, así como obtener los valores de CBR necesarios para el diseño del pavimento flexible.

3.2.5.1. Granulometría de la subrasante del suelo

Como parte del proceso de caracterización, se realizaron ensayos granulométricos a muestras representativas de cada una de las once calicatas distribuidas a lo largo del tramo evaluado. Las excavaciones se ejecutaron hasta una profundidad de 1.50 m respecto al nivel de la subrasante, siguiendo las especificaciones establecidas en el Manual de Ensayo de Materiales del MTC.

El propósito del ensayo fue determinar la distribución de tamaños de partículas y clasificar los suelos conforme al sistema SUCS, información necesaria para evaluar su comportamiento y su idoneidad como material a nivel de subrasante.

En la Figura 170, Figura 171, Figura 172, Figura 173, Figura 174, Figura 175, Figura 176, Figura 177, Figura 178, Figura 179 y Figura 180 del Anexo 10 se muestra los análisis granulométricos realizados para cada una de las muestras de las calicatas respectivamente.

Los resultados consolidados del análisis granulométrico se presentan en la Tabla 46:

Tabla 46.

Porcentaje de agregado fino y grueso de las muestras de subrasante

Calicata	Porcentaje Grava (%)	Porcentaje Arena (%)	Porcentaje Finos (%)
C-1	28.4	48.6	22.9
C-2	33.7	47.4	19.0
C-3	27.6	51.8	20.6
C-4	31.0	50.6	18.4
C-5	34.7	46.6	18.7
C-6	34.3	47.1	18.5
C-7	35.0	49.7	15.4
C-8	34.5	49.2	16.3
C-9	34.9	48.7	16.4
C-10	33.0	50.6	16.3
C-11	34.4	49.5	16.1

Nota: Elaboración propia

Los resultados granulométricos muestran que el porcentaje de finos varía entre 15.4% y 22.9%, con un promedio de 18.1%; el porcentaje de arena oscila entre 46.6% y 51.8%, con un promedio de 49.1%; mientras que la fracción de grava presenta valores entre 27.6% y 35.0%, con un promedio de 32.9%. Con base en esta distribución, el material se clasifica como SC: arena arcillosa con grava, de mediana plasticidad y color rojo-marrón, según el sistema de clasificación SUCS.

La presencia del componente arcilloso otorga cohesión y cierta plasticidad al suelo, aunque disminuye su ángulo de fricción interna respecto a arenas más limpias. Por otro lado, la fracción arenosa contribuye a una mejor capacidad portante en comparación con suelos predominantemente arcillosos. En conjunto, este tipo de material puede considerarse moderadamente adecuado para soportar cargas ligeras a medias, con deformaciones controladas; sin embargo, para condiciones de cargas dinámicas mayores, como el tránsito vehicular, requiere control estricto de humedad y, de ser necesario, estabilización o mejoramiento, a fin de asegurar un desempeño adecuado dentro de la estructura del pavimento.

3.2.5.2. Límites de consistencia de subrasante

Se determinaron los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) para las muestras de suelo extraídas de las once (11) calicatas, con el propósito de evaluar el grado de cohesión del material y su susceptibilidad a experimentar deformaciones volumétricas frente a variaciones de humedad.

En la Figura 170, Figura 171, Figura 172, Figura 173, Figura 174, Figura 175, Figura 176, Figura 177, Figura 178, Figura 179 y Figura 180 del Anexo 10, se presentan los resultados del ensayo, incluyendo el índice de plasticidad calculado para cada una de las muestras correspondientes a las calicatas.

Los valores obtenidos se consolidan en la Tabla 47:

Tabla 47.

Índice de plasticidad de las muestras de la subrasante

Calicata	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (IP)
C-1	37.9	22.5	15.5
C-2	32.3	16.0	16.3
C-3	36.1	19.7	16.4
C-4	32.2	16.0	16.2
C-5	32.1	16.0	16.1
C-6	32.0	16.1	15.9
C-7	33.7	18.1	15.6
C-8	29.7	14.0	15.7
C-9	29.9	14.0	15.9
C-10	34.2	18.3	15.9
C-11	34.5	18.1	16.4

Nota: Elaboración propia

El límite líquido de las muestras analizadas varió entre 29.7% y 37.9%, con un valor promedio de 33.2%; mientras que el límite plástico osciló entre 14.0% y 22.5%, con un promedio de 17.2%. El índice de plasticidad (IP) se mantuvo dentro de un rango estrecho, entre 15.5% y 16.4%, con un promedio de 16.0%.

La combinación de un límite líquido relativamente alto y un índice de plasticidad moderado indica que el suelo posee cohesión apreciable y una susceptibilidad significativa a cambios volumétricos cuando aumenta su contenido de humedad. Este comportamiento es típico de materiales areno-arcillosos con presencia de finos plásticos, consistente con la clasificación obtenida en el análisis granulométrico.

Los límites de Atterberg confirman que el suelo corresponde a un material de baja a moderada plasticidad, lo cual implica que, si bien muestra cierta estabilidad en estados

parcialmente saturados, puede experimentar reducción de resistencia y asentamientos diferenciales bajo condiciones de alta humedad o saturación.

3.2.5.3. Clasificación de suelos

En la Figura 170, Figura 171, Figura 172, Figura 173, Figura 174, Figura 175, Figura 176, Figura 177, Figura 178, Figura 179 y Figura 180 del Anexo 10 se presenta la clasificación del suelo correspondiente a cada una de las muestras obtenidas de las calicatas, determinada a partir de los resultados de los ensayos de granulometría y límites de consistencia.

Tabla 48.

Clasificación del suelo de las muestras de la subrasante

Calicata	Porcentaje Finos (%)	Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	Clasificación SUCS
C-1	22.9	37.9	15.5	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-2	19.0	32.3	16.3	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-3	20.6	36.1	16.4	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-4	18.4	32.2	16.2	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-5	18.7	32.1	16.1	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-6	18.5	32.0	15.9	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-7	15.4	33.7	15.6	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-8	16.3	29.7	15.7	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-9	16.4	29.9	15.9	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-10	16.3	34.2	15.9	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)
C-11	16.1	34.5	16.4	SC (Arena arcillosa con grava de mediana plasticidad)

Nota: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados consolidados en la Tabla 48, el material de subrasante se clasifica como SC: Arena arcillosa con grava, de mediana plasticidad, según el sistema de clasificación SUCS. Esta clasificación refleja un suelo con componente cohesivo significativo y susceptibilidad moderada a deformaciones cuando se encuentra sometido a cargas y variaciones de humedad, lo cual coincide con los comportamientos identificados en los análisis granulométricos y en los límites de Atterberg.

3.2.5.4. Máxima Densidad Seca de la Subrasante

Se determinó la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad del suelo de subrasante correspondiente a las once (11) calicatas. Este ensayo permitió establecer las condiciones óptimas de compactación del material.

En la Figura 181, Figura 182, Figura 183, Figura 184, Figura 185, Figura 186, Figura 187, Figura 188, Figura 189, Figura 190 y Figura 191 del Anexo 11 se presentan los procedimientos y cálculos realizados para obtener la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad de cada una de las muestras evaluadas.

Los valores consolidados derivados del ensayo Proctor se muestran en la Tabla 49:

Tabla 49.

Máxima Densidad Seca del suelo de las muestras de la subrasante

Calicata	Máxima Densidad Seca (g/cm ³)	Contenido Óptimo de Humedad (%)
C-1	1.80	13.0
C-2	1.89	11.3
C-3	1.82	12.5
C-4	1.89	11.0
C-5	1.89	11.4
C-6	1.92	11.1
C-7	1.88	12.4
C-8	1.95	10.5
C-9	1.96	10.8
C-10	1.83	12.2
C-11	1.88	12.3

Nota: Elaboración propia

Los valores de máxima densidad seca obtenidos en las muestras oscilaron entre 1.80 g/cm³ y 1.96 g/cm³, con un promedio de 1.88 g/cm³. Estos resultados son consistentes con la naturaleza areno-arcillosa del suelo, en el cual el contenido de finos identificado previamente aporta cohesión y favorece una estructura relativamente densa, aunque sin alcanzar valores propios de materiales más granulares.

El contenido óptimo de humedad presentó valores entre 10.5% y 13.0%, con un promedio de 11.7%, lo que evidencia que el suelo requiere una cantidad apreciable de humedad para alcanzar su máxima densidad seca. Este comportamiento es característico de los suelos SC (arena arcillosa con grava), cuyos procesos de compactación dependen significativamente del agua para lograr el reacomodo adecuado de partículas y la reducción del aire intersticial.

3.2.5.5. CBR de la subrasante

Se evaluó la capacidad portante del suelo de subrasante mediante la determinación del CBR al 100% y al 95% de la Máxima Densidad Seca (MDS) obtenida en el ensayo Proctor Modificado.

En la Figura 192, Figura 193, Figura 194, Figura 195, Figura 196, Figura 197, Figura 198, Figura 199, Figura 200, Figura 201 y Figura 202 del Anexo 12; se presentan los cálculos realizados para la obtención del CBR correspondiente a cada una de las muestras provenientes de las once (11) calicatas.

Los valores obtenidos del ensayo CBR se resumen en la Tabla 50:

Tabla 50.

CBR del suelo de las muestras de la subrasante

Calicata	CBR al 100% de MDS (%)	CBR al 95% de MDS (%)
C-1	8.54	5.60
C-2	8.54	6.10
C-3	8.18	5.70
C-4	8.07	6.10
C-5	8.23	6.10
C-6	8.10	6.10
C-7	7.19	5.90
C-8	7.45	6.30
C-9	8.86	6.30
C-10	8.42	5.90
C-11	8.22	5.90

Nota: Elaboración propia

Los valores de CBR al 100% de la MDS variaron entre 7.19% y 8.86%, con un promedio de 8.16%; mientras que el CBR al 95% de la MDS osciló entre 5.60% y 6.30%, con un promedio de 6.00%. La reducción entre ambos valores evidencia únicamente la pérdida natural de capacidad portante asociada a una compactación menor, manteniéndose en todo caso valores bajos para una subrasante.

Las calicatas con mayor contenido de finos y menor máxima densidad seca fueron las que presentaron los valores más bajos de CBR, constituyendo los sectores más críticos del tramo evaluado.

El comportamiento general del material confirma una capacidad portante limitada, incluso bajo compactación óptima, coherente con su clasificación como arena arcillosa con grava de mediana plasticidad (SC).

3.2.5.6. CBR de diseño

Para la determinación del CBR de diseño, se empleó el enfoque no paramétrico basado en percentiles, también conocido como método de percentiles, el cual es recomendado cuando se dispone de un conjunto limitado de datos y se busca un valor representativo con nivel de confiabilidad.

En primer lugar, los once (11) valores de CBR obtenidos fueron ordenados de manera ascendente. Posteriormente, se asignó a cada valor su percentil correspondiente, permitiendo caracterizar la distribución estadística del parámetro. Con esta información, se procedió a construir la curva en “S” del percentil versus CBR (%), obteniendo así la curva de comportamiento mostrada en la Figura 40.

Tabla 51.

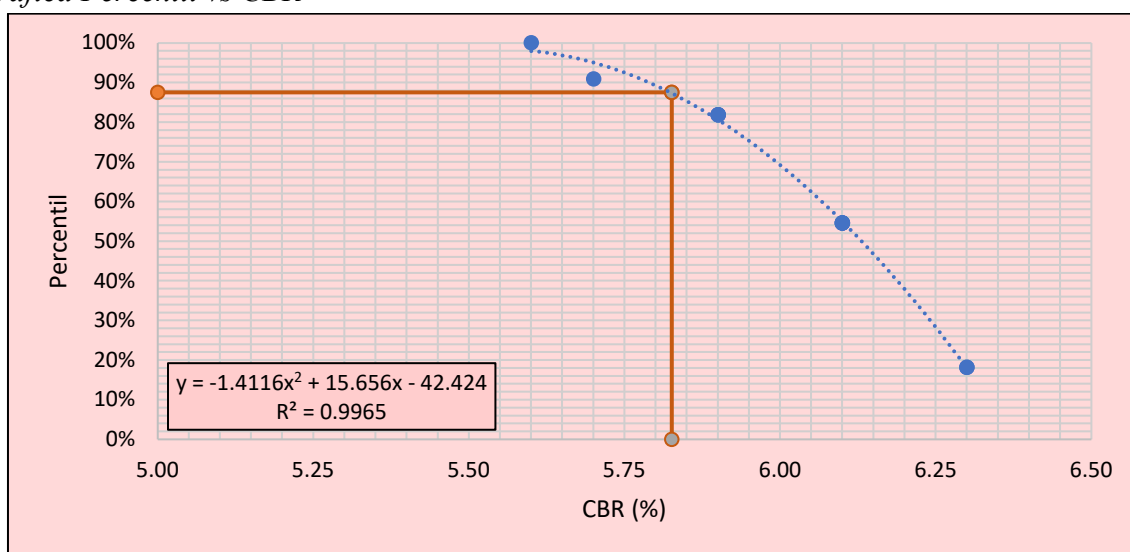
Percentil correspondiente a los CBR calculados

Calicata	CBR al 95% de MDS (%)	Percentil
C-1	5.60	100%
C-3	5.70	91%
C-7	5.90	82%
C-10	5.90	82%
C-11	5.90	82%
C-2	6.10	55%
C-4	6.10	55%
C-5	6.10	55%
C-6	6.10	55%
C-8	6.30	18%
C-9	6.30	18%

Nota: Elaboración propia

Figura 40.

Gráfica Percentil vs CBR



Nota: Elaboración propia

Considerando que el ESALs proyectado es de 1.8×10^7 (ver Ítem 3.2.8), el percentil que corresponde según los lineamientos establecidos por el MTC es el percentil 87.5%. Este percentil se emplea para seleccionar un valor de CBR representativo con un nivel de confiabilidad adecuado frente a las exigencias del tránsito estimado, garantizando que el diseño del pavimento se base en un parámetro conservador y compatible con las condiciones reales de operación de la vía.

Tabla 52.

Percentil de diseño de subrasante

Nivel de Tránsito (ESALs)	Percentil de diseño de sub rasante
104	60.00
Entre 10^4 y 10^6	75.00
Mayor a 10^6	87.50

Nota: Elaboración propia

El valor obtenido para el percentil 87.5% corresponde a un CBR de 5.83%. Sin embargo, con el propósito de adoptar un criterio conservador en el marco del diseño estructural del pavimento, se estableció como CBR de diseño el valor de 5.8%.

$$CBR_{diseño} = 5.8\%$$

3.2.5.7. Cálculo del módulo de resiliencia

Para la estimación del módulo de resiliencia (MR) del suelo de subrasante, se empleó la correlación empírica basada en el valor del CBR de diseño, la cual es ampliamente utilizada en estudios de pavimentos cuando no se dispone de ensayos triaxiales cíclicos. La relación adoptada es:

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$$

Esta correlación permite obtener una aproximación del comportamiento elástico del material bajo cargas repetitivas.

Tabla 53.

MR del suelo de las muestras de la subrasante

Calicata	CBR al 95% de MDS (%)	MR (psi)
C-1	5.60	7695.40
C-2	6.10	8128.34
C-3	5.70	7783.07
C-4	6.10	8128.34
C-5	6.10	8128.34
C-6	6.10	8128.34
C-7	5.90	7956.76
C-8	6.30	8297.91
C-9	6.30	8297.91

Calicata	CBR al 95% de MDS (%)	MR (psi)
C-10	5.90	7956.76
C-11	5.90	7956.76

Nota: Elaboración propia

El módulo de resiliencia (MR) estimado mediante la correlación basada en el CBR presentó valores que oscilaron entre 8,400 psi y 9,452 psi, obteniéndose un promedio de 8,999.71 psi. Estos valores son consistentes con los niveles de rigidez típicos de suelos arenos-arcillosos de mediana plasticidad, cuya respuesta elástica bajo cargas repetitivas es limitada y coherente con la baja capacidad portante evidenciada en los ensayos CBR.

3.2.5.8. Resultados de propiedades de la subrasante

En la Tabla 54 se presentan los valores promedio de las propiedades evaluadas del suelo de subrasante, los cuales fueron empleados en el diseño estructural del pavimento. El uso de promedios fue técnicamente viable debido a la homogeneidad del suelo, determinada mediante el análisis de variabilidad mostrado en la Tabla 55, el cual se evaluó con base en el siguiente criterio:

- CV bajo (<10%): datos homogéneos, baja variabilidad.
- CV moderado (10% – 20%): variabilidad aceptable según el contexto.
- CV alto (>20%): variabilidad elevada, posible heterogeneidad del material.

El coeficiente de variación (CV) expresa la dispersión relativa de los datos respecto a su promedio y se calculó como el cociente entre la desviación estándar y el valor promedio, expresado en porcentaje.

Los resultados obtenidos evidenciaron lo siguiente:

- El porcentaje de finos presentó un CV de 12.60%, lo que indica variabilidad baja-moderada y una granulometría razonablemente homogénea.
- El índice de plasticidad (IP) registró un CV de 1.96%, reflejando muy baja variabilidad y alta uniformidad en las características cohesivas del material.
- La máxima densidad seca mostró el CV más bajo, con un valor de 2.66%, evidenciando altísima consistencia en las condiciones de compactación del suelo.
- El CBR al 95% de la MDS presentó un CV de 3.73%, lo que confirma una variabilidad baja en la capacidad portante del material dentro del tramo analizado.

En conjunto, los valores obtenidos muestran una dispersión reducida y un comportamiento uniforme del suelo de subrasante, por lo que el uso de promedios estadísticos resultó adecuado y representativo para el diseño del pavimento.

Tabla 54.*Resultados promedio de las muestras de la subrasante*

Calicata	Porcentaje Finos (%)	Índice de Plasticidad (%)	Máxima Densidad Seca (g/cm ³)	CBR al 95% de MDS (%)
C-1	22.9	15.5	1.80	5.60
C-2	19.0	16.3	1.89	6.10
C-3	20.6	16.4	1.82	5.70
C-4	18.4	16.2	1.89	6.10
C-5	18.7	16.1	1.89	6.10
C-6	18.5	15.9	1.92	6.10
C-7	15.4	15.6	1.88	5.90
C-8	16.3	15.7	1.95	6.30
C-9	16.4	15.9	1.96	6.30
C-10	16.3	15.9	1.83	5.90
C-11	16.1	16.4	1.88	5.90
Promedio	18.06	16.00	1.88	5.8*

*Nota: *Este valor corresponde al valor de diseño, mas no al promedio*

Tabla 55.*Variabilidad de las características del suelo*

Ensayo	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Porcentaje Finos (%)	18.06	2.28	12.60%
Índice de Plasticidad (%)	16.00	0.31	1.96%
Máxima Densidad Seca (g/cm ³)	1.88	0.05	2.66%
CBR al 95% de MDS (%)	8.16	0.48	5.89%

Nota: Elaboración propia

3.2.6. Caracterización de material granular de cantera

El material granular empleado en la presente investigación proviene de la cantera de Chihuaco, ubicada aproximadamente a 3.5 km al sureste del centro urbano de Sicuani. Dicha cantera constituye una fuente local de abastecimiento de agregados para la conformación de capas granulares en pavimentos dentro del área de estudio. En ese sentido, se realizó una caracterización integral del material extraído, con la finalidad de evaluar su comportamiento físico-mecánico y determinar su posible aplicación en capas de subbase y base.

Para ello, se ejecutaron ensayos de laboratorio orientados a determinar su granulometría, límites de consistencia, máxima densidad seca, contenido óptimo de humedad, capacidad de soporte (CBR) y clasificación de suelos, a fin de contar con un diagnóstico general del material granular natural disponible en la zona.

3.2.6.1. Evaluación físico-mecánica del material granular convencional

Con el propósito de disponer de un material de referencia representativo del entorno local, se evaluaron tres muestras obtenidas directamente de la cantera de Chihuaco. Los

ensayos se realizaron conforme a las normas técnicas correspondientes, incluyendo granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR y clasificación SUCS/AASHTO.

Los resultados obtenidos muestran que el material presenta una fracción fina de naturaleza arcillosa, con plasticidad moderada, densidad seca máxima promedio de 2.05 g/cm³, humedad óptima promedio de 8.05 % y un CBR promedio de 30.58 %. Asimismo, fue clasificado como SC según SUCS y A-2-6(0) según AASHTO. Estos resultados permiten identificar que se trata de un material granular natural de calidad intermedia, representativo de la cantera estudiada.

Los resultados obtenidos presentados en el Anexo 13, Anexo 14 y Anexo 15 se consolidan en la Tabla 56:

Tabla 56.

Resumen de resultados del material granular de cantera ensayado

Ensayo	Resultados de ensayos en material granular			
	Talud T-1 M-1	Talud T-1 M-2	Talud T-1 M-3	Promedio
Limite Líquido (LL)	31.2%	32.2%	30.6%	31.33%
Limite Plástico (LP)	18.1%	17.6%	18.2%	17.97%
Índice de Plasticidad (IP)	13.1%	14.6%	12.4%	13.37%
Densidad seca máxima	2.04 g/cm ³	2.07 g/cm ³	2.03 g/cm ³	2.05%
Humedad óptima	7.96%	8.96%	7.23%	8.05%
CBR (95% Proc. Mod.)	31.26%	30.35%	30.14%	30.58%
SUCS	SC	SC	SC	SC
AASHTO	A-2-6(0)	A-2-6(0)	A-2-6(0)	A-2-6(0)

Nota: Elaboración propia

3.2.6.2. Evaluación del material granular frente a su posible uso en subbase y base

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización físico-mecánica del material granular proveniente de la cantera de Chihuahua, se efectuó su comparación con los requisitos establecidos en la normativa vigente para capas de subbase y base granular. El análisis evidenció que el material presenta un comportamiento estructural intermedio, debido a que alcanza una capacidad de soporte compatible con el nivel mínimo exigido para una capa de subbase, pero no satisface las condiciones requeridas para su empleo como base granular.

En ese sentido, para efectos del diseño estructural del pavimento, se adoptó un CBR de diseño igual a 30 % para la capa de subbase, tomando como referencia el valor promedio obtenido en laboratorio y considerando un criterio conservador de diseño. Esta elección responde a que la subbase cumple principalmente la función de estrato de transición y distribución de cargas hacia la subrasante, por lo que sus exigencias mecánicas son menores en comparación con la capa de base. Asimismo, la adopción de este valor se sustenta en los

criterios establecidos por la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos, en la cual se consideran parámetros mínimos de soporte para materiales granulares empleados como subbase. Por ello, el valor de CBR = 30 % fue asumido como representativo para esta capa, permitiendo reflejar adecuadamente su menor resistencia relativa respecto a la base y manteniendo coherencia con la función estructural que cumple dentro del sistema de pavimento.

No obstante, esta condición no resulta suficiente para considerar al material como apto para base granular. Esta diferencia se explica principalmente por dos aspectos: primero, la presencia de finos plásticos, que incrementa el índice de plasticidad y afecta negativamente la estabilidad del material frente a variaciones de humedad; y segundo, el valor de CBR obtenido, que, aun siendo admisible como referencia de diseño para una subbase, resulta insuficiente para una capa de base, donde las exigencias estructurales son mayores debido a su rol predominante en la transmisión de esfuerzos hacia la subrasante.

En consecuencia, el material de cantera puede ser entendido como un material granular natural de calidad intermedia, con desempeño referencial para subbase, pero no apto para su utilización directa como base sin tratamiento, estabilización o mejoramiento previo. Esta precisión resulta fundamental dentro de la lógica de la investigación, ya que permite diferenciar claramente el nivel de exigencia de cada capa dentro del pavimento y sustentar técnicamente por qué el material granular convencional disponible en la zona no responde adecuadamente a las condiciones requeridas para una base.

Bajo esta premisa, y considerando que la presente investigación se orienta al análisis del reemplazo del material granular en la capa estructural más exigente del pavimento flexible, el estudio se centra en la base del pavimento. Ello se justifica porque es precisamente en esta capa donde el material natural local presenta sus mayores limitaciones técnicas, constituyéndose así en el punto más crítico de la estructura y, por tanto, en el escenario más pertinente para evaluar la incorporación del material celular ligero como alternativa de reemplazo. En consecuencia, el material granular convencional se adopta como referencia comparativa del comportamiento tradicional, mientras que el material celular ligero es estudiado como propuesta de mejora a nivel de base, donde su aporte estructural puede resultar más significativo.

3.2.6.3. Determinación de la capa de base como unidad de estudio

El comportamiento de la capa de base depende principalmente de la calidad del material granular y de su capacidad mecánica para distribuir las cargas hacia los estratos inferiores. Por ello, cualquier deficiencia en sus propiedades físico-mecánicas impacta directamente en la vida útil y el desempeño estructural del pavimento flexible.

Los resultados obtenidos demuestran que el material granular proveniente de la Cantera de Chihuaco no cumple con los requisitos establecidos en la norma CE.010 Pavimentos Urbanos para su uso como base granular, debido a su elevada plasticidad, la presencia de fines arcillosos, y su baja capacidad de soporte, evidenciada por un CBR promedio de 30.58%, muy por debajo del mínimo exigido ($\geq 100\%$).

En el distrito de Sicuani, esta situación refleja una problemática recurrente: la capa de base es la que presenta mayor variabilidad granulométrica, altos contenidos de finos plásticos, índices de plasticidad elevados y CBR reducidos, debido a la disponibilidad limitada de materiales de mejor calidad. Esto obliga, en la práctica, a ejecutar procesos de mezcla, selección o estabilización, incrementando costos y generando variaciones que afectan la uniformidad del diseño estructural del pavimento.

A nivel funcional, la base constituye una capa de transición y drenaje, cuya misión es proporcionar rigidez, distribuir esfuerzos y permitir el adecuado funcionamiento de la estructura. Por otro lado, la carpeta asfáltica depende casi exclusivamente de las propiedades de la mezcla bituminosa, y no de parámetros geotécnicos como el CBR. En ese sentido, la capa de base resulta la unidad más adecuada para realizar un análisis comparativo del comportamiento de los materiales utilizados en la zona.

Bajo este criterio, en la presente investigación se seleccionó la capa de base como unidad de estudio para establecer una comparación experimental entre el material granular tradicional y un material alternativo: el Material Celular Ligero (MCL). Dado que el desempeño del MCL es sensible a variables como resistencia mecánica, rigidez y calidad granulométrica, su análisis dentro de la capa de base permite evaluar sus ventajas, limitaciones y aportes potenciales para el diseño de pavimentos flexibles en zonas con disponibilidad limitada de agregados de buena calidad.

Si bien los ensayos realizados en campo arrojaron un CBR promedio de 21.37 % para el material granular convencional, para efectos del análisis comparativo se adoptó un CBR de diseño igual a 100 %. Este valor se justifica metodológicamente porque representa el mejor comportamiento posible de un material granular normado, conforme a los criterios de la normativa AASHTO y del Manual de Carreteras del MTC, que establece que una base granular debe estar compuesta por un material seleccionado, bien graduado y compactado bajo procedimientos de control, cuyos ensayos de laboratorio frecuentemente reportan valores cercanos o superiores a ese nivel.

La estandarización del CBR al 100 % permite definir una línea base homogénea para comparar el desempeño del MCL frente a un material idealizado de referencia, evitando que la baja calidad de las canteras locales sesgue el análisis.

Para los posteriores cálculos y análisis se utilizó, además, una correlación empírica entre el CBR y la resistencia a la compresión no confinada (UCS) del suelo, expresada en kg/cm². Debido a que la conversión directa entre ambos parámetros no es física, la estimación se realizó con base en correlaciones derivadas de ensayos paralelos de CBR y compresión no confinada (UCS) desarrolladas por Gregory & Cross (2007) en su investigación “*Correlation of California Bearing Ratio with Shear Strength Parameters*”.

La ecuación propuesta por dichos autores es:

$$UCS_{(kg/cm^2)} \approx 0.0217 \times CBR^{1.097}$$

Por lo tanto, considerando un CBR de diseño igual a 100 %, la resistencia a la compresión resulta:

$$UCS_{(kg/cm^2)} \approx 0.0217 \times 100^{1.097}$$

$$UCS_{(kg/cm^2)} \approx 3.392$$

3.2.7. Obtención de material celular ligero

Para la elaboración del Material Celular Ligero (MCL) se emplearon los siguientes insumos fundamentales: cemento portland, agua, agente espumante y, de forma adicional, aditivos plastificantes y/o acelerantes. Cada uno de estos componentes debió cumplir requisitos específicos de calidad para evitar alteraciones en el comportamiento reológico, la estabilidad de la espuma y la densidad objetivo del MCL durante su producción.

3.2.7.1. Diseño de mezcla de material celular ligero

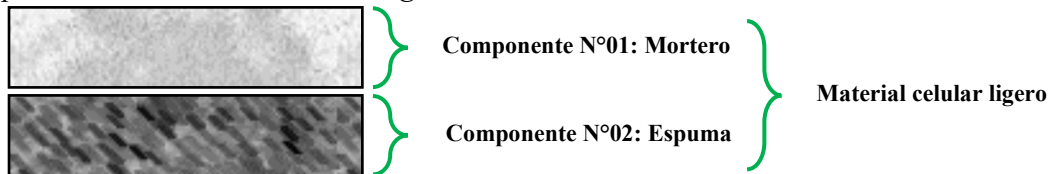
Para la dosificación de los componentes utilizados en la fabricación del Material Celular Ligero, se emplearon relaciones matemáticas derivadas a partir de una densidad objetivo previamente establecida. Este enfoque permite ajustar la proporción de espuma, agua y cemento en función del comportamiento deseado del material.

Partiendo de una densidad de diseño conocida y considerando un volumen patrón de 1 m³, se formuló la dosificación bajo la premisa fundamental de mantener un equilibrio entre: el volumen de pasta cementicia, el volumen de espuma generada, la masa de cemento necesaria, el contenido de agua para lograr la fluidez requerida, y la conservación de la densidad final deseada del MCL.

Esta metodología permite obtener un diseño de mezcla que asegure estabilidad volumétrica, uniformidad de burbuja, comportamiento mecánico repetible y compatibilidad con las condiciones del ensayo experimental.

Figura 41.

Composición del material celular ligero:



Nota: Elaboración propia

A partir de la esquematización planteada y aplicando la ley de conservación de masas y volúmenes, se establece que el volumen total de la mezcla es igual a la suma del volumen del mortero base y el volumen de la espuma generada. De manera análoga, la masa total del material celular ligero se obtiene como la suma de la masa del mortero y la masa asociada a la espuma.

$$V_T = V_M + V_E$$

Donde:

V_T : Volumen total (m^3)

V_M : Volumen de mortero (m^3)

V_E : Volumen de espuma (m^3)

$$m_T = m_M + m_E$$

Donde:

m_T : Masa total (kg)

m_M : Masa de mortero (kg)

m_E : Masa de espuma (kg)

Posteriormente se recurre a la ecuación de:

$$V = m/\rho$$

Donde:

m : Masa (kg)

ρ : Densidad (kg/m^3)

V : Volumen (m^3)

Y se reemplaza la ecuación N°02:

$$m_T = \rho_M \cdot V_M + \rho_E \cdot V_E$$

$$\rho_T = \rho_M \cdot V_M + \rho_E \cdot V_E$$

$$\rho_T = \rho_M \cdot V_M + \rho_E \cdot (1 - V_M)$$

$$\rho_T = \rho_M \cdot V_M + \rho_E - \rho_E \cdot V_M$$

$$V_M = \frac{\rho_T - \rho_E}{\rho_M - \rho_E}$$

Con la ecuación obtenida a partir del principio de conservación de masa y volumen, fue posible calcular el volumen correspondiente a cada uno de los componentes que conforman el Material Celular Ligero (MCL). Para ello se utilizaron como datos de entrada: la densidad objetivo del MCL, la densidad del mortero base, y la densidad de la espuma, la cual se mantuvo en el rango de 70 a 80 kg/m³ para garantizar la estabilidad de la mezcla, evitando el colapso prematuro de las burbujas y preservando la uniformidad del material.

A partir de estos parámetros, se determinó el volumen de mortero requerido para producir 1 m³ de MCL para cada una de las densidades de estudio. De igual manera, se estableció el volumen complementario de espuma, de modo que la suma de ambos cumpliera la densidad final deseada del material.

Para el primer espécimen, correspondiente a un MCL con densidad objetivo de 400 kg/m³, y considerando una densidad teórica del mortero de 1700 kg/m³ y una densidad de espuma de 70 kg/m³, se obtiene lo siguiente:

$$V_M = \frac{\rho_T - \rho_E}{\rho_M - \rho_E}$$

$$V_M = \frac{400 - 70}{1700 - 70}$$

$$V_M = 0.202 \text{ m}^3$$

Para determinar el volumen de espuma requerido, se utilizó directamente la ecuación fundamental de conservación de masas y volúmenes, obteniéndose el valor correspondiente al despejar el volumen de espuma en función de la densidad objetivo, la densidad del mortero y la densidad de la espuma. Así, se obtuvo que:

$$V_E = V_T - V_M$$

$$V_E = 1 - V_M$$

$$V_E = 0.798 \text{ m}^3$$

Una vez determinados los volúmenes correspondientes al mortero y a la espuma, se procedió a calcular la masa asociada a cada uno de estos componentes. Para ello, ambos volúmenes fueron multiplicados por sus respectivas densidades teóricas, obteniéndose las masas necesarias para alcanzar la densidad final de diseño del Material Celular Ligero. De esta manera, se obtuvo lo siguiente:

$$m_M = \rho_M \cdot V_M$$

$$m_M = 1700 \text{ kg/m}^3 \times 0.202 \text{ m}^3$$

$$m_M = 344.17 \text{ kg}$$

$$m_E = \rho_E \cdot V_E$$

$$m_E = 70 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.798 \text{m}^3$$

$$m_E = 55.83 \text{ kg}$$

En base a las recomendaciones del ACI 211.1, las relaciones agua/cemento para concretos estructurales suelen variar en un rango aproximado de 0.40 a 0.60, dependiendo de la resistencia requerida y condiciones de exposición. Sin embargo, para concretos de mayor desempeño y menor porosidad, se recomienda el uso de relaciones A/C menores a 0.40.

Asimismo, el ACI 523R, enfocado en concretos celulares, señala que la resistencia del material depende significativamente de la densidad y de la relación agua/cemento de la matriz, recomendando el uso de relaciones bajas para mejorar la estabilidad y resistencia del material.

En ese contexto, se seleccionó una relación A/C = 0.35, valor que se encuentra por debajo del límite recomendado de 0.40, con la finalidad de obtener una matriz cementante más densa, reducir la porosidad y compensar la disminución de resistencia ocasionada por la incorporación de aire en el material celular ligero.

$$m_M = m_{\text{cemento}} + m_{AG}$$

$$m_M = m_{\text{cemento}} + 0.35 \times m_{\text{cemento}}$$

$$m_C = \frac{m_M}{1 + 0.35 + 2.00}$$

$$m_C = \frac{m_M}{1 + 0.35}$$

$$m_C = \frac{341.97}{1 + 0.35}$$

$$m_{\text{Cemento}} = 254.94 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{Agua}} = 89.23 \text{ Kg}$$

En cuanto a los insumos requeridos para la generación de la espuma, se empleó una relación agua–agente espumante de 15:1 (relación que se consiguió de manera experimental), cumpliendo con las especificaciones necesarias para obtener una espuma estable dentro del rango de densidad previsto (70–80 kg/m³), condición indispensable para asegurar la uniformidad y estabilidad volumétrica de la mezcla final.

$$m_{\text{Espumante}} = m_{AG} + m_{\text{Ag.Esp.}}$$

$$m_{\text{Espumante}} = 15 \cdot m_{\text{Ag.Esp.}} + m_{\text{Ag.Esp.}}$$

$$m_{\text{Espumante}} = 16 \cdot m_{\text{Ag.Esp.}}$$

$$m_{\text{Ag.Esp.}} = 3.49 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{AG}} = 52.34 \text{ Kg}$$

Finalmente, el resumen de materiales necesarios para elaborar 1 m³ de MCL con densidad objetivo de 400 kg/m³ se determina a partir de los volúmenes y masas calculados para el mortero y la espuma, obteniéndose la dosificación correspondiente para este primer caso:

Tabla 57.

Resumen de materiales para una densidad de 400 kg/m³

Dosificación de materiales para un MCL de 01m ³ y $\rho = 400\text{kg/m}^3$	
m_{cemento}	254.94 Kg
m_{agua}	89.23 Kg
m_{agente esp.}	3.49 Kg
m_{agua}	52.34 Kg

Nota: Elaboración propia

Siguiendo exactamente la misma metodología de diseño, y manteniendo las premisas utilizadas para el MCL de $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$, se procedió a desarrollar las dosificaciones para las densidades de $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, 600 kg/m^3 , 700 kg/m^3 y 800 kg/m^3 , obteniéndose así los valores consolidados para cada uno de los componentes del mortero y de la espuma, que serán presentados en el siguiente apartado.

Tabla 58.

Resumen de materiales para una densidad de 500 kg/m³

Dosificación de materiales para un MCL de 01m ³ y $\rho = 500\text{kg/m}^3$	
m_{cemento}	332.20 Kg
m_{agua}	116.27 Kg
m_{agente esp.}	3.22 Kg
m_{agua}	48.31 Kg

Nota: Elaboración propia

Tabla 59.

Resumen de materiales para una densidad de 600 kg/m³

Dosificación de materiales para un MCL de 01m ³ y $\rho = 600\text{kg/m}^3$	
m_{cemento}	409.45 Kg
m_{agua}	143.31 Kg
m_{agente esp.}	2.95 Kg
m_{agua}	44.29 Kg

Nota: Elaboración propia

Tabla 60.

Resumen de materiales para una densidad de 700 kg/m³

Dosificación de materiales para un MCL de 01m ³ y $\rho = 700\text{kg/m}^3$	
m_{cemento}	486.71 Kg
m_{agua}	170.35 Kg
m_{agente esp.}	2.68 Kg

Dosificación de materiales para un MCL de 01m ³ y $\rho = 700\text{kg/m}^3$	
m_{agua}	40.26 Kg

Nota: Elaboración propia

Tabla 61.

Resumen de materiales para una densidad de 800 kg/m³

Dosificación de materiales para un MCL de 01m ³ y $\rho = 800\text{kg/m}^3$	
m_{cemento}	563.96 Kg
m_{agua}	197.39 Kg
$m_{\text{agente esp.}}$	2.42 Kg
m_{agua}	36.23 Kg

Nota: Elaboración propia

3.2.7.2. Proceso de elaboración de muestras de MCL

La elaboración del material celular ligero (MCL) se realizó mediante un procedimiento controlado que permitió garantizar la homogeneidad del material, la estabilidad de la espuma y el cumplimiento de las densidades de diseño establecidas (400, 500, 600, 700 y 800 kg/m³). Este proceso comprende la preparación del aditivo espumógeno, la generación de espuma, la elaboración de la matriz cementante, el mezclado, el moldeo de especímenes y su respectivo curado.

3.2.7.2.1. Aditivo espumógeno empleado

Para la producción del MCL se utilizó un aditivo espumógeno de origen sintético, diseñado específicamente para la fabricación de concretos celulares. Este aditivo tiene la capacidad de generar espuma estable mediante la incorporación de aire en forma de microburbujas, permitiendo reducir la densidad del material sin comprometer su integridad estructural.

El aditivo presenta propiedades como alta capacidad de expansión, estabilidad de burbuja y compatibilidad con matrices cementantes, lo cual favorece la formación de una estructura homogénea de vacíos dentro del material. Asimismo, su uso permite un control adecuado de la densidad final del MCL. Las características técnicas específicas del aditivo, tales como densidad, rendimiento, etc., se detallan en el Anexo 16: Ficha técnica de agente espumante para hormigón celular.

3.2.7.2.2. Generación de espuma

El aditivo espumógeno fue preparado mediante su dilución en agua, siguiendo las recomendaciones del fabricante indicadas en la ficha técnica. Esta dilución permitió obtener una solución base adecuada para la generación de espuma. La proporción de dilución fue controlada cuidadosamente, ya que influye directamente en la calidad de la espuma generada,

específicamente en el tamaño de burbuja, estabilidad y uniformidad, factores determinantes en la densidad y comportamiento mecánico del MCL.

La solución del aditivo espumógeno previamente preparada fue sometida a un proceso de generación de espuma mediante la incorporación de aire en la solución, formando una espuma con microburbujas uniformes y estables., la espuma obtenida presenta una estructura ligera y homogénea, la cual es fundamental para la producción del MCL, ya que actúa como agente generador de vacíos dentro de la matriz cementante. Finalmente, se verificó visualmente la estabilidad de la espuma antes de su incorporación, asegurando que no presente colapso prematuro ni segregación.

3.2.7.2.3. Preparación de matriz cementante

Paralelamente, se preparó la matriz cementante utilizando cemento Portland y agua, conforme a las proporciones establecidas en el diseño de mezcla (ver sección 3.2.8.1). Dicha mezcla fue realizada hasta obtener una pasta homogénea, libre de grumos y con adecuada trabajabilidad, garantizando una correcta interacción con la espuma generada.

3.2.7.2.4. Incorporación de espuma y mezclado

La espuma generada fue incorporada progresivamente a la matriz cementante, realizando un mezclado controlado y de baja intensidad, con la finalidad de evitar la ruptura de las microburbujas. El proceso de mezclado continuó hasta lograr una distribución uniforme de la espuma dentro de la matriz, obteniéndose así el material celular ligero con la densidad deseada. Este paso es crítico, ya que una mezcla inadecuada puede provocar la pérdida de aire incorporado, afectando directamente las propiedades físicas y mecánicas del material.

3.2.7.2.5. Moldeo de especímenes de MCL

El material celular ligero fue colocado en moldes cilíndricos de dimensiones estándar (4" x 8"), previamente acondicionados, el llenado se realizó sin compactación mecánica, evitando la aplicación de vibración, ya que esto podría afectar la estructura interna del material al colapsar las burbujas de aire y posteriormente, se realizó el enrase de la superficie para asegurar uniformidad en las muestras.

3.2.7.2.6. Curado de especímenes

Las muestras fueron desmoldadas después de 48 horas y sometidas a un proceso de curado durante un periodo de 28 días en condiciones controladas. El curado permitió el adecuado desarrollo de las propiedades mecánicas del material, especialmente la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, parámetros los cuales serán de mucha importancia en el diseño posterior de pavimentos usando el MCL a nivel de base.

3.2.7.3. Ensayo de densidad de las muestras de MCL

Definidas las dosificaciones correspondientes a cada una de las densidades objetivo del Material Celular Ligero (MCL), se procedió a la ejecución del ensayo experimental en laboratorio. Este ensayo comprendió la elaboración de especímenes destinados al análisis detallado de las propiedades físicas y mecánicas del material.

Figura 42.

Determinación de la masa del material celular ligero



Nota: Elaboración propia

Para la fabricación de los especímenes, se siguieron rigurosamente las dosificaciones teóricas previamente calculadas. Cada mezcla fue moldeada en probetas cilíndricas (briquetas) con diámetro de 10 cm y altura de 20 cm, cumpliendo con las dimensiones estándar empleadas para evaluaciones de materiales cementicios no convencionales.

A partir de cada dosificación, se prepararon especímenes que fueron curados durante 28 días, periodo tras el cual se realizaron tres ensayos de densidad por cada tipo de MCL. Los valores obtenidos se promediaron para determinar la densidad real representativa de cada muestra, y así contrastarla con la densidad teórica proyectada en el diseño de mezcla.

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas siguientes, donde se detallan las densidades experimentales alcanzadas para cada una de las densidades objetivo del MCL considerado en esta investigación.

Tabla 62.

Densidad experimental para una densidad teórica de 400 kg/m³

$\rho_{Teórica}$ (Kg/m ³)	400.00	400.00	400.00
Masa (Kg)	0.717	0.748	0.694
Volumen (m ³)	0.0016	0.0016	0.0016
ρ_{Real} (Kg/m ³)	432.25	450.94	418.38

$\rho_{Final} (Kg/m^3)$	433.86
-------------------------	---------------

Nota: Elaboración propia

Tabla 63.

Densidad experimental para una densidad teórica de 500 kg/m³

$\rho_{Teórica} (Kg/m^3)$	500.00	500.00	500.00
Masa (Kg)	0.802	0.815	0.868
Volumen (m ³)	0.0016	0.0016	0.0016
$\rho_{Real} (Kg/m^3)$	483.49	491.33	523.28
$\rho_{Final} (Kg/m^3)$		499.37	

Nota: Elaboración propia

Tabla 64.

Densidad experimental para una densidad teórica de 600 kg/m³

$\rho_{Teórica} (Kg/m^3)$	600.00	600.00	600.00
Masa (Kg)	0.938	1.051	1.052
Volumen (m ³)	0.0016	0.0016	0.0016
$\rho_{Real} (Kg/m^3)$	565.48	633.60	634.20
$\rho_{Final} (Kg/m^3)$		611.09	

Nota: Elaboración propia

Tabla 65.

Densidad experimental para una densidad teórica de 700 kg/m³

$\rho_{Teórica} (Kg/m^3)$	700.00	700.00	700.00
Masa (Kg)	1.117	1.170	1.215
Volumen (m ³)	0.0016	0.0016	0.0016
$\rho_{Real} (Kg/m^3)$	673.39	705.34	732.47
$\rho_{Final} (Kg/m^3)$		703.73	

Nota: Elaboración propia

Tabla 66.

Densidad experimental para una densidad teórica de 800 kg/m³

$\rho_{Teórica} (Kg/m^3)$	800.00	800.00	800.00
Masa (Kg)	1.267	1.332	1.344
Volumen (m ³)	0.0016	0.0016	0.0016
$\rho_{Real} (Kg/m^3)$	763.82	803.00	810.24
$\rho_{Final} (Kg/m^3)$		792.35	

Nota: Elaboración propia

3.2.7.4. Ensayo de resistencia a la compresión

Para la determinación de la resistencia a la compresión del Material Celular Ligero (MCL), cada espécimen fue sometido a un proceso de curado estándar de 28 días, a fin de garantizar el desarrollo adecuado de las propiedades mecánicas del material. Cumplido dicho período, los cilindros fueron ensayados de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma ASTM C39/C39M.

Durante el ensayo, cada probeta fue colocada correctamente centrada en la máquina de compresión, aplicándose la carga axial de forma continua y uniforme hasta producir la falla. La carga máxima registrada al instante de la rotura (P_c) corresponde a la resistencia última del espécimen.

La resistencia a la compresión del MCL se calculó empleando la expresión:

$$f_c = \frac{P_c}{A}$$

Donde:

f_c : Resistencia a la compresión del MCL (kg/cm^2 o MPa)

P_c : Carga de rotura aplicada sobre el espécimen

A: Área transversal efectiva sobre la cual actúa la carga

El valor obtenido para cada probeta fue posteriormente promediado para obtener una resistencia representativa por cada densidad evaluada, permitiendo así establecer la relación entre densidad, comportamiento mecánico y desempeño estructural del material. Los cuales se muestran en la Tabla 67.

Figura 43.

Ensayo de resistencia a la compresión del MCL



Nota: Elaboración propia

Tabla 67.

Resistencia a la compresión del MCL

N°	Código de muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Densidad de muestra	Edad de ensayo	Dimensiones (cm)		Área	Fuerza Aplicada (KN)	Resistencia f_c ensayo		
						Diámetro	Altura			kg/cm^2	MPa	kg/cm^2
1	CL400-1	17/11/2024	15/12/2024	432.25	28	10.16	20.32	81.07	3.28	4.13	0.40	4.09

2	CL400-2	17/11/2024	15/12/2024	450.94	28	10.16	20.32	81.07	3.35	4.21	0.41	
3	CL400-3	17/11/2024	15/12/2024	418.38	28	10.16	20.32	81.07	3.12	3.92	0.38	
1	CL500-1	17/11/2024	15/12/2024	483.49	28	10.16	20.32	81.07	6.29	7.91	0.78	
2	CL500-2	17/11/2024	15/12/2024	491.33	28	10.16	20.32	81.07	6.37	8.01	0.79	7.99
3	CL500-3	17/11/2024	15/12/2024	523.28	28	10.16	20.32	81.07	6.39	8.04	0.79	
1	CL600-1	17/11/2024	15/12/2024	565.48	28	10.16	20.32	81.07	11.81	14.85	1.46	
2	CL600-2	17/11/2024	15/12/2024	633.60	28	10.16	20.32	81.07	11.92	14.99	1.47	15.02
3	CL600-3	17/11/2024	15/12/2024	634.20	28	10.16	20.32	81.07	12.10	15.22	1.49	
1	CL700-1	17/11/2024	15/12/2024	673.39	28	10.16	20.32	81.07	19.54	24.58	2.41	
2	CL700-2	17/11/2024	15/12/2024	705.34	28	10.16	20.32	81.07	19.75	24.84	2.44	24.86
3	CL700-3	17/11/2024	15/12/2024	732.47	28	10.16	20.32	81.07	20.01	25.17	2.47	
1	CL800-1	17/11/2024	15/12/2024	763.82	28	10.16	20.32	81.07	29.84	37.53	3.68	
2	CL800-2	17/11/2024	15/12/2024	803.00	28	10.16	20.32	81.07	29.79	37.47	3.68	37.56
3	CL800-3	17/11/2024	15/12/2024	810.24	28	10.16	20.32	81.07	29.95	37.67	3.70	

Nota: Elaboración propia

3.2.7.5. Determinación de las deformaciones en especímenes de MCL

La evaluación de las deformaciones en los especímenes de Material Celular Ligero (MCL) se realizó una vez completado el período de curado estándar de 28 días. Previo al ensayo, cada espécimen fue preparado, limpiado y acondicionado siguiendo los procedimientos técnicos establecidos, asegurando superficies adecuadas para la correcta instalación del sistema de medición.

Para el registro de las variaciones de longitud durante la aplicación de carga, se emplearon diales comparadores (LVDTs o deformímetros mecánicos), los cuales fueron colocados en posiciones estratégicas para capturar con precisión las deformaciones axiales inducidas. Durante el ensayo de compresión, y conforme se incrementaba la carga aplicada, los diales registraron las sucesivas lecturas de acortamiento del espécimen, permitiendo establecer la relación carga–deformación y, posteriormente, esfuerzo–deformación del material.

Las deformaciones registradas para cada espécimen, identificadas según su código correspondiente y asociadas a la densidad del MCL evaluado, se presentan en las tablas siguientes, las cuales permiten analizar el comportamiento mecánico del material bajo condiciones controladas.

Tabla 68.

Deformaciones para el MCL de 400 kg/m³

Nº	Código de muestra	Fecha de ensayo	Densidad de muestra	Edad de ensayo	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)	Fuerza Aplicada (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	DL (mm)	e
1	CL400-1	15/12/2024	432.25	28	10.2	20.3	81.07	1.48	1.86	0.18	0.073	0.00036
2	CL400-2	15/12/2024	450.94	28	10.2	20.3	81.07	1.50	1.89	0.19	0.074	0.00036

3	CL400-3	15/12/2024	418.38	28	10.2	20.3	81.07	1.39	1.74	0.17	0.070	0.00034
---	---------	------------	--------	----	------	------	-------	------	------	------	-------	---------

Nota: Elaboración propia

Tabla 69.

Deformaciones para el MCL de 500 kg/m³

Nº	Código de muestra	Fecha de ensayo	Densidad de muestra	Edad de ensayo	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)	Fuerza Aplicada (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	DL (mm)	e
1	CL500-1	15/12/2024	483.49	28	10.2	20.3	81.07	2.85	3.58	0.35	0.128	0.00063
2	CL500-2	15/12/2024	491.33	28	10.2	20.3	81.07	2.71	3.41	0.33	0.126	0.00062
3	CL500-3	15/12/2024	523.28	28	10.2	20.3	81.07	2.94	3.70	0.36	0.127	0.00063

Nota: Elaboración propia

Tabla 70.

Deformaciones para el MCL de 600 kg/m³

Nº	Código de muestra	Fecha de ensayo	Densidad de muestra	Edad de ensayo	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)	Fuerza Aplicada (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	DL (mm)	e
1	CL600-1	15/12/2024	565.48	28	10.2	20.3	81.07	5.42	6.82	0.67	0.218	0.00107
2	CL600-2	15/12/2024	633.60	28	10.2	20.3	81.07	5.50	6.92	0.68	0.215	0.00106
3	CL600-3	15/12/2024	634.20	28	10.2	20.3	81.07	5.53	6.96	0.68	0.209	0.00103

Nota: Elaboración propia

Tabla 71.

Deformaciones para el MCL de 700 kg/m³

Nº	Código de muestra	Fecha de ensayo	Densidad de muestra	Edad de ensayo	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)	Fuerza Aplicada (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	DL (mm)	e
1	CL700-1	15/12/2024	673.39	28	10.2	20.3	81.07	8.85	11.13	1.09	0.351	0.00173
2	CL700-2	15/12/2024	705.34	28	10.2	20.3	81.07	9.12	11.47	1.12	0.347	0.00171
3	CL700-3	15/12/2024	732.47	28	10.2	20.3	81.07	9.15	11.51	1.13	0.326	0.00160

Nota: Elaboración propia

Tabla 72.

Deformaciones para el MCL de 800 kg/m³

Nº	Código de muestra	Fecha de ensayo	Densidad de muestra	Edad de ensayo	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)	Fuerza Aplicada (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	DL (mm)	e
1	CL800-1	15/12/2024	763.82	28	10.2	20.3	81.07	12.94	16.28	1.60	0.471	0.00232
2	CL800-2	15/12/2024	803.00	28	10.2	20.3	81.07	13.54	17.03	1.67	0.465	0.00229
3	CL800-3	15/12/2024	810.24	28	10.2	20.3	81.07	13.62	17.13	1.68	0.464	0.00228

Nota: Elaboración propia

3.2.7.6. Obtención de gráficas esfuerzo deformación

Para la elaboración de las gráficas esfuerzo–deformación, se organizaron los datos obtenidos durante los ensayos de compresión, considerando: los esfuerzos correspondientes (calculados como carga sobre área), ubicados en el eje de las ordenadas y las deformaciones unitarias, obtenidas a partir de las variaciones de longitud registradas por los diales, representadas en el eje de las abscisas.

Con esta información se construyó la curva esfuerzo–deformación para cada una de las densidades evaluadas del Material Celular Ligero (MCL).

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente al espécimen de MCL con densidad $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$, obtenida a partir de los valores experimentales registrados:

Tabla 73.*Carga y deformación del MCL de 400 kg/m³-M1*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
0.48	0.06	0.024	0.00012
0.95	0.12	0.047	0.00023
1.01	0.12	0.050	0.00025
1.21	0.15	0.061	0.00030
1.48	0.18	0.073	0.00036
1.63	0.20	0.081	0.00040
1.98	0.24	0.099	0.00049
2.34	0.29	0.110	0.00054
2.85	0.35	0.140	0.00069
3.28	0.40	0.156	0.00077
3.22	0.40	0.160	0.00079

*Nota: Elaboración propia***Tabla 74.***Carga y deformación del MCL de 400 kg/m³-M2*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
0.52	0.06	0.026	0.00013
0.91	0.11	0.045	0.00022
1.11	0.14	0.053	0.00026
1.35	0.17	0.068	0.00033
1.50	0.19	0.074	0.00036
1.83	0.23	0.085	0.00042
2.01	0.25	0.099	0.00049
2.12	0.26	0.105	0.00052
2.75	0.34	0.131	0.00064
3.35	0.41	0.161	0.00079
3.27	0.40	0.165	0.00081

*Nota: Elaboración propia***Tabla 75.***Carga y deformación del MCL de 400 kg/m³-M3*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
0.55	0.07	0.028	0.00014
0.89	0.11	0.047	0.00023
1.15	0.14	0.058	0.00029
1.30	0.16	0.065	0.00032
1.39	0.17	0.070	0.00034
1.55	0.19	0.075	0.00037
2.21	0.27	0.105	0.00052
2.44	0.30	0.119	0.00059

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
3.02	0.37	0.149	0.00073
3.12	0.38	0.162	0.00080
3.10	0.38	0.162	0.00080

Nota: Elaboración propia

Figura 44.

Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 400 kg/m³



Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 76.

Carga y deformación del MCL de 500 kg/m³-M1

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
0.52	0.06	0.023	0.00011
1.25	0.15	0.056	0.00028
1.99	0.25	0.090	0.00044
2.45	0.30	0.111	0.00055
2.85	0.35	0.128	0.00063
3.25	0.40	0.140	0.00069
3.89	0.48	0.171	0.00084
4.56	0.56	0.191	0.00094
5.88	0.73	0.259	0.00127
6.29	0.78	0.283	0.00139
6.23	0.77	0.288	0.00142

Nota: Elaboración propia

Tabla 77.*Carga y deformación del MCL de 500 kg/m³-M2*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
0.81	0.10	0.037	0.00018
1.45	0.18	0.067	0.00033
1.78	0.22	0.083	0.00041
2.35	0.29	0.109	0.00054
2.71	0.33	0.126	0.00062
3.25	0.40	0.150	0.00074
3.85	0.47	0.179	0.00088
4.56	0.56	0.215	0.00106
5.81	0.72	0.275	0.00135
6.37	0.79	0.299	0.00147
6.31	0.78	0.301	0.00148

*Nota: Elaboración propia***Tabla 78.***Carga y deformación del MCL de 500 kg/m³-M3*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
0.43	0.05	0.019	0.00009
1.26	0.16	0.053	0.00026
1.84	0.23	0.079	0.00039
2.32	0.29	0.101	0.00050
2.94	0.36	0.127	0.00063
3.65	0.45	0.161	0.00079
4.21	0.52	0.195	0.00096
4.89	0.60	0.219	0.00108
5.46	0.67	0.241	0.00119
6.39	0.79	0.281	0.00138
6.25	0.77	0.289	0.00142

Nota: Elaboración propia

Figura 45.

Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 500 kg/m³



Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 79.

Carga y deformación del MCL de 600 kg/m³-M1

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
1.21	0.15	0.048	0.00024
2.50	0.31	0.100	0.00049
3.44	0.42	0.139	0.00068
4.56	0.56	0.181	0.00089
5.42	0.67	0.218	0.00107
6.49	0.80	0.261	0.00128
7.65	0.94	0.310	0.00153
8.43	1.04	0.350	0.00172
9.89	1.22	0.401	0.00197
11.81	1.46	0.482	0.00237
11.72	1.45	0.490	0.00241

Nota: Elaboración propia

Tabla 80.

Carga y deformación del MCL de 600 kg/m³-M2

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
1.54	0.19	0.050	0.00025
2.65	0.33	0.101	0.00050
3.56	0.44	0.136	0.00067
4.21	0.52	0.165	0.00081

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
5.50	0.68	0.215	0.00106
6.98	0.86	0.281	0.00138
7.99	0.99	0.312	0.00154
8.86	1.09	0.339	0.00167
9.89	1.22	0.381	0.00188
11.92	1.47	0.469	0.00231
11.79	1.45	0.473	0.00233

Nota: Elaboración propia

Tabla 81.

Carga y deformación del MCL de 600 kg/m³-M3

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
1.52	0.19	0.057	0.00028
2.65	0.33	0.102	0.00050
3.50	0.43	0.129	0.00063
4.75	0.59	0.182	0.00090
5.53	0.68	0.209	0.00103
7.25	0.89	0.279	0.00137
8.39	1.03	0.321	0.00158
9.65	1.19	0.371	0.00183
10.95	1.35	0.419	0.00206
12.10	1.49	0.462	0.00227
11.95	1.47	0.466	0.00229

Nota: Elaboración propia

Figura 46.

Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 600 kg/m³



Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 82.

Carga y deformación del MCL de 700 kg/m^3 -M1

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
2.25	0.28	0.090	0.00044
4.46	0.55	0.179	0.00088
5.89	0.73	0.229	0.00113
7.51	0.93	0.301	0.00148
8.85	1.09	0.351	0.00173
11.21	1.38	0.443	0.00218
14.63	1.80	0.591	0.00291
16.95	2.09	0.682	0.00336
18.77	2.32	0.728	0.00358
19.54	2.41	0.731	0.00360
19.46	2.40	0.738	0.00363

Nota: Elaboración propia

Tabla 83.

Carga y deformación del MCL de 700 kg/m^3 -M2

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
3.21	0.40	0.119	0.00059
5.17	0.64	0.201	0.00099
7.21	0.89	0.271	0.00133
8.11	1.00	0.305	0.00150
9.12	1.12	0.347	0.00171
12.55	1.55	0.481	0.00237
14.68	1.81	0.561	0.00276
15.93	1.96	0.609	0.00300
18.35	2.26	0.701	0.00345
19.75	2.44	0.749	0.00369
19.71	2.43	0.755	0.00372

Nota: Elaboración propia

Tabla 84.

Carga y deformación del MCL de 700 kg/m^3 -M3

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
3.20	0.39	0.112	0.00055
4.50	0.56	0.165	0.00081
6.50	0.80	0.236	0.00116
8.15	1.01	0.289	0.00142
9.15	1.13	0.326	0.00160
13.25	1.63	0.475	0.00234

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
15.84	1.95	0.569	0.00280
18.54	2.29	0.663	0.00326
19.66	2.43	0.699	0.00344
20.01	2.47	0.715	0.00352
19.90	2.45	0.719	0.00354

Nota: Elaboración propia

Figura 47.

Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 700 kg/m³



Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 85.

Carga y deformación del MCL de 800 kg/m³-M1

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
3.21	0.40	0.119	0.00059
5.74	0.71	0.210	0.00103
8.65	1.07	0.313	0.00154
10.78	1.33	0.389	0.00191
12.94	1.60	0.471	0.00232
16.55	2.04	0.611	0.00301
20.45	2.52	0.751	0.00370
25.66	3.17	0.909	0.00447
28.42	3.51	1.010	0.00497
29.84	3.68	1.060	0.00522
29.71	3.66	1.112	0.00547

Nota: Elaboración propia

Tabla 86.*Carga y deformación del MCL de 800 kg/m³-M2*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
3.56	0.44	0.126	0.00062
6.89	0.85	0.239	0.00118
9.51	1.17	0.329	0.00162
12.13	1.50	0.419	0.00206
13.54	1.67	0.465	0.00229
17.77	2.19	0.606	0.00298
20.98	2.59	0.716	0.00352
25.66	3.17	0.901	0.00443
28.64	3.53	0.991	0.00488
29.79	3.67	1.033	0.00508
29.71	3.66	1.073	0.00528

*Nota: Elaboración propia***Tabla 87.***Carga y deformación del MCL de 800 kg/m³-M3*

Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	ΔL (mm)	Def. Unitaria
0.00	0.00	0.000	0.00000
4.20	0.52	0.141	0.00069
6.50	0.80	0.223	0.00110
10.15	1.25	0.351	0.00173
12.50	1.54	0.421	0.00207
13.62	1.68	0.464	0.00228
18.65	2.30	0.634	0.00312
22.46	2.77	0.771	0.00379
26.89	3.32	0.921	0.00453
29.22	3.60	0.993	0.00489
29.95	3.69	1.026	0.00505
29.90	3.69	1.049	0.00516

Nota: Elaboración propia

Figura 48.

Gráfica esfuerzo-deformación del MCL 800 kg/m³



Nota: Elaboración propia

3.2.7.7. Determinación del módulo de elasticidad

Para la estimación del módulo de elasticidad del Material Celular Ligero (MCL), se aplicó el criterio establecido por la norma ACI 318-19, la cual señala que el módulo elástico se define como la pendiente de la línea recta secante trazada entre: el punto correspondiente a esfuerzo nulo, y el punto asociado al 45 % de la resistencia a la compresión del material, empleando la curva esfuerzo–deformación obtenida para cada espécimen.

Bajo este criterio, el módulo elástico se determina mediante la pendiente de la recta secante entre los puntos seleccionados, de acuerdo con la expresión:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

El valor resultante de esta pendiente representa el módulo de elasticidad, el cual es adecuado para materiales no convencionales como el MCL, cuyo comportamiento no es estrictamente lineal. Aplicando este procedimiento a las curvas esfuerzo–deformación generadas experimentalmente, se obtuvieron los módulos elásticos correspondientes a cada densidad evaluada. A continuación, se presenta el valor determinado para el espécimen con densidad $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$:

Tabla 88.

Módulo de elasticidad para el MCL de 400 kg/m³

ACI 318-19	$E_{45\%}$	504	MPa
	$E_{45\%}$	5139.37	Kgf/cm ²

Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 89.

Módulo de elasticidad para el MCL de 500 kg/m³

ACI 318-19	$E_{45\%}$	559	MPa
	$E_{45\%}$	5700.21	Kgf/cm ²

Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 90.

Módulo de elasticidad para el MCL de 600 kg/m³

ACI 318-19	$E_{45\%}$	642	MPa
	$E_{45\%}$	6546.58	Kgf/cm ²

Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 91.

Módulo de elasticidad para el MCL de 700 kg/m³

ACI 318-19	$E_{45\%}$	665	MPa
	$E_{45\%}$	6781.11	Kgf/cm ²

Nota: Elaboración propia

Del espécimen de material celular ligero de $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$, se tiene:

Tabla 92.

Módulo de elasticidad para el MCL de 800 kg/m³

ACI 318-19	$E_{45\%}$	718	MPa
	$E_{45\%}$	7321.56	Kgf/cm ²

Nota: Elaboración propia

3.2.8. Cálculo de ESALs

El cálculo de los Ejes Equivalentes de 8.2 toneladas (ESALs) es una etapa necesaria para definir la configuración estructural del pavimento. Para este estudio se aplicó el método de Factor Camión, del cual el procedimiento se encuentra indicado en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC), asignando un periodo de diseño de 20 años.

De acuerdo con la normativa, no se consideran los vehículos ligeros porque su aporte a la degradación estructural del pavimento es insignificante en comparación con los vehículos pesados.

El cálculo se realizó utilizando las siguientes expresiones establecidas por el MTC:

$$N_{rep} \text{ de } EE_{8.2 \text{ Ton}} = \sum [EE_{dia-carril} \times F_{ca} \times 365]$$

$$EE_{dia-carril} = IMD p_i \times F_D \times F_C \times F_{V_{Pi}} \times F_P$$

El primer paso consistió en obtener el $F_{V_{Pi}}$, que representa la participación relativa de cada categoría de vehículo pesado dentro del tránsito total. Este valor se tomó directamente del

estudio de tráfico realizado con el dato del valor de IMD_{p_i} . A continuación, se seleccionó el Factor Camión (FC) de acuerdo con el Cuadro 6.3 del Manual de Carreteras, que proporciona los valores de ejes equivalentes (EE) de 8.2 t para cada tipo de vehículo pesado en:

Figura 49.

Cuadro 6.3 Relación de cargas por eje para determinar ejes equivalentes (EE) para afirmado, pavimentos flexibles y semirrígidos




Cuadro 6.3	
Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) Para Afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígidos	
Tipo de Eje	Eje Equivalente (EE _{8.2 ton})
Eje Simple de ruedas simples (EE _{S1})	$EE_{S1} = [P / 6.6]^{4.0}$
Eje Simple de ruedas dobles (EE _{S2})	$EE_{S2} = [P / 8.2]^{4.0}$
Eje Tandem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TA1})	$EE_{TA1} = [P / 14.8]^{4.0}$
Eje Tandem (2 ejes de ruedas dobles) (EE _{TA2})	$EE_{TA2} = [P / 15.1]^{4.0}$
Ejes Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TR1})	$EE_{TR1} = [P / 20.7]^{3.9}$
Ejes Tridem (3 ejes de ruedas dobles) (EE _{TR2})	$EE_{TR2} = [P / 21.8]^{3.9}$
P = peso real por eje en toneladas	

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Entonces de acuerdo a dichos ejes equivalentes y dependiendo del tipo de eje que se tiene según el vehículo analizado, se procedió de la siguiente manera:

Figura 50.

Factor Camión para un vehículo B-2

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Eje delantero	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)
			(1)	(2)	(3)	(4)	
B-2							13.20
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Simple		
		Tipo de ruedas	1RS	1RD			18.00
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	11.00			18.00
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{S1} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$			Factor Camión (F.C.)
FC			1.2654	3.2383			4.5037

Nota: Elaboración propia

Figura 51.

Factor Camión para un vehículo B3-1

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
			Eje delantero	(1)	(2)	(3)		(4)	
B3-1								14.00	
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tandem				
			Tipo de ruedas	1RS	1RD+1RS				
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	16.00				23.00	
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{S1} = \left(\frac{P}{14.8}\right)^4$				Factor Camión (F.C.)	
FC			1.2654	1.3659				2.6313	

Nota: Elaboración propia

Figura 52.

Factor Camión para un vehículo C2

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
			Eje delantero	(1)	(2)	(3)		(4)	
C2								12.30	
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Simple				
			Tipo de ruedas	1RS	1RD				
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	11.00				18.00	
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA1} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$				Factor Camión (F.C.)	
FC			1.2654	3.2383				4.5037	

Nota: Elaboración propia

Figura 53.

Factor Camión para un vehículo C3

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
			Eje delantero	(1)	(2)	(3)		(4)	
C3								13.20	
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tandem				
			Tipo de ruedas	1RS	2RD				
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	18.00				25.00	
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA2} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$				Factor Camión (F.C.)	
FC			1.2654	2.0192				3.2846	

Nota: Elaboración propia

Figura 54.

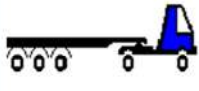


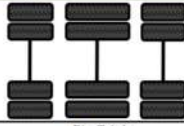
Factor Camión para un vehículo C4

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
			Eje delantero	(1)	(2)	(3)		(4)	
C4								13.20	
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tridem				
			Tipo de ruedas	1RS	2RD+1RS				
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	23.00				30.00	
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TR1} = \left(\frac{P}{20.7}\right)^{3.5}$				Factor Camión (F.C.)	
FC			1.2654	1.5082				2.7736	

Nota: Elaboración propia

Figura 55.

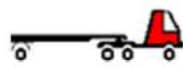



Factor Camión para un vehículo T2S3

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos		Eje delantero				Long. Máx. (m)
			(2)	(3)	(4)		
T2S3		Gráfica de ejes					20.50
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Simple	Eje Triple	
		Tipo de ruedas	1RS	1RD	3RD		
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	11.00	25.00		43.00
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	$EE_{TR2} = \left(\frac{P}{21.8}\right)^{3.9}$		Factor Camión (F.C.)
FC			1.2654	3.2383	1.7060		6.2097

Nota: Elaboración propia

Figura 56.

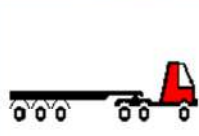


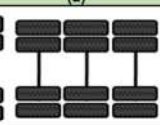
Factor Camión para un vehículo T3S1

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos		Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)
			(1)	(2)	(3)	(4)	
T3S1		Gráfica de ejes					20.50
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Tandem	
		Tipo de ruedas	1RS	2RD	1RD		
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	18.00	11.00		29.00
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA2} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$	$EE_{TA2} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$		Factor Camión (F.C.)
FC			1.2654	2.0192	0.2816		3.5662

Nota: Elaboración propia

Figura 57.






Factor Camión para un vehículo T3S3

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos		Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)
			(1)	(2)	(3)	(4)	
T3S3		Gráfica de ejes					20.50
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Tridem	
		Tipo de ruedas	1RS	2RD	3RD		
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	18.00	25.00		50.00
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA2} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$	$EE_{TR2} = \left(\frac{P}{21.8}\right)^{3.9}$		Factor Camión (F.C.)
FC			1.2654	2.0192	1.7060		4.9906

Nota: Elaboración propia

Figura 58.

Factor Camión para un vehículo C2R2

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos		Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)
			(1)	(2)	(3)	(4)	
C2R2		Gráfica de ejes					23.00
			Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Simple	Eje Simple	Eje Simple
		Tipo de ruedas	1RS	1RD	1RD	1RD	
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	11.00	11.00	11.00	40.00
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA1} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	Factor Camión (F.C.)
FC			1.2654	3.2383	3.2383	3.2383	10.9802

Nota: Elaboración propia

Figura 59.

Factor Camión para un vehículo C3R2

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Eje delantero	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
				(1)	(2)	(3)	(4)			
C3R2		Gráfica de ejes						23.00		
				Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple		Eje Simple	Peso bruto máximo (tn)
				Tipo de ruedas	1RS	2RD	1RD		1RD	
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	18.00	11.00	11.00	47.00			
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA1} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	Factor Camión (F.C.)			
FC			1.2654	2.0192	3.2383	3.2383	9.7612			

Nota: Elaboración propia

Figura 60.

Factor Camión para un vehículo C3R3

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Eje delantero	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
				(1)	(2)	(3)	(4)			
C3R3		Gráfica de ejes						23.00		
				Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Simple		Eje Tandem	Peso bruto máximo (tn)
				Tipo de ruedas	1RS	2RD	1RD		2RD	
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	18.00	11.00	18.00	54.00			
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TA1} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	$EE_{TA2} = \left(\frac{P}{15.1}\right)^4$	Factor Camión (F.C.)			
FC			1.2654	2.0192	3.2383	2.0192	8.5421			

Nota: Elaboración propia

Figura 61.

Factor Camión para un vehículo C4R2

Configuración Vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Gráfica de ejes	Eje delantero	Ejes Posteriores				Long. Máx. (m)		
				(1)	(2)	(3)	(4)			
C4R2		Gráfica de ejes						23.00		
				Tipo de ejes	Eje Simple	Eje Tridem	Eje Simple		Eje Tandem	Peso bruto máximo (tn)
				Tipo de ruedas	1RS	2RD+1RS	1RD		1RD	
Recuperada de la tabla de pesos y medidas del MTC			7.00	23.00	11.00	11.00	52.00			
Factor de eje equivalente (E.E.)			$EE_{S1} = \left(\frac{P}{6.6}\right)^4$	$EE_{TR1} = \left(\frac{P}{20.7}\right)^{2.9}$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	$EE_{S2} = \left(\frac{P}{8.2}\right)^4$	Factor Camión (F.C.)			
FC			1.2654	1.5082	3.2383	3.2383	9.2501			

Nota: Elaboración propia

Una vez determinados los ejes equivalentes para cada categoría vehicular según su tipología y configuración de ejes, se procedió a calcular el Factor de Corrección Estacional (F_{CE}). Este factor permite ajustar el flujo vehicular registrado durante una semana, de modo que represente el comportamiento anual del tránsito en la vía.

Para este cálculo se empleó la información proveniente de la unidad de peaje más cercana a la zona de estudio, en este caso el peaje Aguas Calientes, cuya base de datos incluye los factores de corrección estacional para vehículos ligeros y pesados.

Debido a que el conteo vehicular se realizó en el mes de octubre, se tomaron los valores correspondientes a dicho mes:

$$F_{CE (Veh.Lig.)} = 1.0294$$

$$F_{CE (Veh.Pes.)} = 0.9434$$

Estos factores corrigen el volumen semanal observado, adaptándolo a las variaciones mensuales que se presentan durante el año.

Posteriormente, y de acuerdo con el Cuadro 6.1 del Manual de Carreteras, se seleccionó el factor direccional y el factor carril necesarios para obtener el factor ponderado del carril de diseño, el cual se utiliza en la ecuación de ejes equivalentes por carril.

Figura 62.

Cuadro 6.1 Factores de distribución direccional y de carril para determinar el tránsito en el carril de diseño

Cuadro 6.1					
Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el Carril de Diseño					
Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño
1 calzada <small>(para IMDa total de la calzada)</small>	1 sentido	1	1.00	1.00	1.00
	1 sentido	2	1.00	0.80	0.80
	1 sentido	3	1.00	0.60	0.60
	1 sentido	4	1.00	0.50	0.50
	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
2 calzadas con separador central <small>(para IMDa total de las dos calzadas)</small>	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
	2 sentidos	3	0.50	0.60	0.30
	2 sentidos	4	0.50	0.50	0.25

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

En el caso específico de la vía analizada, esta cuenta con una sola calzada, con doble sentido de circulación y un carril por sentido. Bajo esta configuración geométrica, los valores establecidos por el Manual de Carreteras para los factores de distribución son los siguientes:

$$F_d = 0.50$$

$$F_c = 1.00$$

A continuación, se seleccionó el Factor de Ajuste por Presión de Neumático (FP), empleando los valores indicados en el Cuadro 6.13 del Manual de Carreteras, el cual corrige los ejes equivalentes en función de la presión de inflado de los neumáticos. Para este estudio

se asumió una carpeta de rodadura de 120 mm y una presión de inflado de 100 psi, conforme a lo permitido para vías de características similares.

La normativa indica que el PCN (Presión de Contacto del Neumático) se obtiene mediante:

$$PCN = 0.90 \times 100 = 90psi$$

Figura 63.

Cuadro 6.13 Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) para ejes equivalentes (EE)

Cuadro 6.13
FACTOR DE AJUSTE POR PRESIÓN DE NEUMÁTICO (F_p) PARA EJES EQUIVALENTES (EE)

Espeso de Capa de Rodadura (mm)	Presión de Contaco del Neumático (PCN) en psc PCN = 0.90x[Presión de inflado del neumático] (pai)						
	80	90	100	110	120	130	140
50	1.00	1.30	1.80	2.13	2.91	3.59	4.37
60	1.00	1.33	1.72	2.18	2.69	3.27	3.92
70	1.00	1.30	1.65	2.05	2.49	2.99	3.53
80	1.00	1.28	1.59	1.94	2.32	2.74	3.20
90	1.00	1.25	1.53	1.84	2.17	2.52	2.91
100	1.00	1.23	1.48	1.75	2.04	2.35	2.68
110	1.00	1.21	1.43	1.66	1.91	2.17	2.44
120	1.00	1.19	1.38	1.59	1.80	2.02	2.25
130	1.00	1.17	1.34	1.52	1.70	1.89	2.09
140	1.00	1.15	1.30	1.46	1.62	1.78	1.94
150	1.00	1.13	1.26	1.39	1.52	1.66	1.79
160	1.00	1.12	1.24	1.36	1.47	1.59	1.71
170	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61
180	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.53
190	1.00	1.08	1.16	1.24	1.31	1.39	1.46
200	1.00	1.08	1.15	1.22	1.28	1.35	1.41

Nota:

- EE = Ejes Equivalentes
- Presión de inflado del neumático (Pin): esta referido al promedio de presiones de inflado de neumáticos por tipo de vehículo pesado.
- Presión de Contacto del neumático (PCN): igual al 90% del promedio de presiones de inflado de neumáticos por tipo de vehículos pesado.
- Para espesores menores de capa de rodadura asfáltica, se aplicará el factor de ajuste igual al espesor de 50 mm.

Fuente: Elaboración propia, en base a correlaciones con la figura IV-4 EAL Adjustment Factor for Tire Pressures del Manual MS-1 del Instituto de Asfalto

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

$$F_p = 1.19$$

Por otro lado, fue necesario determinar el Factor de Crecimiento del Tráfico (FCA) para un periodo de diseño de 20 años, empleando una tasa de crecimiento anual del 4.43% según el formato T5 AC del MTC. De acuerdo con el Manual de Carreteras, este factor se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$FCA = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

$$FCA = \frac{(1 + 4.43\%)^{20} - 1}{4.43\%}$$

$$FCA = 31.142$$

Este valor representa el número acumulado de periodos equivalentes de tránsito pesado que actuarán sobre la vía durante los 20 años considerados en el diseño.

Con todos los datos obtenidos previamente —incluyendo el Factor Camión (FP), el Factor Direccional (FD), el Factor Carril (Fc), el Factor de Corrección Estacional (FCE), los factores de participación vehicular (FVP_i) y el IMD de vehículos pesados— se procedió a calcular las repeticiones de ejes equivalentes.

El primer paso consistió en obtener los Ejes Equivalentes diarios por carril para cada categoría de vehículo pesado (EE_{dia-carril}), para lo cual se tienen los siguientes datos:

Tabla 93.

Cálculo de Ejes Equivalentes por día por carril

Tipo de Vehículo	IMDA	F _D	F _C	F _{VP}	F _P	EE _{dia-carril}
B2	76	0.5	1.00	4.504	1.19	203.66
B3-1	94	0.5	1.00	2.631	1.19	147.17
C2	133	0.5	1.00	4.504	1.19	356.40
C3	30	0.5	1.00	3.285	1.19	58.63
C4	19	0.5	1.00	2.774	1.19	31.35
T2S3	10	0.5	1.00	6.210	1.19	36.95
T3S1	1	0.5	1.00	3.566	1.19	2.12
T3S3	175	0.5	1.00	4.991	1.19	519.65
C2R2	1	0.5	1.00	10.980	1.19	6.53
C3R2	15	0.5	1.00	9.761	1.19	87.12
C3R3	5	0.5	1.00	8.542	1.19	25.41
C4R2	19	0.5	1.00	9.250	1.19	104.57
						EE_{dia-carril} 1.58E+03

Nota: Elaboración propia

Una vez hallado nuestro EE_{dia-carril} se halló nuestro ESALs, mediante la ecuación previamente detallada de la siguiente manera:

$$N_{rep\ de\ EE_{8.2\ Ton}} = \sum [EE_{dia-carril} \times F_{ca} \times 365]$$

Tabla 94.

Número de Ejes Equivalentes

EE _{dia-carril}	F _{CA}	N _{rep de EE 8.2ton}
203.66	31.14	2.31E+06
147.17	31.14	1.67E+06
356.40	31.14	4.05E+06
58.63	31.14	6.66E+05
31.35	31.14	3.56E+05
36.95	31.14	4.20E+05
2.12	31.14	2.41E+04
519.65	31.14	5.91E+06
6.53	31.14	7.43E+04

87.12	31.14	9.90E+05
25.41	31.14	2.89E+05
104.57	31.14	1.19E+06
		1.80E+07

Nota: Elaboración propia

Finalmente, se obtuvo un valor de ESALs igual a 1.80×10^7 , resultado que representa las repeticiones equivalentes de carga que actuarán sobre la vía durante el periodo de diseño considerado. Este valor se emplea como insumo directo para la etapa siguiente, correspondiente al diseño estructural del pavimento.

3.2.9. Diseño de pavimento flexible

3.2.9.1. Diseño de pavimento flexible usando la normativa AASHTO 93

Antes de iniciar el procedimiento de diseño, se organizaron los parámetros obtenidos en los capítulos previos, considerando únicamente aquellos necesarios para aplicar la ecuación estructural propuesta por la AASHTO 93.

Como punto inicial, se determinó el Módulo Resiliente (MR) de la subrasante mediante la correlación empírica basada en valores de CBR, la cual es aceptada para suelos de comportamiento similar al analizado:

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$$

Sustituyendo el valor adoptado para el CBR de diseño:

$$M_R = 2555 \times 5.80^{0.64}$$

$$M_R = 7870.2 \text{ psi}$$

Posteriormente, se seleccionaron el nivel de confiabilidad (R) y la desviación normal estándar (Z_R) utilizando los valores recomendados en los cuadros 12.6 y 12.8 del Manual de Carreteras. Estos parámetros permiten ajustar el diseño a las condiciones operativas esperadas para la vía en estudio.

Figura 64.

Cuadro 12.6 Valores recomendados de nivel de confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de tráfico

Cuadro 12.6 Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad Para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de Tráfico				
TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP0	75,000	150,000	65%
	TP1	150,001	300,000	70%
	TP2	300,001	500,000	75%
	TP3	500,001	750,000	80%
	TP4	750,001	1,000,000	80%
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	85%
	TP6	1,500,001	3,000,000	85%
	TP7	3,000,001	5,000,000	85%
	TP8	5,000,001	7,500,000	90%
	TP9	7,500,001	10'000,000	90%
	TP10	10'000,001	12'500,000	90%
	TP11	12'500,001	15'000,000	90%
	TP12	15'000,001	20'000,000	95%
	TP13	20'000,001	25'000,000	95%
	TP14	25'000,001	30'000,000	95%
	TP15		>30'000,000	95%

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Del cuadro referido, se concluye que el nivel de confiabilidad (R) aplicable para la vía en estudio corresponde a:

$$R = 95\%$$

Figura 65.

Cuadro 12.8 Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal (Zr) para una sola

etapa de diseño (10 o 20 años) según el nivel de confiabilidad seleccionado y el rango de tráfico

Cuadro 12.8
Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Z_R)
Para una sola etapa de diseño (10 o 20 años)
Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_R)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	T _{P0}	75,000	150,000	-0.385
	T _{P1}	150,001	300,000	-0.524
	T _{P2}	300,001	500,000	-0.674
	T _{P3}	500,001	750,000	-0.842
	T _{P4}	750,001	1,000,000	-0.842
Resto de Caminos	T _{P5}	1,000,001	1,500,000	-1.036
	T _{P6}	1,500,001	3,000,000	-1.036
	T _{P7}	3,000,001	5,000,000	-1.036
	T _{P8}	5,000,001	7,500,000	-1.282
	T _{P9}	7,500,001	10'000,000	-1.282
	T _{P10}	10'000,001	12'500,000	-1.282
	T _{P11}	12'500,001	15'000,000	-1.282
	T _{P12}	15'000,001	20'000,000	-1.645
	T _{P13}	20'000,001	25'000,000	-1.645
	T _{P14}	25'000,001	30'000,000	-1.645
	T _{P15}	>30'000,000		-1.645

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Del Cuadro 12.8 del Manual de Carreteras se obtuvo la desviación normal estándar asociada al nivel de confiabilidad seleccionado, resultando:

$$Z_R = -1.645$$

Este valor se empleará directamente en la ecuación estructural de la AASHTO 93 para el cálculo del Número Estructural (SN).

Asimismo, se determinó el índice de serviciabilidad inicial (P_0), el índice de serviciabilidad final (P_t) y el diferencial de serviciabilidad (ΔPSI), utilizando los valores recomendados en los cuadros:

- Cuadro 12.10 – Índice de serviciabilidad inicial
- Cuadro 12.11 – Índice de serviciabilidad final
- Cuadro 12.12 – Diferencial de serviciabilidad

Figura 66.

Cuadro 12.10 Índice de serviciabilidad inicial (Pi) según rango de tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (Pi)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP0	75,00	150,000	3.80
	TP1	150,001	300,000	3.80
	TP2	300,001	500,000	3.80
	TP3	500,001	750,000	3.80
	TP4	750 001	1,000,000	3.80
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	4.00
	TP6	1,500,001	3,000,000	4.00
	TP7	3,000,001	5,000,000	4.00
	TP8	5,000,001	7,500,000	4.00
	TP9	7,500,001	10'000,000	4.00
	TP10	10'000,001	12'500,000	4.00
	TP11	12'500,001	15'000,000	4.00
	TP12	15'000,001	20'000,000	4.20
	TP13	20'000,001	25'000,000	4.20
	TP14	25'000,001	30'000,000	4.20
	TP15	>30'000,000		4.20

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Figura 67.

Cuadro 12.11 Índice de serviciabilidad final (Pt) según rango de tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (Pt)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP0	75,000	150,000	2.00
	TP1	150,001	300,000	2.00
	TP2	300,001	500,000	2.00
	TP3	500,001	750,000	2.00
	TP4	750 001	1,000,000	2.00
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	2.50
	TP6	1,500,001	3,000,000	2.50
	TP7	3,000,001	5,000,000	2.50
	TP8	5,000,001	7,500,000	2.50
	TP9	7,500,001	10'000,000	2.50
	TP10	10'000,001	12'500,000	2.50
	TP11	12'500,001	15'000,000	2.50
	TP12	15'000,001	20'000,000	3.00
	TP13	20'000,001	25'000,000	3.00
	TP14	25'000,001	30'000,000	3.00
	TP15	>30'000,000		3.00

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Figura 68.

Cuadro 12.12 Diferencia de serviciabilidad (ΔPSI) según rango de tráfico

Cuadro 12.12 Diferencial de Serviciabilidad (ΔPSI) Según Rango de Tráfico				
TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		DIFERENCIAL DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP0	75,001	1500,000	1.80
	TP1	150,001	300,000	1.80
	TP2	300,001	500,000	1.80
	TP3	500,001	750,000	1.80
	TP4	750,001	1,000,000	1.80
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	1.50
	TP6	1,500,001	3,000,000	1.50
	TP7	3,000,001	5,000,000	1.50
	TP8	5,000,001	7,500,000	1.50
	TP9	7,500,001	10'000,000	1.50
	TP10	10'000,001	12'500,000	1.50
	TP11	12'500,001	15'000,000	1.50
	TP12	15'000,001	20'000,000	1.20
	TP13	20'000,001	25'000,000	1.20
	TP14	25'000,001	30'000,000	1.20
	TP15		>30'000,000	1.20

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

De acuerdo con los valores obtenidos en los cuadros anteriores, se adoptaron los siguientes parámetros de serviciabilidad:

$$P_i = 4.20$$

$$P_f = 3.00$$

$$\Delta PSI = 1.20$$

Con estos valores, junto con el módulo resiliente de la subrasante, la confiabilidad seleccionada y la desviación estándar correspondiente, se procedió a aplicar la ecuación estructural de la AASHTO 93 para la determinación del Número Estructural (SN):

$$\log W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07$$

Resolviendo esta expresión para las condiciones del proyecto, se obtuvo un:

$$SN = 6.21$$

Este valor representa el Número Estructural requerido para que el pavimento soporte el tránsito proyectado durante el periodo de diseño.

Con el valor del Número Estructural definido, se procedió a seleccionar los coeficientes estructurales (a_1 , a_2 , a_3) correspondientes a cada una de las capas del pavimento flexible. Para ello, se utilizó el Cuadro 12.13 del Manual de Carreteras, del cual se eligieron los valores más

adecuados para: la carpeta asfáltica, la base granular, y la subbase granular, teniendo en cuenta las características mecánicas previstas para los materiales empleados en cada capa.

Figura 69.

Cuadro 12.13 Coeficientes estructurales de las capas del pavimento a_i

Cuadro 12.13			
Coeficientes Estructurales de las Capas del Pavimento a_i			
COMPONENTE DEL PAVIMENTO	COEFICIENTE	VALOR COEFICIENTE ESTRUCTURAL a_i (cm)	OBSERVACIÓN
CAPA SUPERFICIAL			
Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2,965 MPa (430,000 PSI) a 20 °C (68 °F)	a_1	0.170 / cm	Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Tráfico. Este ES un valor Maximo y de utilizarse como tal, El expediente de ingenieria debe ser explicito en cuanto a pautas de cumplimiento obligatorio como realizar : - Un control de calidad riguroso - Indicar un valor de Estabilidad Marshal, superior a 1000 kf-f - Alertar sobre la susceptibilidad al fisuramiento térmico y por fatiga (AASHTO 1993)
Carpeta Asfáltica en Frio, mezcla asfáltica con emulsión.	a_1	0.125 / cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico \leq 1'000,000 EE
Micropavimento 25 mm	a_1	0.130 / cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico \leq 1'000,000 EE
Tratamiento Superficial Bicapa.	a_1	(*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico \leq 500,000 EE. No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8%; y, en vias con curvas pronunciadas, curvas de volteo, curvas y contracurvas, y en tramos que obliguen al frenado de vehiculos
Lechada asfáltica (slurry seal) de 12 mm.	a_1	(*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico \leq 500,000 EE No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8% y en tramos que obliguen al frenado de vehiculos
(*) no se considerapor no tener aporte estructural			
BASE			
Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS	a_2	0.052 / cm	Capa de Base recomendada para Tráfico \leq 10'000,000 EE
Base Granular CBR 100%, compactada al 100% de la MDS	a_2	0.054 / cm	Capa de Base recomendada para Tráfico > 10'000,000 EE
Base Granular Tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall = 1500 lb)	a_{2a}	0.115 / cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cemento (resistencia a la compresión 7 días = 35 kg/cm ²)	a_{2b}	0.070 cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12 kg/cm ²)	a_{2c}	0.080 cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
SUBBASE			
Subbase Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS	a_3	0.047 / cm	Capa de Subbase recomendada con CBR minimo 40%, para todos los tipos de Tráfico

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Además de los coeficientes estructurales de cada capa, fue necesario determinar los coeficientes de drenaje m_1 y m_2 , los cuales se seleccionaron empleando los Cuadros 12.14 y 12.15 del Manual de Carreteras. Estos cuadros corresponden a: Cuadro 12.14: Calidad del drenaje y Cuadro 12.15: Valores recomendados del coeficiente de drenaje m_i para bases y subbases granulares no tratadas en pavimentos flexibles

El Cuadro 12.14 clasifica la calidad del drenaje según el tiempo requerido para que el agua infiltrada sea evacuada de la estructura del pavimento. Para este estudio, la evaluación de la condición de drenaje se basó en información proveniente de la estación meteorológica del SENAMHI en Sicuani, la cual registra valores elevados de precipitación durante diversas épocas del año.

A pesar de ello, las características geométricas y de textura superficial de la vía permiten que la escorrentía se evacue sin acumulaciones prolongadas. De acuerdo con las observaciones realizadas en campo, el agua de lluvia no permanece retenida por tiempos extensos y se elimina aproximadamente en 1 día.

Por esta razón, la calidad del drenaje se clasificó como Drenaje: “Bueno”

Figura 70.

Cuadro 12.14 Calidad del Drenaje

CALIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO EN QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	El agua no evacua

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO - 1993

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

El Cuadro 12.15 del Manual de Carreteras presenta los valores recomendados del coeficiente de drenaje (m_i) en función del porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento permanece expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación. Para el presente estudio, se analizaron los registros históricos de precipitación proporcionados por el SENAMHI – Estación Sicuani, a partir de los cuales se determinó que la estructura del pavimento se encuentra sometida a condiciones de humedad aproximadamente el 92.33% del tiempo.

De acuerdo con la clasificación del cuadro, este porcentaje corresponde al intervalo: “Mayor que 25%”.

Por otro lado, la calidad del drenaje fue clasificada como “Buena”, considerando que el agua infiltrada se evacúa en un tiempo cercano a un día, sin permanencias prolongadas dentro de la estructura del pavimento. Combinando ambas condiciones, tiempo de exposición y calidad del drenaje, se selecciona el coeficiente de drenaje recomendado según el Cuadro 12.15: $m_i=1.00$

Figura 71.

Cuadro 12.15 Valores recomendados del coeficiente de drenaje m_i para bases y subbases granulares no tratadas en pavimentos flexibles

CALIDAD DEL DRENAJE	P=% DEL TIEMPO EN QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD CERCANO A LA SATURACIÓN.			
	MENOR QUE 1%	1% - 5%	5% - 25%	MAYOR QUE 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 - 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Insuficiente	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy Insuficiente	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Fuente: Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO - 1993

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

$$m_2 = m_3 = 1.00$$

Este valor indica que la capacidad estructural de los materiales granulares no recibe ningún ajuste por efecto de las condiciones de drenaje, dado que la estructura del pavimento permanece expuesta a niveles elevados de humedad durante gran parte del año. En consecuencia, los coeficientes de drenaje no incrementan ni reducen la contribución estructural de la base y subbase dentro del diseño.

Una vez establecidos los coeficientes de drenaje (m_2 y m_3) y definida la calidad del drenaje mediante los cuadros del Manual de Carreteras, se procede al cálculo de los espesores de las capas del pavimento flexible. Para ello, se utiliza la ecuación del Número Estructural (SN) establecida en la AASHTO 1993, la cual permite determinar la capacidad estructural del pavimento en función de los coeficientes estructurales de cada capa, los espesores propuestos y los factores de drenaje.

La expresión general empleada es:

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$

Donde:

- SN = Número estructural del pavimento.
- a_1, a_2, a_3 = Coeficientes estructurales de las capas del pavimento
- d_1, d_2, d_3 = Espesores de la carpeta asfáltica, base y subbase, respectivamente (en pulgadas).
- m_2, m_3 = Coeficientes de drenaje de la base y subbase.

A partir de la ecuación del Número Estructural, es posible estimar los espesores de cada una de las capas que conformarán el pavimento flexible, verificando que la estructura propuesta tenga la capacidad necesaria para soportar las cargas del tránsito previsto y las condiciones ambientales propias de la zona de estudio.

En el apartado siguiente, se aplicará la metodología de tanteo, evaluando distintas combinaciones de espesores hasta obtener valores que cumplan con el SN requerido (6.21) y que, al mismo tiempo, se ajusten a los criterios establecidos por la metodología AASHTO 93.

Asimismo, será necesario considerar las recomendaciones del Cuadro 12.17 del Manual de Carreteras, el cual proporciona los espesores mínimos para: la capa superficial (carpeta asfáltica), y la base granular, asegurando que la sección propuesta no se sitúe por debajo de los límites considerados aceptables para este tipo de pavimentos.

Figura 72.

Cuadro 12.17 Valores recomendados de espesores mínimos de capa superficial y base granular

Cuadro 12.17 Valores recomendados de Espesores Mínimos de Capa Superficial y Base Granular					
TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		CAPA SUPERFICIAL	BASE GRANULAR
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP1	150,001	300,000	TSB, o Lechada Asfáltica (Slurry seal): 12mm, o Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frio:	150 mm
	TP2	300,001	500,000	TSB, o Lechada Asfáltica (Slurry seal): 12mm, o Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frio:	150 mm
	TP3	500,001	750,000	Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frio: 60mm Carpeta Asfáltica en Caliente: 70mm	150 mm
	TP4	750,001	1,000,000	Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frio: 70mm Carpeta Asfáltica en Caliente: 80mm	200 mm
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 80mm	200 mm
	TP6	1,500,001	3,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 90mm	200 mm
	TP7	3,000,001	5,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 90mm	200 mm
	TP8	5,000,001	7,500,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 100mm	250 mm
	TP9	7,500,001	10'000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 110mm	250 mm
	TP10	10'000,001	12'500,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 120mm	250 mm
	TP11	12'500,001	15'000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 130mm	250 mm
	TP12	15'000,001	20'000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 140mm	250 mm
	TP13	20'000,001	25'000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 150mm	300 mm
	TP14	25'000,001	30'000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 150mm	300 mm

Fuente: Elaboración Propia, en base a datos de la Guía AASHTO'93

Nota: Tomado del Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos (2014)

Para este estudio, se consideró el intervalo correspondiente a un tránsito acumulado entre 15,000,001 y 20,000,000 ESALs, para el cual el Manual de Carreteras recomienda los siguientes espesores mínimos:

- Carpeta Asfáltica en Caliente: 140 mm (14 cm)
- Base Granular: 250 mm (25 cm)

Estos espesores sirven como punto de partida dentro del proceso de tanteo, permitiendo evaluar su compatibilidad con las condiciones específicas del proyecto y, especialmente, con el Número Estructural requerido ($SN = 6.21$).

A partir de estos valores iniciales, se desarrollarán las iteraciones necesarias para ajustar los espesores de cada capa, verificando su aporte estructural y el cumplimiento de los criterios establecidos por la metodología AASHTO 93, así como las restricciones constructivas y operativas propias de la zona de estudio.

Finalmente, se obtiene la siguiente sección estructural propuesta:

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$
$$SN = 0.17 \times 15 + 0.054 \times 30 \times 1 + 0.047 \times 45 \times 1$$
$$SN = 6.29 > 6.21$$

A partir de los cálculos realizados, se verifica que el Número Estructural obtenido ($SN_{\text{calculado}}$) resulta superior al SN requerido (6.21). Esto indica que la sección estructural propuesta cumple con la capacidad necesaria para soportar las solicitaciones derivadas del tránsito proyectado durante el periodo de diseño.

Asimismo, los espesores adoptados para las capas del pavimento con inclusión del Material Celular Ligero (MCL) resultan acordes con los criterios establecidos por la metodología AASHTO 93 y con las condiciones operativas previstas para la vía en estudio, demostrando que la configuración seleccionada es apropiada para resistir las cargas aplicadas y mantener un desempeño aceptable bajo las condiciones ambientales locales.

Figura 73.

Espesores de capas del pavimento



Nota: Elaboración propia

Finalmente, se obtuvieron los espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento flexible, siendo estos: $d_1 = 0.15 \text{ m}$, $d_2 = 0.30 \text{ m}$ y $d_3 = 0.45 \text{ m}$, correspondientes a la carpeta asfáltica, base y subbase respectivamente.

Una vez definidos los espesores, se procedió a realizar nuevamente el diseño estructural empleando un criterio empírico–mecanicista, con la finalidad de evaluar el comportamiento de la sección propuesta frente a las solicitaciones de tránsito y las condiciones del terreno de. Para este análisis, se consideraron las siguientes premisas de diseño:

- La capa de subrasante se modela como un medio semiespacial con profundidad infinita, tratada como una capa tipo Boussinesq.
- Todas las capas se consideran con extensión lateral infinita, eliminando efectos de borde.
- El comportamiento de los materiales se asume lineal–elástico, homogéneo e isotrópico, lo cual permite la aplicación de teorías de elasticidad para la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura.

Con estas condiciones establecidas, se organizaron los valores necesarios para el análisis mecanicista, tales como el CBR y el módulo resiliente de la subrasante, los ejes equivalentes de 8.2 toneladas (ESALs), y los módulos elásticos obtenidos para el MCL en sus diferentes densidades. Estos parámetros se presentan en la siguiente tabla, que reúne la información base para el cálculo de tensiones, deformaciones y verificación del desempeño estructural.

Tabla 95.

Datos para diseño de pavimento

Descripción	Cantidad	Unidad
CBR (Subrasante)	5.80	%
M. Resiliente (Subrasante)	7870.18281	psi

Descripción	Cantidad	Unidad
E_c (400kg/m ³)	504	MPa
E_c (500kg/m ³)	559	MPa
E_c (600kg/m ³)	642	MPa
E_c (700kg/m ³)	665	MPa
E_c (800kg/m ³)	718	MPa
CBR (Sub-Base)	30	%
CBR (Base)	100	%
$E_{\text{carpeta asfáltica}}$	2965	MPa
ESALs (20 AÑOS)	18000000	

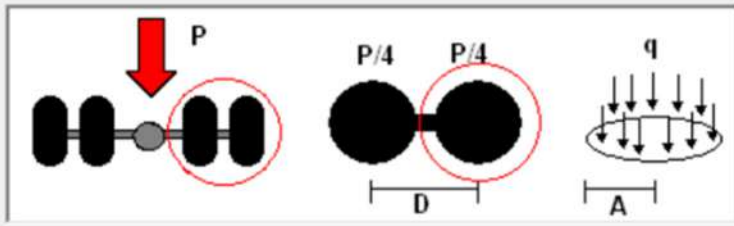
Nota: Elaboración propia

Una vez organizados los datos obtenidos, se procedió a emplear el software WindePAV, herramienta que permite determinar los espesores de las capas estructurales y, en consecuencia, desarrollar el diseño del pavimento mediante el enfoque empírico-mecanicista descrito previamente. Para iniciar el proceso de modelación, fue necesario definir la geometría del semieje de carga que actúa sobre la superficie del pavimento, de acuerdo con los parámetros considerados en el diseño:

Figura 74.

Geometría del semieje de carga sobre el pavimento

Geometría del semieje de carga sobre el pavimento



Modelo	P(ton.)	A (cm)	D (cm)	q (kgf/cm ²)
<input type="radio"/> MOPT UNICAUCA	8.200	10.8	32.4	5.594
<input type="radio"/> ASPHALT INSTITUTE	8.164	11.5	34.5	4.912
<input type="radio"/> SHELL OIL	8.156	10.5	31.5	5.887
<input type="radio"/> GUÍA FRANCESA 1994	13.26	12.5	37.5	6.752
<input type="radio"/> RUEDA SENCILLA	8.200	15.0	0.00	5.800
<input checked="" type="radio"/> Definido por el usuario	8.200	10.8	32.4	Auto

Nota: Elaboración propia

Donde:

- P (ton): Corresponde a la carga estándar de diseño aplicada por un eje simple. Conforme a la práctica habitual y lo indicado en la normativa, se adoptó un valor de 8.20 ton.

- A (cm): Representa el ancho de contacto del neumático con la superficie del pavimento. Este parámetro influye directamente en la presión de contacto y, por ende, en la distribución de esfuerzos en las capas superiores. Los valores habituales se encuentran en el rango de 10 a 12 cm.
- D (cm): Indica la separación entre los centros de los neumáticos de un semieje doble. Una mayor distancia reduce la superposición de esfuerzos en las capas inferiores. Para este análisis, se consideraron valores típicos entre 30 y 35 cm.
- Q (kg/cm²): Es la presión de contacto del neumático, variable que depende del tipo de llanta y de la carga aplicada. Para el presente diseño, se adoptó un valor de 5.594 kg/cm², dentro del rango usual de 5.0 a 9.0 kg/cm².

3.2.9.2. Diseño de pavimento flexible bajo el enfoque empírico - mecanicista

Para el diseño del pavimento flexible bajo el enfoque empírico–mecanicista, se organizó previamente la configuración estructural propuesta, resumiendo los valores del módulo elástico E (expresados en kgf/cm²) para cada una de las capas que conforman la sección del pavimento.

Tabla 96.

Módulo de elasticidad de las capas del pavimento

	PSI	kgf/cm ²	m
Carpeta	430000.00	30232.00	0.35
CBR 100%	30000.00	2109.21	0.40
CBR 30%	15000.00	1054.61	0.40
Modulo resiliente SR	7870.18	553.33	0.45

Nota: Elaboración propia

Respecto a los valores adoptados para el módulo de Poisson (μ), estos se seleccionaron dentro de rangos comúnmente empleados en normativa nacional e internacional, manteniendo consistencia con el tipo de material y su comportamiento mecánico:

- En mezclas asfálticas, el comportamiento visco-elástico produce deformaciones laterales representativas alrededor de $\mu = 0.35$, valor consistente con temperaturas de diseño cercanas a 20 ± 5 °C.
- En capas granulares, la ausencia de un ligante y la mayor libertad de reacomodo justifican un valor ligeramente superior, adoptándose $\mu = 0.40$.
- Para la subrasante, compuesta por suelos finos con susceptibilidad a variaciones volumétricas, se empleó un valor conservador de $\mu = 0.45$, apropiado para evaluar su comportamiento bajo carga repetida.

Posteriormente, se efectuó la verificación por fatiga y deformación permanente, aplicando las ecuaciones desarrolladas por el Asphalt Institute, que relacionan el desempeño estructural del pavimento con las deformaciones críticas obtenidas mediante el análisis mecanicista.

Verificación por fatiga (agrietamiento por tracción repetida)

El número de repeticiones admisibles se estimó según:

$$N_f = c * k_1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} * \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3}$$

Donde:

- N_f : Número de repeticiones de carga para la falla.
- C : Coeficiente de ajuste laboratorio vs. campo.
- ε_t : Deformación horizontal de tracción en la capa.
- E : Módulo de la capa (kg/cm^2).
- k_1 a k_3 : Coeficientes empíricos de regresión.

Verificación por deformación permanente (ahuellamiento)

La resistencia al ahuellamiento se evaluó mediante:

$$N_d = k_4 * \left(\frac{1}{\varepsilon_z}\right)^{k_5}$$

Donde:

- N_d : Número de repeticiones de carga para la falla.
- ε_z : Deformación vertical de compresión en la capa.
- k_4 a k_5 : Coeficientes empíricos de regresión.

Tras aplicar el cálculo mecanicista, se obtuvieron los valores de deformación por tracción en la base de la carpeta y la deformación vertical en la subrasante. Con estos resultados se procedió a las verificaciones de diseño:

Figura 75.

Verificación por fatiga y deformación permanente

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta		
Radio de las ruedas (cm)			10.80	A	Bajo una rueda simple				
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)			32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)			5.594	C	Al centro de la carga				
Exportar resultados a Excel (csv)									

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: 4				Tracción (fatiga)				Compresión			
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	1.101E+01	5.598E+00	190.0	A		-129.0	C	
	Continua		15.00	-7.362E+00	1.011E+00	-186.0	B	2.2634E+06	7.953		
2	2.109E+03	0.40	15.00	8.617E-02	1.011E+00	-186.0	B		430.0	B	
	Continua		45.00	-2.733E-01	3.212E-01	-146.0	C		248.0	C	
3	1.054E+03	0.40	45.00	-2.957E-02	3.212E-01	-146.0	C		319.0	C	
	Continua		90.00	-8.290E-02	1.091E-01	-89.9	C		165.0	C	
4	5.537E+02	0.45	90.00	2.131E-04	1.091E-01	-89.9	C		195.0	C	5.5545E+07
											0.324

Nota: Elaboración propia

La verificación por deformación permanente cumplió con un factor de daño = 0.324, lo cual indica que la estructura resiste adecuadamente la acumulación de compresiones.

En contraste, la verificación por fatiga arrojó un factor de daño = 7.953, valor superior a 1.0, lo que evidencia que la sección inicial no satisface las repeticiones equivalentes de carga y requiere ajustes.

Figura 76.

Verificación por fatiga y deformación permanente del replanteo de espesores

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta		
Radio de las ruedas (cm)			10.80	A	Bajo una rueda simple				
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)			32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)			5.594	C	Al centro de la carga				
Exportar resultados a Excel (csv)									

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: 4				Tracción (fatiga)				Compresión			
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	7.627E+00	5.598E+00	106.0	B		-62.6	C	
	Continua		27.00	-3.732E+00	4.201E-01	-95.6	C	2.0232E+07	0.890		
2	2.109E+03	0.40	27.00	-1.519E-02	4.201E-01	-95.6	C		194.0	C	
	Continua		62.00	-1.377E-01	1.468E-01	-68.6	C		120.0	C	
3	1.054E+03	0.40	62.00	-1.988E-02	1.468E-01	-68.6	C		152.0	C	
	Continua		107.00	-4.691E-02	6.424E-02	-51.5	C		95.9	C	
4	5.537E+02	0.45	107.00	1.264E-03	6.424E-02	-51.5	C		113.0	C	6.3900E+08
											0.028

Nota: Elaboración propia

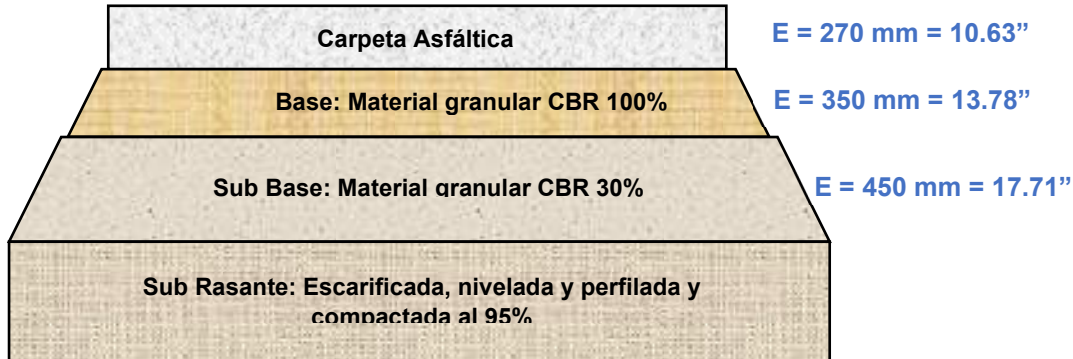
En consecuencia, se replantearon los espesores mediante iteraciones adicionales en el modelo mecanicista hasta alcanzar el cumplimiento simultáneo de ambos criterios. El diseño final de espesores resultó en:

- $d_1 = 0.27$ m (capa superficial),

- $d_2 = 0.35$ m (capa de base),
- $d_3 = 0.45$ m (subbase granular).

Figura 77.

Espesores finales de las capas del pavimento



Nota: Elaboración propia

Es importante mencionar que, en la práctica constructiva, un espesor de carpeta tan elevado suele subdividirse en una carpeta asfáltica y una base asfáltica, optimizando el proceso de ejecución. No obstante, este estudio no aborda la configuración constructiva detallada, sino la evaluación estructural, demostrando que el método empírico–mecanicista ajusta los espesores en función de las respuestas internas de la estructura y de las verificaciones por tracción y compresión en los puntos críticos del pavimento.

3.2.9.3. Diseño de pavimento flexible para densidades de MCL

Para el diseño mecanicista–empírico con sustitución de la capa granular por Material Celular Liger (MCL), se empleó la misma metodología descrita en los apartados previos. En este caso, se adoptó un módulo de Poisson $\mu = 0.20$ para todas las densidades estudiadas, valor habitual en materiales cementantes celulares debido a su comportamiento predominantemente frágil y su baja deformación lateral. El módulo de elasticidad (E) utilizado para cada simulación corresponde a los valores obtenidos experimentalmente en laboratorio, los cuales se encuentran resumidos en la tabla correspondiente.

Tabla 97.

Módulo de elasticidad de las capas del pavimento para el MCL

	MPa	kgf/cm ²
E_c (400kg/m ³)	504	5139.37
E_c (500kg/m ³)	559	5700.21
E_c (600kg/m ³)	642	6546.58
E_c (700kg/m ³)	665	6781.11
E_c (800kg/m ³)	718	7321.56

Nota: Elaboración propia

Adicionalmente, se consideraron como referencia los espesores obtenidos mediante el diseño empírico–mecanicista convencional a fin de establecer una comparación y evaluar la posibilidad de optimizar la estructura del pavimento según el desempeño mecánico del MCL.

3.2.9.3.1. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 400 kg/m³

Para la densidad de 400 kg/m³, al aplicar el análisis de esfuerzos y deformaciones bajo el mismo esquema de carga, se observó que las verificaciones presentan márgenes amplios respecto a los límites establecidos por el Asphalt Institute. Esto indica que el espesor inicial planteado resulta considerablemente mayor al requerido por el módulo elástico obtenido en esta densidad.

Figura 78.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 400 kg/m³

Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.														
Número de capas:		4		Tracción (fatiga)						Compresión				
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño			
1	3.023E+04	0.35	0.00	6.842E+00	5.598E+00	87.6	B		-44.0	C				
	Continua		27.00	-2.233E+00	6.312E-01	-63.5	C	7.7768E+07	66.4	B				
2	5.139E+03	0.20	27.00	-2.172E-01	6.312E-01	-63.5	C		135.0	B				
	Continua		62.00	-3.742E-01	1.244E-01	-64.1	C		52.2	C				
3	1.054E+03	0.40	62.00	-2.651E-02	1.244E-01	-64.1	C		136.0	C				
	Continua		107.00	-3.977E-02	5.292E-02	-43.1	C		79.9	C				
4	5.537E+02	0.45	107.00	4.477E-04	5.292E-02	-43.1	C		94.5	C	1.4227E+09			
											0.013			

Nota: Elaboración propia

Por tal razón, se procedió a optimizar los espesores, obteniéndose:

Figura 79.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 400 kg/m³ optimizado

Sistema de carga			Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta								
Radio de las ruedas (cm)		10.80	A	Bajo una rueda simple										
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)		32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga										
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)		5.594	C	Al centro de la carga										
Exportar resultados a Excel (csv)														
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.														
Número de capas:		4		Tracción (fatiga)						Compresión				
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño			
1	3.023E+04	0.35	0.00	8.137E+00	5.598E+00	118.0	B		-71.5	C				
	Continua		20.00	-3.345E+00	9.463E-01	-92.5	C	2.2551E+07	101.0	B				
2	5.139E+03	0.20	20.00	-3.243E-01	9.463E-01	-92.5	C		204.0	B				
	Continua		45.00	-6.608E-01	2.131E-01	-114.0	C		89.5	C				
3	1.054E+03	0.40	45.00	-4.946E-02	2.131E-01	-114.0	C		234.0	C				
	Continua		75.00	-7.576E-02	1.013E-01	-83.1	C		152.0	C				
4	5.537E+02	0.45	75.00	1.224E-03	1.013E-01	-83.1	C		180.0	C	7.9484E+07			
											0.226			

Nota: Elaboración propia

Llegando a espesores $d_1 = 0.20$ m, $d_2 = 0.25$ m y $d_3 = 0.30$ m.

3.2.9.3.2. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 500 kg/m³

Partiendo de los espesores optimizados para la densidad de 400 kg/m³, se evaluó el desempeño estructural con el módulo elástico correspondiente a 500 kg/m³.

Figura 80.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 500 kg/m³

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta		
Radio de las ruedas (cm)			10.80	A	Bajo una rueda simple				
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)			32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)			5.594	C	Al centro de la carga	Exportar resultados a Excel (csv)			

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: 4				Tracción (fatiga)				Compresión			
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	8.015E+00	5.598E+00	115.0	B		-68.7	C	
	Continua		20.00	-3.110E+00	9.850E-01	-87.2	C	2.7384E+07	97.0	B	0.657
2	5.700E+03	0.20	20.00	-3.406E-01	9.850E-01	-87.2	C		191.0	B	
	Continua		45.00	-7.209E-01	2.080E-01	-112.0	C		83.8	C	
3	1.054E+03	0.40	45.00	-4.833E-02	2.080E-01	-112.0	C		228.0	C	
	Continua		75.00	-7.362E-02	9.912E-02	-81.0	C		148.0	C	
4	5.537E+02	0.45	75.00	1.499E-03	9.912E-02	-81.0	C		175.0	C	0.200

Nota: Elaboración propia

Los resultados mantienen un comportamiento incluso más favorable, con menores deformaciones y un incremento en la capacidad estructural. Sin embargo, dado que los espesores ya satisfacen ampliamente las verificaciones, no fue necesario realizar ajustes, conservándose: $d_1 = 0.20$ m, $d_2 = 0.25$ m y $d_3 = 0.30$ m.

3.2.9.3.3. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 600 kg/m³

Para la densidad de 600 kg/m³, el análisis con los espesores previamente adoptados mostró:

Figura 81.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 600 kg/m³

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta		
Radio de las ruedas (cm)			10.80	A	Bajo una rueda simple				
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)			32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)			5.594	C	Al centro de la carga	Exportar resultados a Excel (csv)			

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: 4				Tracción (fatiga)				Compresión			
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	7.842E+00	5.598E+00	111.0	B		-65.0	C	
	Continua		20.00	-2.784E+00	1.040E+00	-80.0	C	3.6363E+07	92.0	B	0.495
2	6.547E+03	0.20	20.00	-3.600E-01	1.040E+00	-80.0	C		176.0	B	
	Continua		45.00	-8.056E-01	2.009E-01	-108.0	C		76.7	C	
3	1.054E+03	0.40	45.00	-4.630E-02	2.009E-01	-108.0	C		220.0	C	
	Continua		75.00	-7.056E-02	9.616E-02	-78.1	C		143.0	C	
4	5.537E+02	0.45	75.00	1.948E-03	9.616E-02	-78.1	C		169.0	C	0.171

Nota: Elaboración propia

Con resultados de márgenes muy amplios respecto a los umbrales de verificación, lo cual evidenció la posibilidad de nueva optimización. Se realizó una reducción de espesores:

Figura 82.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 600 kg/m³ optimizado

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta				
Radio de las ruedas (cm)			10.80	A	Bajo una rueda simple						
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)			32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga						
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)			5.594	C	Al centro de la carga						
Exportar resultados a Excel (csv)											
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahueamiento.											
Número de capas: 4				Tracción (fatiga)			Compresión				
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	8.923E+00	5.598E+00	137.0	B		-85.8	C	
	Continua		15.00	-3.334E+00	1.581E+00	-98.3	B	1.8460E+07	121.0	B	
2	6.547E+03	0.20	15.00	-3.671E-01	1.581E+00	-98.3	B		258.0	B	
	Continua		40.00	-1.016E+00	2.590E-01	-137.0	C		96.7	C	
3	1.054E+03	0.40	40.00	-5.323E-02	2.590E-01	-137.0	C		277.0	C	
	Continua		70.00	-8.617E-02	1.173E-01	-95.6	C		174.0	C	
4	5.537E+02	0.45	70.00	2.243E-03	1.173E-01	-95.6	C		206.0	C	4.3446E+07 0.414

Nota: Elaboración propia

Obteniendo: $d_1 = 0.15$ m, $d_2 = 0.25$ m y $d_3 = 0.30$ m. Estos espesores mantienen el cumplimiento simultáneo de ambas verificaciones: fatiga por tracción y deformación vertical acumulada.

3.2.9.3.4. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 700 kg/m³

Para la densidad de 700 kg/m³, los resultados obtenidos con la estructura anterior mostraron márgenes muy cercanos a los valores límite, especialmente en la verificación por tracción.

Figura 83.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 700 kg/m³

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta				
Radio de las ruedas (cm)			10.80	A	Bajo una rueda simple						
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)			32.40	B	Bajo una de las ruedas de la carga						
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)			5.594	C	Al centro de la carga						
Exportar resultados a Excel (csv)											
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahueamiento.											
Número de capas: 4				Tracción (fatiga)			Compresión				
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	8.851E+00	5.598E+00	135.0	B		-84.5	C	
	Continua		15.00	-3.222E+00	1.601E+00	-95.8	B	2.0094E+07	119.0	B	
2	6.781E+03	0.20	15.00	-3.691E-01	1.601E+00	-95.8	B		252.0	B	
	Continua		40.00	-1.040E+00	2.559E-01	-135.0	C		94.3	C	
3	1.054E+03	0.40	40.00	-5.252E-02	2.559E-01	-135.0	C		274.0	C	
	Continua		70.00	-8.515E-02	1.162E-01	-94.6	C		173.0	C	
4	5.537E+02	0.45	70.00	2.417E-03	1.162E-01	-94.6	C		204.0	C	4.5386E+07 0.397

Nota: Elaboración propia

Dado que el desempeño se mantiene en valores aceptables, pero sin suficiente margen para justificar reducciones adicionales, se conservaron los espesores obtenidos para 600 kg/m^3 : $d_1 = 0.15 \text{ m}$, $d_2 = 0.25 \text{ m}$ y $d_3 = 0.30 \text{ m}$.

3.2.9.3.5. Diseño de pavimento flexible para una densidad de 800 kg/m^3

Para 800 kg/m^3 , el análisis mostró un comportamiento similar al caso anterior: las deformaciones cumplen con las verificaciones, pero con márgenes menores, particularmente en la evaluación por fatiga.

Figura 84.

Verificación por fatiga y deformación permanente para MCL 800 kg/m^3

Sistema de carga				Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta		
Radio de las ruedas (cm)	10.80			A	Bajo una rueda simple		Exportar resultados a Excel (csv)		
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)	32.40			B	Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm^2)	5.594			C	Al centro de la carga				

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.													
Número de capas:		4											
No.	E (kgf/cm^2)	ν	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm^2)		Sigma Z (kgf/cm^2)		Tracción (fatiga)			Compresión		
								Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.023E+04	0.35	0.00	8.719E+00	B	5.598E+00	A	132.0	B		-81.8	C	
	Continua		15.00	-2.978E+00	B	1.642E+00	B	-90.5	B	2.4233E+07	0.743	116.0	B
2	7.322E+03	0.20	15.00	-3.732E-01	B	1.642E+00	B	-90.5	B			240.0	B
	Continua		40.00	-1.101E+00	C	2.498E-01	C	-132.0	C			89.4	C
3	1.054E+03	0.40	40.00	-5.058E-02	C	2.498E-01	C	-132.0	C			267.0	C
	Continua		70.00	-8.270E-02	C	1.142E-01	C	-92.3	C			169.0	C
4	5.537E+02	0.45	70.00	2.814E-03	B	1.142E-01	C	-92.3	C			200.0	C
												4.9593E+07	0.363

Nota: Elaboración propia

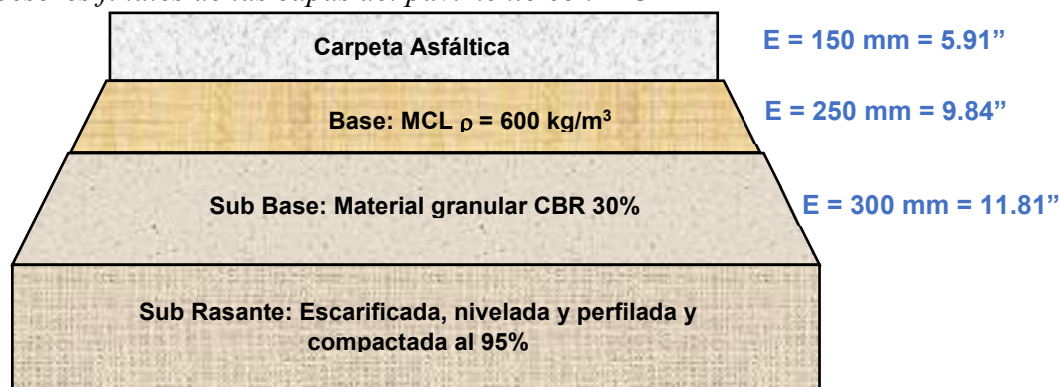
Por esta razón, tampoco se realizaron optimizaciones adicionales, manteniéndose: $d_1 = 0.15 \text{ m}$, $d_2 = 0.25 \text{ m}$ y $d_3 = 0.30 \text{ m}$.

Para la selección final de espesores, la densidad $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ constituye la alternativa más equilibrada, ya que permite una reducción estructural significativa (respecto al diseño convencional) manteniendo un desempeño adecuado frente a las verificaciones mecanicistas.

No obstante, el uso de densidades superiores ($700\text{--}800 \text{ kg/m}^3$) también es factible, ofreciendo módulos elásticos mayores, cuya elección dependerá de las solicitaciones particulares del proyecto y del criterio del proyectista, siempre que se evalúe cada caso de forma independiente.

Figura 85.

Espesores finales de las capas del pavimento con MCL



Nota: Elaboración propia

3.2.10. Análisis de costo de inversión por kilómetro

El análisis comparativo del costo de inversión se realizó para un tramo patrón de 1.00 km de longitud y 7.00 m de ancho de calzada, equivalente a un área de evaluación de 7000 m². Para evaluar la conveniencia del uso del Material Celular Ligero (MCL) en reemplazo de una base granular tradicional, se consideró: inversión inicial y reducción de espesores estructurales. Cabe precisar que, para la comparación con la estructura convencional, se utilizó la composición obtenida mediante el diseño empírico–mecanicista, ya que los espesores derivados del método AASHTO 93 resultan demasiado reducidos y no cumplen las verificaciones por fatiga ni por deformación permanente, por lo que su aplicación no es adecuada para las condiciones de Sicuani.

Costos de inversión inicial

El costo unitario del MCL en obra se ubica aproximadamente entre S/ 273.46 y S/ 395.34 por m³, dependiendo de la densidad y del costo de transporte. En contraste, un material granular de buena calidad puede costar S/ 75 por m³ en cantera, pero su costo real incorporando transporte, extendido, perfilado, nivelación y compactación asciende a S/ 140.00 aproximadamente por m³. Bajo esta perspectiva preliminar, la base granular parecería ser la alternativa de menor inversión; sin embargo, este análisis por sí solo no representa adecuadamente el comportamiento integral del pavimento, siendo necesario evaluar las demás capas que conforman la estructura y el desempeño estructural resultante.

Comparación de configuraciones estructurales

Al analizar las diferentes alternativas, considerando los espesores determinados previamente para cada caso, se obtuvieron los siguientes montos de inversión para la estructura completa del pavimento:

- MCL 400 kg/m³: S/ 1,175,055.00

- MCL 500 kg/m³: S/ 1,246,157.50
- MCL 600 kg/m³: S/ 1,177,242.50
- MCL ≥700 kg/m³: S/ 1,248,345.00
- Base granular convencional: S/ 1,303,750.00

Tabla 98.

Inversión inicial para el material de base

Alternativa	Espesores Iniciales	Config. Tradicional	MCL 400 kg/m ³	MCL 500 kg/m ³	MCL 600 kg/m ³	MCL ≥700 kg/m ³
Espesor de sub - base (mm)	450	450	300	300	300	300
Espesor de base (mm)	300	350	250	250	250	250
Espesor de asfalto (mm)	150	270	200	200	150	150
Volumen de asfalto (m ³)	1050.00	1890.00	1400.00	1400.00	1050.00	1050.00
Volumen de base (m ³)	2100.00	2450.00	1750.00	1750.00	1750.00	1750.00
Volumen de sub - base (m ³)	3150.00	3150.00	2100.00	2100.00	2100.00	2100.00
Costo asfalto (S/ 400/m ³)	420,000.00	756,000.00	560,000.00	560,000.00	420,000.00	420,000.00
Costo base (S/ 140/m ³)	294,000.00	343,000.00	-	-	-	-
Costo MCL	-	-	478,555.00	549,657.00	620,742.50	691,845.00
Costo sub - base (S/ 65/m ³)	204,750.00	204,750.00	136,500.00	136,500.00	136,500.00	136,500.00
Inversión inicial	918,750.00	1,303,750.00	1,175,055.00	1,246,157.50	1,177,242.50	1,248,345.00

Nota: Elaboración propia

Para el análisis comparativo de inversión inicial, los costos unitarios de la carpeta asfáltica y de la subbase granular fueron considerados como precios referenciales constantes para todas las alternativas evaluadas, con la finalidad de mantener una comparación homogénea y centrar el análisis en la variación de espesores y en el comportamiento del material de base. En consecuencia, las diferencias de costo total entre alternativas responden principalmente al volumen de las capas estructurales y al costo unitario del material de base empleado.

A partir de estos valores, se observa que todas las alternativas con MCL presentan una inversión inicial inferior a la estructura tradicional con base granular, incluso para densidades altas. Esto se explica principalmente por la reducción en los espesores de la carpeta asfáltica, que pasa de 270 mm (estructura convencional) a entre 150 mm y 200 mm cuando se emplea MCL. La disminución en espesor de carpeta representa un ahorro aproximado de S/ 336,000.00 por kilómetro en algunos casos.

Además del aspecto económico, el MCL presenta una capacidad mecánica superior frente a la base granular. La densidad de 600 kg/m^3 , seleccionada como alternativa final, mostró una resistencia aproximada de 15 kg/cm^2 , mientras que la base granular tradicional no supera valores cercanos a 3.4 kg/cm^2 , aun cuando se considere su mejor condición de compactación. Este incremento en la capacidad mecánica implica menor deformación vertical y menor tendencia al daño por fatiga, lo que se traduce en una mayor vida útil del pavimento y en un descenso en la frecuencia de intervenciones futuras.

De manera complementaria, se evaluó la alternativa generada por el método AASHTO 93 con espesores mínimos ($d_1 = 0.15 \text{ m}$, $d_2 = 0.30 \text{ m}$, $d_3 = 0.45 \text{ m}$). Esta alternativa presenta el menor costo inicial de todas ($\$/ 918,750.00$), pero su capacidad estructural es insuficiente para las condiciones geotécnicas de Sicuani y no incorpora ninguna mejora tecnológica. Por este motivo, dicha opción se incluye únicamente como referencia comparativa y no se considera viable como solución de diseño.

3.2.11. Análisis comparativo

3.2.11.1. Comportamiento estructural a nivel de base

A continuación, se presenta la discusión comparativa de los tres parámetros que permiten evaluar la respuesta estructural de la base al reemplazar el material granular convencional por el Material Celular Ligeró (MCL).

El análisis mantiene un orden lógico: capacidad de soporte \rightarrow módulo de elasticidad \rightarrow espesor requerido, lo que permite visualizar cómo la modificación del material base (incorporación de aire controlado en la matriz cementante) influye primero en el comportamiento del material y, posteriormente, en la configuración global del pavimento.

3.2.11.1.1. Capacidad de soporte de la base

Al sustituir la base granular por un MCL de densidad 600 kg/m^3 , la capacidad de soporte deja de depender del engranamiento de partículas y pasa a estar gobernada por la resistencia a compresión de la matriz cementicia espumada.

- La distribución uniforme de vacíos cerrados facilita una disipación más homogénea de tensiones y reduce los asientos localizados.
- La transición pasta–aire, caracterizada por rigidez moderada, favorece deformaciones elásticas sin comprometer la continuidad del material.
- En términos comparativos, el MCL puede aportar entre 25% y 30% más capacidad portante que una grava bien graduada, además de eliminar la variabilidad asociada a cambios de humedad en obra.

Como consecuencia, la base compuesta por MCL modifica el nivel de demanda interna de las capas superiores y reduce la sensibilidad del diseño a las variaciones del terreno de fundación.

3.2.11.1.2. Módulo de elasticidad de la base

El módulo estático de elasticidad (E) del MCL se determinó directamente a partir de la pendiente inicial de la curva esfuerzo–deformación evaluada conforme a ACI 318-19, mientras que para la base granular se utilizaron las correlaciones establecidas en la AASHTO 93.

Los resultados demostraron que, aun cuando el MCL posee una densidad menor que la grava tradicional, su matriz cementante permite alcanzar módulos superiores dependiendo de la densidad utilizada. Esto disminuye la deformación vertical transmitida a la subrasante y mejora la respuesta estructural del pavimento a cargas repetidas.

3.2.11.1.3. Espesor de la base

El espesor requerido se calculó inicialmente mediante AASHTO 93, utilizando como variables de entrada los valores de ESALs, CBR/MR y los coeficientes estructurales de cada material.

Sin embargo, al aplicar el diseño empírico–mecanicista, se verificó que algunos espesores iniciales no cumplían las condiciones de fatiga y deformación, por lo que fue necesario reconfigurar la composición estructural.

Al incorporar MCL se observó que:

- El espesor de la base puede reducirse sin afectar la tensión admisible, debido a su mayor módulo y mayor uniformidad estructural.
- La disminución del espesor de la carpeta asfáltica depende directamente de la rigidez de la base, lo que permitió optimizar la sección completa.
- La masa total del paquete disminuyó cerca de un 40%, lo cual disminuye la carga transmitida al terreno, reduce asentamientos y facilita los movimientos de tierra, especialmente en suelos blandos típicos de la zona de Sicuani.

3.2.11.2. Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica actúa como la capa resistente a esfuerzos tangenciales ocasionados por el tránsito y los cambios térmicos. Su espesor depende principalmente de:

- La rigidez efectiva de la base.
- La resistencia a la fatiga del mezclado asfáltico.

En consecuencia, cualquier variación en las propiedades de la capa base repercute directamente en la necesidad estructural de la carpeta asfáltica.

3.2.11.2.1. Espesor de la carpeta asfáltica

El dimensionamiento inicial de la carpeta se llevó a cabo empleando los valores mínimos recomendados por AASHTO 93 según los niveles de tránsito obtenidos.

Posteriormente, con el método empírico–mecanicista, se identificó que estos espesores no satisfacían los criterios de verificación por tracción y compresión, por lo que se incrementaron hasta cumplir con las verificaciones estructurales.

Al aplicar nuevamente el análisis utilizando MCL como base:

- La rigidez adicional proporcionada por el MCL permitió reducir de manera significativa el espesor de la carpeta asfáltica.
- Se optimizaron también los espesores de las capas inferiores sin exceder la tensión admisible en la subrasante.
- La reducción obtenida en la carpeta varió entre 70 mm y 120 mm respecto a la sección tradicional, dependiendo de la densidad del MCL evaluada.

La utilización del MCL permitió obtener una configuración más eficiente, manteniendo el desempeño estructural requerido, pero con menor demanda de espesor en las capas críticas del pavimento.

Capítulo IV: Resultados

4.1. Resultados respecto al objetivo específico 01

OE 01: Calcular la capacidad de soporte de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.

Tabla 99.

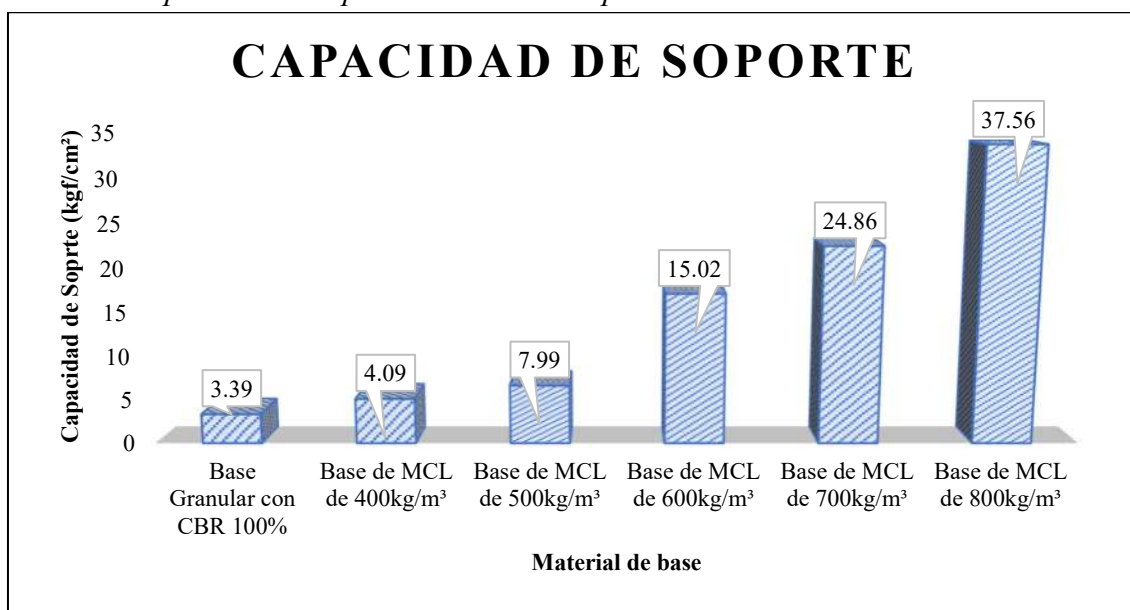
Resumen de capacidad de soporte de la base del pavimento

	kgf/cm ²
Base Granular con CBR 100%	3.39
Base de MCL de 400kg/m ³	4.09
Base de MCL de 500kg/m ³	7.99
Base de MCL de 600kg/m ³	15.02
Base de MCL de 700kg/m ³	24.86
Base de MCL de 800kg/m ³	37.56

Nota: Elaboración propia

Figura 86

Resumen de capacidad de soporte de la base del pavimento



Nota: Elaboración propia

Interpretación:

La Figura 86 muestra cómo la capacidad de soporte aumenta de forma muy significativa al emplear Material Celular Ligero (MCL) en lugar de la base granular convencional. Mientras que la base con CBR 100 % ofrece una resistencia admisible de apenas 3,39 kg/cm², el MCL de 400 kg/m³ aumenta su valor (4.09 kg/cm²) y, a partir de 500 kg/m³, el incremento se hace de forma exponencial, ya que pasa de 7,99 kg/cm² a 15,02 kg/cm² al alcanzar 600 kg/m³. A partir de esa densidad intermedia, la capacidad de soporte del material presenta saltos aún mayores, llegando a 24,86 kg/cm² en 700 kg/m³ y a 37.56 kg/cm² en 800 kg/m³. Este comportamiento no

lineal indica que existe un umbral a partir del cual la compactación del MCL y su estructura celular confieren un incremento exponencial de la capacidad portante. Dicho umbral se sitúa cerca de los 600 kg/m³, momento en que el MCL empieza a superar con amplitud las prestaciones de la base granular.

4.2. Resultados respecto al objetivo específico 02

OE 02: Estimar el módulo de elasticidad de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.

Tabla 100.

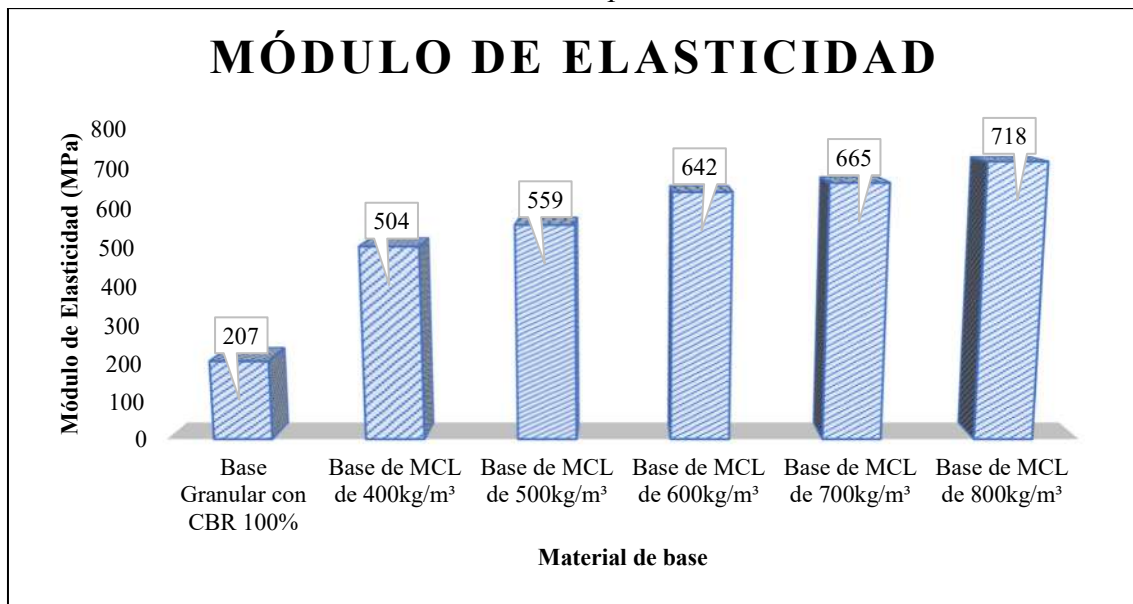
Resumen de módulo de elasticidad de la base del pavimento

	MPa	kgf/cm ²
Base Granular con CBR 100%	207	2109.21
Base de MCL de 400kg/m ³	504	5139.37
Base de MCL de 500kg/m ³	559	5700.21
Base de MCL de 600kg/m ³	642	6546.58
Base de MCL de 700kg/m ³	665	6781.11
Base de MCL de 800kg/m ³	718	7321.56

Nota: Elaboración propia

Figura 87.

Resumen de módulo de elasticidad de la base del pavimento



Nota: Elaboración propia

Interpretación:

La Figura 87 evidencia que el MCL aporta un módulo de elasticidad muy superior al material granular convencional: mientras la capa de base con CBR 100 % apenas alcanza un módulo de elasticidad de 207 MPa, los MCL, incluso en su densidad mínima de 400 kg/m³,

superan los 500 MPa (504 MPa) y escalan hasta 718 MPa a 800 kg/m³. Esto implica que, estructuralmente, aun la variante más ligera de MCL dobla con creces la capacidad de respuesta elástica de la base granular. El incremento de Elasticidad indica que, para una misma sollicitación de tráfico, la capa se deformará menos y repartirá mejor las tensiones hacia las capas inferiores, así mismo, un material con módulo superior puede permitir capas más delgadas sin sacrificar la durabilidad.

4.3. Resultados respecto al objetivo específico 03

OE 03: Determinar el espesor más favorable de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.

Tabla 101.

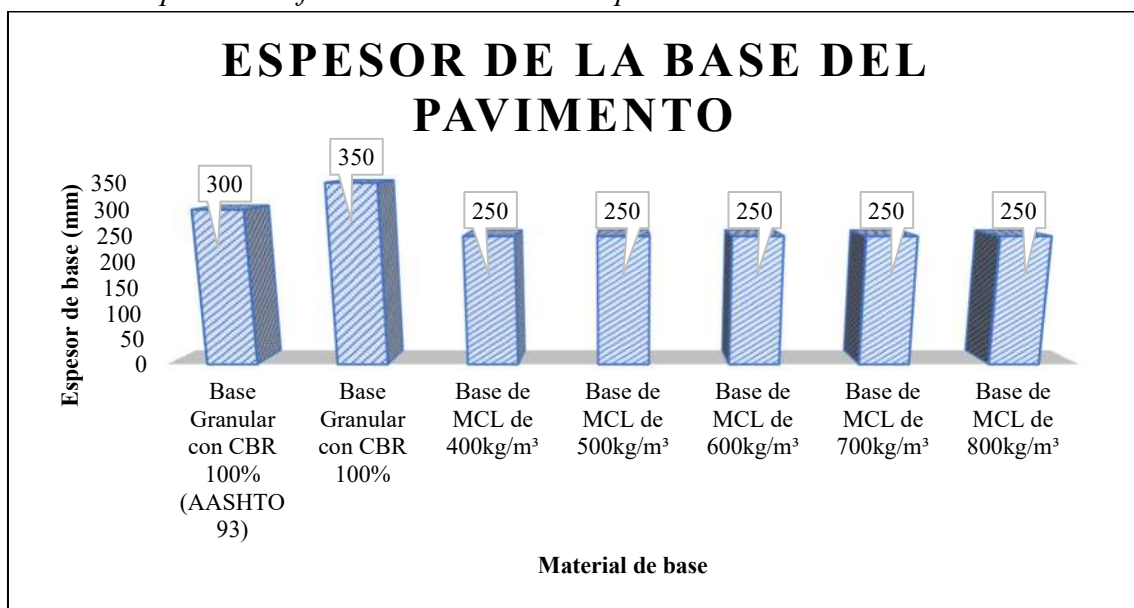
Resumen de espesor más favorable de la base del pavimento

	Pulgadas	mm
Base Granular con CBR 100% (AASHTO 93)	11.81"	300
Base Granular con CBR 100%	13.78"	350
Base de MCL de 400kg/m ³	9.84"	250
Base de MCL de 500kg/m ³	9.84"	250
Base de MCL de 600kg/m ³	9.84"	250
Base de MCL de 700kg/m ³	9.84"	250
Base de MCL de 800kg/m ³	9.84"	250

Nota: Elaboración propia

Figura 88.

Resumen de espesor más favorable de la base del pavimento



Nota: Elaboración propia

Interpretación:

La Figura 88 muestra que, al reemplazar la capa de base granular (300 mm) por Material Celular Ligerio (MCL), el espesor requerido disminuye, y se estabiliza en torno a un valor mínimo para densidades altas. Con MCL a 400 kg/m³ bastaron 250 mm de espesor, y al aumentar las densidades el espesor se mantiene en 250mm, sin embargo, como este afecta directamente a las demás capas estructurales, estas se reducen progresivamente sin contar que se tiene un peso volumétrico mucho menor en comparación a la de una base granular. Este comportamiento refleja la manera en que el diseño mecanicista-empírico ajusta el espesor en función del módulo de elasticidad del material; sin embargo, al superar cierto umbral de densidad (alrededor de 600 kg/m³), la ganancia adicional de rigidez ya no compensa una reducción mayor del espesor, probablemente debido a la variabilidad en campo, de modo que el espesor de base se mantiene en 250 mm. En la práctica, se sugiere que densificar el MCL por encima de 600 kg/m³ aporta rendimientos estructurales marginales en términos de ahorro de espesor.

4.4. Resultados respecto al objetivo específico 04

OE 04: Determinar el espesor más favorable de la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani – 2024.

Tabla 102.

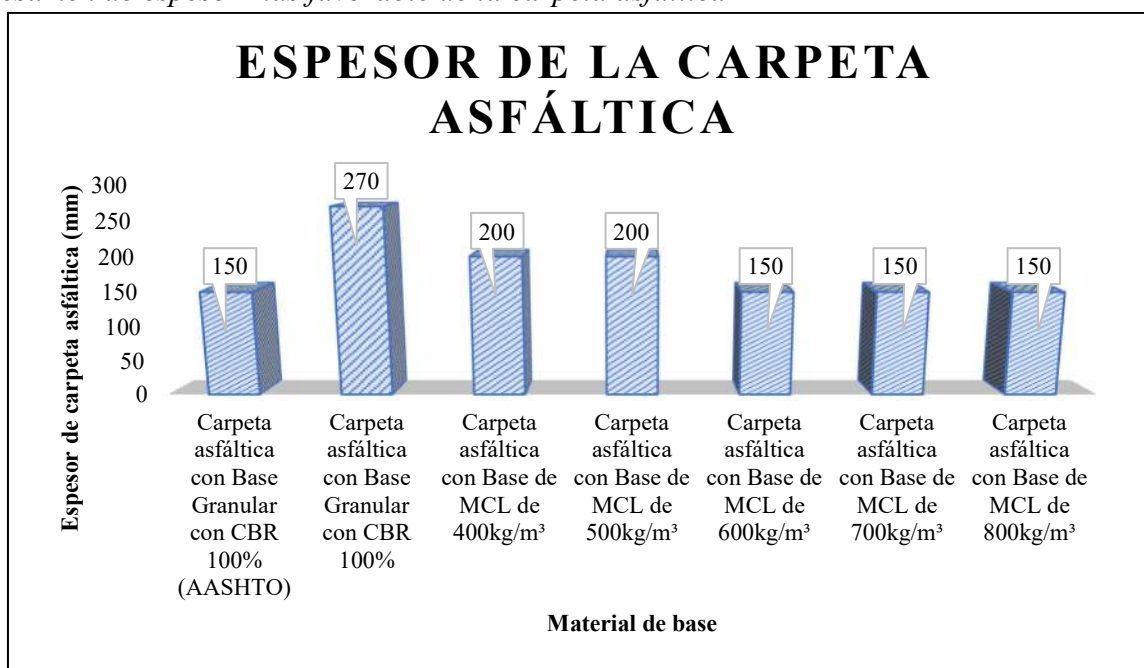
Resumen de espesor más favorable de la carpeta asfáltica

	Pulgadas	mm
Carpeta asfáltica con Base Granular con CBR 100% (AASHTO)	5.91”	150
Carpeta asfáltica con Base Granular con CBR 100% (Metod. Emp.-Mec.)	10.63”	270
Carpeta asfáltica con Base de MCL de 400kg/m ³	9.84”	200
Carpeta asfáltica con Base de MCL de 500kg/m ³	7.87”	200
Carpeta asfáltica con Base de MCL de 600kg/m ³	5.91”	150
Carpeta asfáltica con Base de MCL de 700kg/m ³	5.91”	150
Carpeta asfáltica con Base de MCL de 800kg/m ³	5.91”	150

Nota: Elaboración propia

Figura 89.

Resumen de espesor más favorable de la carpeta asfáltica



Nota: Elaboración propia

Interpretación:

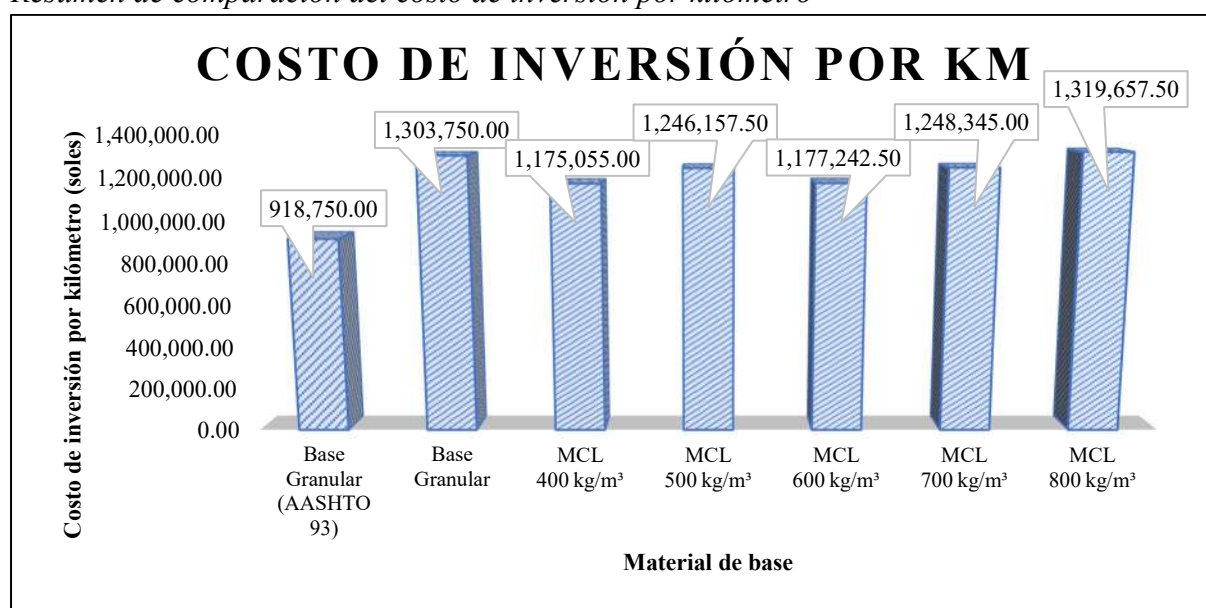
La Figura 89 muestra que, al sustituir la base granular convencional (CBR 100 %) por Material Celular Ligero, el espesor de la carpeta asfáltica disminuye de forma progresiva hasta estabilizarse. Con la base granular era necesario un espesor de 150mm en la carpeta asfáltica según la metodología AASHTO 93, y un espesor de 270 mm mediante la metodología empírico – mecanicista la cual corresponde al AASHTO 2008; mientras que, con MCL de 400 kg/m³ bastaron 200 mm. Al incrementar la densidad del MCL a 500 kg/m³, el espesor de la carpeta se mantiene, y para densidades de 600 kg/m³ y superiores (700 y 800 kg/m³) se mantuvo en 150 mm. Este comportamiento refleja que la mayor rigidez aportada por un MCL más denso reduce las deformaciones en la carpeta asfáltica y, por tanto, exige menos espesor para cumplir los criterios de fatiga y deformación permanente. El hecho de que a partir de 600 kg/m³ el espesor apenas varíe sugiere un límite constructivo o de servicio, es decir, un espesor mínimo necesario para garantizar la durabilidad y proteger la base.

4.5. Resultados respecto al objetivo específico 05

OE 05: Realizar un análisis comparativo del costo de inversión por kilómetro entre un pavimento con material celular ligero y un pavimento con material granular como capa estructural a nivel de base

Tabla 103.*Resumen comparativo del costo de inversión por kilómetro*

Configuración Planteada	Costo de Inversión
Base Granular (AASHTO 93)	918,750.00
Base Granular	1,303,750.00
MCL 400 kg/m ³	1,175,055.00
MCL 500 kg/m ³	1,246,157.50
MCL 600 kg/m ³	1,177,242.50
MCL 700 kg/m ³	1,248,345.00
MCL 800 kg/m ³	1,319,657.50

*Nota: Elaboración propia***Figura 90.***Resumen de comparación del costo de inversión por kilómetro**Nota: Elaboración propia***Interpretación:**

La Figura 90 de costo de inversión evidencia que, pese a ser una alternativa convencional, la estructura con base granular presenta la mayor inversión inicial (S/. 1,303,750.00), superando incluso a todas las configuraciones con Material Celular Ligero (MCL).

Entre las variantes de MCL, la opción con densidad de 600 kg/m³ representa una de las soluciones más equilibradas, con una inversión de S/. 1,177,242.50, seguida muy de cerca por la alternativa de 400 kg/m³ (S/. 1,175,055.00), que también permite reducir significativamente el volumen de carpeta asfáltica.

Aunque el MCL de 800 kg/m³ presenta la mayor densidad y resistencia entre los ensayados, su costo total asciende a S/. 1,319,657.50, incluso mayor que la estructura

tradicional, debido al alto consumo de cemento y aditivos, sin que ello represente un beneficio estructural adicional, ya que los espesores de base y carpeta asfáltica ya se han optimizado al mínimo práctico.

Finalmente, si bien la alternativa con espesores mínimos según la metodología AASHTO 93 (S/. 918,750.00) representa la menor inversión, esta no se recomienda como opción definitiva, ya que podría comprometer el desempeño estructural del pavimento ante cargas reales.

4.6. Resultados respecto al objetivo general

OG: Analizar experimentalmente el comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo de material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.

Tabla 104.

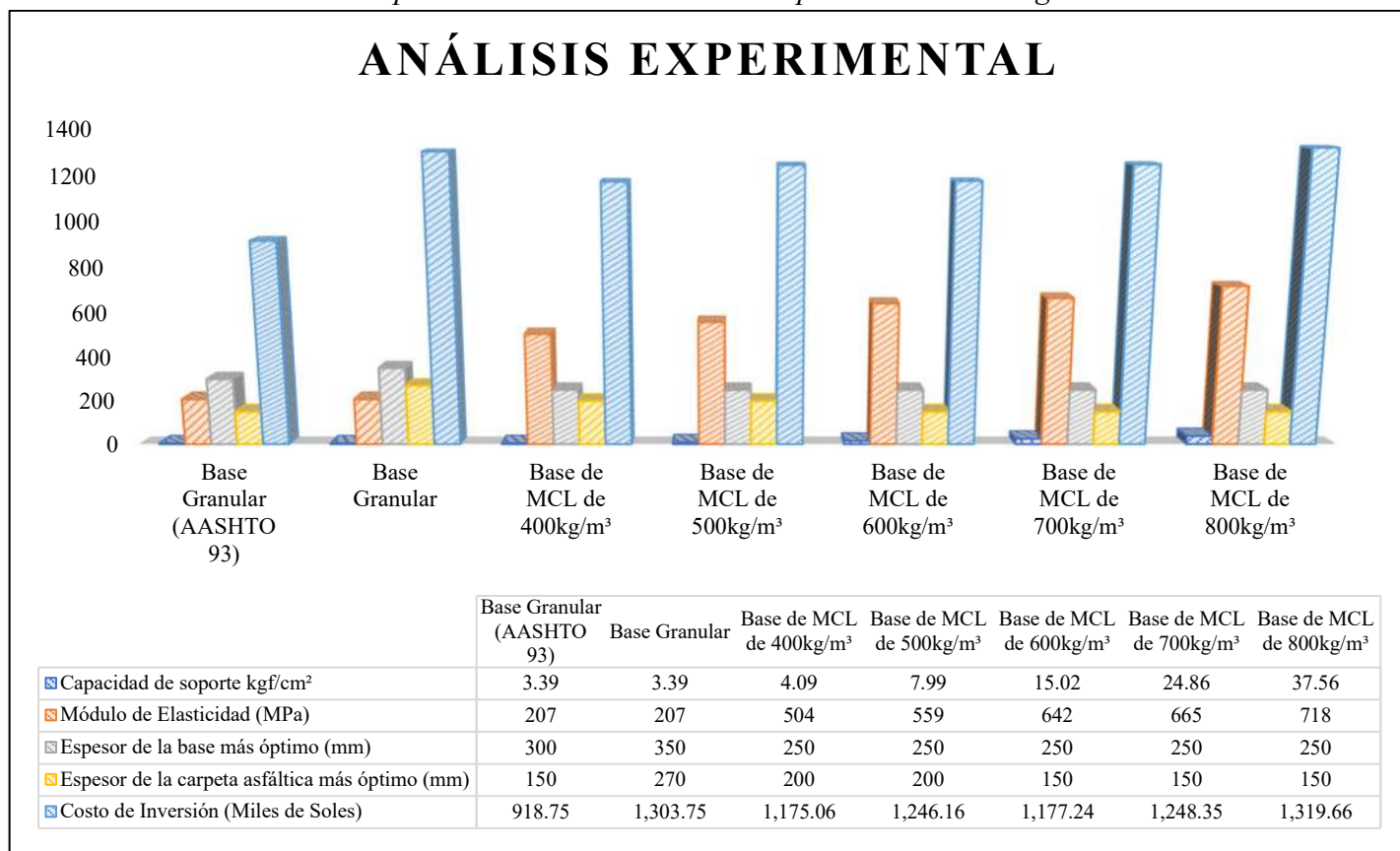
Resumen de análisis experimental del MCL como reemplazo del material granular

	Capacidad de soporte kgf/cm ²	Módulo de Elasticidad (MPa)	Espesor de la base más favorable (mm)	Espesor de la carpeta asfáltica más favorable (mm)	Costo de Inversión por Km
Base Granular (AASHTO 93)	3.39	207	300	150	918,750.00
Base Granular	3.39	207	350	270	1,303,750.00
Base de MCL de 400kg/m ³	4.09	504	250	200	1,175,055.00
Base de MCL de 500kg/m ³	7.99	559	250	200	1,246,157.50
Base de MCL de 600kg/m ³	15.02	642	250	150	1,177,242.50
Base de MCL de 700kg/m ³	24.86	665	250	150	1,248,345.00
Base de MCL de 800kg/m ³	37.56	718	250	150	1,319,657.50

Nota: Elaboración propia

Figura 91.

Resumen de análisis experimental del MCL como reemplazo del material granular



Nota: Elaboración propia

Interpretación:

La Figura 91 permite visualizar cómo el aumento progresivo en la densidad del Material Celular Ligero (MCL) de 400 a 800 kg/m³ influye positivamente en sus propiedades estructurales, como la capacidad de soporte y el módulo de elasticidad. Este comportamiento permite una reducción gradual de los espesores de la base y de la carpeta asfáltica, lo cual impacta directamente en el costo de inversión.

La estructura con base granular tradicional (CBR 100%) presenta la menor capacidad de soporte (3.39 kgf/cm²) y un módulo de elasticidad de 207 MPa, lo cual obliga a emplear espesores mayores (350 mm de base y 270 mm de carpeta), generando una inversión de S/. 1,303,750.00.

Al utilizar MCL de 400 kg/m³, la capacidad se incrementa a 4.09 kgf/cm² y el módulo a 504 MPa, lo que permite reducir los espesores a 250 mm de base y 200 mm de carpeta. No obstante, el costo se mantiene elevado (S/. 1,175,055.00) debido al alto volumen de asfalto.

Con 500 kg/m^3 , se alcanza un módulo de 559 MPa y 7.99 kgf/cm^2 de soporte, lo que permite reducir aún más la carpeta a 200 mm , logrando una inversión de S/. $1,246,157.50$.

La configuración más eficiente se presenta con 600 kg/m^3 , que logra una capacidad de 15.02 kgf/cm^2 y módulo de 642 MPa , con espesores mínimos viables (250 mm de base y 150 mm de carpeta), y una inversión reducida de S/. $1,177,242.50$.

A partir de esa densidad, los beneficios estructurales se estabilizan. Las configuraciones con 700 y 800 kg/m^3 presentan módulos aún mayores (665 y 718 MPa respectivamente), pero el costo de inversión crece significativamente hasta alcanzar S/. $1,319,657.50$ en el último caso, sin generar beneficios adicionales en espesores. Esto sugiere que, más allá de los 600 kg/m^3 , el MCL entra en una zona de rendimiento decreciente, donde el incremento en resistencia no justifica el mayor costo.

Finalmente, la configuración con menores espesores, propuesta de acuerdo a la metodología AASHTO 93, emplea 150 mm de carpeta, 300 mm de base y 450 mm de sub-base, alcanzando la menor inversión total (S/. $918,750.00$). Sin embargo, esta alternativa presenta una capacidad de soporte reducida (3.39 kgf/cm^2) y un módulo bajo (207 MPa), lo que puede comprometer el desempeño estructural del pavimento frente a cargas reales debido al poco espesor de sus capas estructurales. Por tanto, se considera como referencia comparativa, mas no como propuesta viable.

Capítulo V: Discusiones

5.1. Contraste de los resultados obtenidos respecto a los antecedentes

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que el reemplazo del material granular convencional por Material Celular Ligero mejora de manera progresiva el comportamiento estructural de la base del pavimento. La base granular presentó una capacidad de soporte de 3.39 kgf/cm² y un módulo de elasticidad de 207 MPa, mientras que las mezclas con MCL incrementaron dichos valores conforme aumentó la densidad, llegando hasta 37.56 kgf/cm² y 718 MPa en la densidad de 800 kg/m³. No obstante, el mejor equilibrio entre respuesta estructural y costo se alcanzó con el MCL de 600 kg/m³, que obtuvo 15.02 kgf/cm² de capacidad de soporte y 642 MPa de módulo de elasticidad. Este comportamiento guarda concordancia con el antecedente de Ni et al. (2022), quienes demostraron que el concreto celular liviano presenta una rigidez superior a la del material granular tradicional y que puede reducir hasta en 60 % el espesor de la subbase sin afectar su desempeño frente a fatiga ni deformaciones permanentes. Asimismo, reportaron que dicha solución puede resistir aproximadamente el doble de cargas de tráfico respecto a una subbase granular, e incluso entre 7 y 24 veces más tráfico frente al ahuellamiento. En ese sentido, aunque la presente tesis no expresa sus resultados en repeticiones de carga como el estudio citado, sí confirma la misma tendencia estructural: a mayor eficiencia mecánica del material celular, menor exigencia en los espesores de la estructura del pavimento.

En relación con la densidad y la resistencia mecánica del material celular, los resultados también muestran coherencia con otros antecedentes. En esta investigación, conforme la densidad aumentó de 400 a 800 kg/m³, el módulo de elasticidad creció de 504 MPa a 718 MPa, y la capacidad de soporte de 4.09 kgf/cm² a 37.56 kgf/cm², evidenciando una relación directa entre densidad y respuesta estructural. Este comportamiento coincide con Ioana et al. (2022), quienes obtuvieron un concreto celular con densidad aparente de 641 kg/m³ y resistencia a compresión de 4.1 MPa, concluyendo que era posible lograr una combinación favorable entre ligereza y resistencia mecánica. La similitud resulta importante porque la densidad óptima obtenida en dicho antecedente es cercana al rango que en la presente investigación produjo el mejor desempeño técnico-económico, es decir, alrededor de 600 kg/m³. Del mismo modo, Lazo (2017) reportó que al incrementar la densidad del concreto celular desde 1300 kg/m³ hasta 1800 kg/m³, la resistencia a compresión aumentó de 113 kg/cm² a 260 kg/cm², reafirmando que el incremento de densidad suele reflejarse en una mejora de la capacidad resistente del material.

Por tanto, aunque las magnitudes y aplicaciones no son idénticas, la tendencia obtenida en la presente tesis es consistente con la literatura previa.

Respecto a la optimización de espesores, la presente investigación muestra que el uso del MCL permitió reducir no solo el espesor de base, sino también el de la carpeta asfáltica. La sección con base granular convencional requirió 350 mm de base y 270 mm de carpeta, mientras que con MCL de 600 kg/m³ fue posible diseñar una estructura con 250 mm de base y 150 mm de carpeta. Esto representa una reducción aproximada de 28.6 % en el espesor de base y de 44.4 % en el espesor de carpeta asfáltica respecto a la solución granular evaluada. Al contrastar este resultado con Ni et al. (2022), se observa coincidencia en la dirección del comportamiento, ya que dichos autores también concluyeron que el concreto celular liviano permitía una disminución sustancial del espesor estructural requerido. Sin embargo, el aporte de la presente tesis es más amplio, porque no solo verifica la reducción del espesor de apoyo, sino que demuestra experimentalmente cómo dicha mejora estructural repercute también en la reducción de la carpeta asfáltica y en el costo total del pavimento por kilómetro.

En cuanto a la variable económica, los resultados de la investigación indican que el mejor comportamiento estructural no necesariamente corresponde al mayor costo ni a la mayor densidad. La base granular convencional presentó un costo de inversión de S/ 1,303,750.00 por km, mientras que el MCL de 400 kg/m³ costó S/ 1,175,055.00, el de 500 kg/m³ S/ 1,246,157.50, el de 600 kg/m³ S/ 1,177,242.50, el de 700 kg/m³ S/ 1,248,345.00 y el de 800 kg/m³ S/ 1,319,657.50. Estos valores muestran que, si bien las densidades altas incrementan la capacidad de soporte y el módulo de elasticidad, a partir de cierto punto el incremento del costo deja de justificarse técnicamente, pues los espesores ya no se reducen más. Este hallazgo dialoga con antecedentes nacionales y locales que señalan que el concreto celular suele presentar un costo unitario mayor que el material convencional, pero puede compensarlo mediante sus propiedades. Lazo (2017) concluyó precisamente que el concreto celular presenta un costo ligeramente superior al convencional, aunque dicho sobre costo se compensa por la reducción de peso y su potencial de aplicación. Asimismo, Izquierdo y Ortega (2017) reportaron un peso específico de 1000 kg/m³, una resistencia a compresión de 40 kg/cm², un costo unitario de S/ 3.87 por bloque y un costo de tabiquería de S/ 54.00 por m², demostrando que el material celular puede ser económicamente competitivo cuando se evalúa junto con sus beneficios funcionales. Por ello, el principal aporte económico de esta tesis es haber demostrado que la comparación

más adecuada no debe hacerse solo por costo unitario del material, sino por costo total de inversión por kilómetro de la estructura vial.

5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación

Los resultados muestran que el MCL, a medida que incrementa su densidad, mejora notablemente la respuesta estructural de la base en comparación con el material granular convencional. A partir de 600 kg/m^3 , el comportamiento mecánico alcanza un punto de equilibrio donde el incremento de rigidez es significativo sin requerir densidades demasiado elevadas.

Con esta densidad, la base puede reducirse de 350 mm a 250 mm y la carpeta asfáltica de 270 mm a 150 mm, manteniendo el cumplimiento de las verificaciones por fatiga y deformación. Densidades mayores ($700\text{--}800 \text{ kg/m}^3$) continúan aumentando el módulo y la resistencia, pero sus beneficios marginales decrecen, haciendo que el punto técnico-económico óptimo se ubique nuevamente en 600 kg/m^3 .

5.3. Comentario de la demostración de la hipótesis

HE 1: “Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene un incremento en la capacidad de soporte a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.”

Los ensayos mostraron un incremento desde 3.39 kgf/cm^2 (base granular) hasta valores entre 4.09 y 37.56 kgf/cm^2 según la densidad del MCL. Esto confirma la mejora en la capacidad portante y valida completamente la hipótesis.

HE 2: “Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene una mejora en el módulo de elasticidad a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.”

El módulo de elasticidad se elevó de 207 MPa (granular) a $504\text{--}718 \text{ MPa}$ con MCL, con una correlación $R^2 = 0.976$ y dispersión baja, corroborando la mejora del parámetro. La hipótesis se cumple.

HE 3: “Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se optimizan los espesores a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.”

El diseño mecanicista–empírico determinó que con MCL de densidades $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ el espesor de base se reduce de 350 mm a 250 mm manteniendo el desempeño estructural. La hipótesis queda validada.

HE 4: “Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se optimizan los espesores de la carpeta asfáltica en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.”

El empleo del MCL permitió reducir la carpeta de 270 mm a 150 mm, cumpliendo las verificaciones de daño por tracción y compresión. La hipótesis se confirma.

HE 5: “El material celular ligero como capa estructural a nivel de base permite obtener una alternativa técnico-económica más favorable.”

El análisis comparativo entre la solución tradicional con base granular y las alternativas que incorporan material celular ligero demuestra que el MCL ofrece una relación técnico – económico más conveniente para el diseño de pavimentos flexibles en Sicuani. Aunque la base granular presenta un costo unitario menor, su empleo exige mayores espesores estructurales, 270 mm de carpeta asfáltica y 350 mm de base, lo cual eleva la inversión total a S/. 1,303,750.00 por kilómetro. En contraste, las configuraciones que incorporan MCL, especialmente en densidades intermedias ($400\text{--}600 \text{ kg/m}^3$), permiten reducir progresivamente los espesores de las capas estructurales sin comprometer el desempeño mecánico, lo que disminuye simultáneamente el volumen de materiales requeridos y la carga transmitida a la subrasante.

La alternativa más favorable se identificó con el MCL de 600 kg/m^3 , que alcanzó una capacidad de soporte de 15.02 kgf/cm^2 y un módulo de elasticidad de 642 MPa, permitiendo diseñar una base de 250 mm y una carpeta de 150 mm. Esta configuración redujo la inversión inicial a S/. 1,177,242.50 por kilómetro, valor inferior al de la estructura granular tradicional. A ello se suman beneficios indirectos relevantes, como la eliminación de procesos de extracción y acarreo de agregados, la disminución del impacto ambiental asociado a la explotación de canteras y la reducción de la masa total del paquete estructural, lo cual atenúa los asentamientos en suelos blandos. En conjunto, estos resultados confirman que el MCL proporciona una alternativa técnicamente válida y económicamente ventajosa frente a la base granular convencional, validándose así la hipótesis.

HG: “Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene una mejora en el comportamiento estructural del pavimento flexible del distrito de Sicuani - 2024.”

La integración de: mayor capacidad portante, incremento del módulo, reducción de espesores, disminución de tensiones en subrasante, menor masa estructural y menores requerimientos de mantenimiento, permite confirmar que el MCL mejora el comportamiento estructural del pavimento flexible en las condiciones de Sicuani.

5.4. Aporte de la investigación

Esta investigación aporta un análisis experimental completo sobre el desempeño del MCL como material estructural para bases de pavimento flexible. Entre sus contribuciones destacan:

- La identificación de una densidad óptima (600 kg/m^3) que maximiza la capacidad portante y el módulo de elasticidad.
- La validación del comportamiento del MCL mediante métodos AASHTO 93 y empírico-mecanicistas, adaptados a condiciones geotécnicas y climáticas altoandinas.
- La demostración de que el MCL permite reducir espesores, aligerar la estructura y disminuir los esfuerzos transmitidos a la subrasante.
- Un análisis de técnico - económico que evidencia su viabilidad frente a la solución granular convencional.
- El planteamiento de una línea de investigación futura orientada a modelos de fatiga, comportamiento dinámico, pruebas en campo y análisis ambiental.

El estudio contribuye así al desarrollo de alternativas tecnológicas para pavimentos en regiones con limitaciones de materiales granulares y condiciones de alta variabilidad climática.

Capítulo VI: Conclusiones

6.1. Conclusiones respecto al objetivo específico 01

La sustitución del material granular convencional por MCL incrementó de forma notable la capacidad de soporte de la base. El CBR pasó de 3,39 kgf/cm² (CBR 100 %) a valores comprendidos entre 4,09 kgf/cm² y 37,56 kgf/cm² conforme la densidad aumentó de 400 a 800 kg/m³. Se identificó un umbral cercano a los 600 kg/m³ a partir del cual la resistencia portante crece de manera más acelerada, mostrando que esta densidad es suficiente para superar ampliamente el desempeño estructural de la base granular tradicional. Con ello se valida el objetivo referido a la mejora de la capacidad de soporte mediante el uso de MCL.

6.2. Conclusiones respecto al objetivo específico 02

El MCL incrementó de manera significativa el módulo de elasticidad de la base. Mientras el material granular convencional mostró un módulo de elasticidad de 207 MPa, el MCL alcanzó valores de entre 504 MPa y 718 MPa. Este aumento de rigidez mejora la distribución de cargas y reduce la susceptibilidad a deformaciones permanentes, favoreciendo el empleo de espesores menores sin afectar la durabilidad estructural del pavimento.

6.3. Conclusiones respecto al objetivo específico 03

El análisis mecanicista-empírico permitió demostrar que los espesores de base pueden disminuirse considerablemente con el uso de MCL. Frente a los 350 mm requeridos en la base granular, el MCL permitió reducir el espesor a 250 mm a partir de densidades iguales o superiores a 600 kg/m³, evidenciando que valores mayores de densidad no generan reducciones adicionales significativas.

6.4. Conclusiones respecto al objetivo específico 04

Los espesores de la carpeta asfáltica también experimentaron reducciones importantes al emplear MCL como capa de base. Mientras la estructura convencional requería 270 mm, las alternativas con MCL de 600 kg/m³ y superiores permitieron reducirla a 150 mm sin comprometer las verificaciones por tracción, fatiga ni deformación permanente. Este espesor mínimo se mantuvo estable para densidades de 700 y 800 kg/m³.

6.5. Conclusiones respecto al objetivo específico 05

El análisis de inversión inicial mostró que, pese al mayor costo unitario del MCL, la reducción de espesores estructurales permite disminuir el costo total por kilómetro. La

alternativa con MCL de 600 kg/m³, que emplea 250 mm de base y 150 mm de carpeta, alcanzó una inversión de S/. 1,177,242.50, inferior a los S/. 1,303,750.00 requeridos por la estructura tradicional con base granular, representando un ahorro aproximado del 10 %. Este resultado confirma que el MCL a 600 kg/m³ constituye la alternativa más eficiente en términos técnico-económicos.

6.6. Conclusiones respecto al objetivo general

El estudio evidenció que el MCL, a partir de una densidad crítica cercana a 600 kg/m³, incrementa de manera simultánea la capacidad de soporte y el módulo de elasticidad, permitiendo reducir los espesores de la base y de la carpeta asfáltica. Asimismo, posibilita una disminución en la inversión inicial y un mejor aprovechamiento de los recursos frente a la solución tradicional. Estos resultados confirman la viabilidad técnica, económica y operativa del MCL como material sustituto del agregado granular en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani.

Capítulo VII: Recomendaciones y aplicaciones prácticas

7.1. Recomendaciones respecto a la investigación

7.1.1. Recomendaciones respecto al resultado específico 01

Se recomienda emplear MCL con una densidad mínima de 600 kg/m³ en la capa de base, dado que a partir de este valor se obtiene un incremento marcado en la resistencia portante. Para proyectos donde existan riesgos de deformaciones diferenciales, se sugiere complementar los ensayos CBR con pruebas de placa de carga en obra, con el fin de validar directamente en campo la capacidad de soporte determinada en laboratorio.

7.1.2. Recomendaciones respecto al resultado específico 02

Debido a que el módulo de elasticidad aumenta casi de forma proporcional a la densidad hasta los 800 kg/m³, se recomienda estudiar la variación del módulo de elasticidad del MCL bajo diferentes niveles de humedad ambiental. Es pertinente realizar ensayos triaxiales cíclicos para evaluar el comportamiento frente a cargas repetidas y ajustar el diseño a condiciones reales de operación.

7.1.3. Recomendaciones respecto al resultado específico 03

Considerando que la reducción de espesor se estabiliza alrededor de 250 mm para densidades iguales o superiores a 600 kg/m³, se sugiere construir tramos piloto con ese espesor y monitorear asentamientos y deformaciones plásticas bajo tráfico real o acelerado. Esto permitirá validar los espesores antes de su aplicación extensiva y afinar márgenes de seguridad constructivos.

7.1.4. Recomendaciones respecto al resultado específico 04

Considerando que 150 mm es un espesor mínimo viable de carpeta asfáltica sobre MCL ($\rho \geq 600$ kg/m³), se recomienda explorar el empleo de mezclas asfálticas de mayor módulo, como aquellas con polímeros o refuerzo mineral fino. Dichas mezclas podrían permitir reducciones adicionales sin comprometer la resistencia a fatiga, especialmente en vías sometidas a tránsito pesado.

7.1.5. Recomendaciones respecto al resultado específico 05

Dado que el MCL de 600 kg/m³ obtuvo la mejor relación técnica y económica, se recomienda considerar esta alternativa dentro de los estándares de diseño en futuras obras. Asimismo, se sugiere implementar un sistema de monitoreo en campo para evaluar el

comportamiento estructural, la deformación superficial y el desempeño en época de lluvias, con el objetivo de validar su funcionamiento bajo condiciones reales. Finalmente, se aconseja explorar mecanismos de reducción de costos, tales como convenios con proveedores, que permitan disminuir el costo por metro cúbico y favorecer su adopción en proyectos de mayor escala.

7.1.6. Recomendaciones respecto al resultado general

Para consolidar la incorporación del MCL en pavimentos flexibles, se recomienda ejecutar un proyecto piloto controlado en un tramo representativo, acompañado de instrumentación (deflectómetros, sensores de humedad y registros de deformación). Los datos obtenidos permitirán ajustar espesores, parámetros de diseño y protocolos de mantenimiento, facilitando la transferencia de esta tecnología hacia otras vías de la red vial.

7.2. Sugerencias

Evaluación por fatiga mecánica

Se propone desarrollar un programa de ensayos de fatiga en secciones construidas con MCL de diferentes densidades (400–800 kg/m³), sometiéndolas a cargas cíclicas hasta falla. Esto permitirá obtener curvas de vida por número de ciclos y compararlas con las predicciones del AASHTO MEPDG, ajustando los modelos de diseño en función del comportamiento real del material.

Influencia de la temperatura en respuesta dinámica

Es recomendable realizar ensayos en cámara térmica para evaluar el desempeño del MCL entre 5 °C y 50 °C, midiendo variaciones en el módulo dinámico (E^*), amortiguamiento y pérdida de rigidez. Esto ayudará a construir curvas maestras termo-dependientes, siguiendo los lineamientos del MEPDG para suelos y capas de fundación.

Caracterización dinámica mediante ensayos triaxiales de alta frecuencia

Se sugiere utilizar equipos de triaxial dinámico para determinar el módulo resiliente y el coeficiente de Poisson dinámico del MCL bajo confinamientos representativos. Con estos resultados se podrá refinar el modelo mecanicista-empírico y mejorar la estimación de deformaciones permanentes.

Análisis de cargas estáticas versus dinámicas in situ

La instalación de placas de deflexión FWD en tramos piloto permitirá comparar la capacidad de carga estática con la respuesta dinámica real. Este análisis facilitará la calibración de factores de seguridad de subrasante y validará los parámetros utilizados en el diseño.

Impacto ambiental y sostenibilidad de la sustitución de agregados tradicionales

Se recomienda desarrollar un análisis de ciclo de vida que compare las emisiones, el consumo energético y la perturbación ambiental derivados del uso de MCL frente a bases granulares. Este estudio permitirá cuantificar reducciones en extracción y transporte de agregados, así como los beneficios ambientales asociados al MCL.

Capítulo VIII: Referencias bibliográficas

- Abanto, T. (2017). *Tecnología del concreto*. <http://biblioteca.unfv.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=44058>
- Admin de ingecivil. (2018). ¿Qué es la imprimación asfáltica? *Inge Civil*.
- Agurto, C. (2020). *Análisis de hormigón celular como capa en estructura de pavimento*. 118.
- Alam, A., & Hu, J. (2023). Mechanical properties and energy absorption capacity of plain and fiber-reinforced single- and multi-layer cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 394, 132154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132154>
- Alario, E. (2020). ¿Cuántos Hormigones conoces? <https://enriquealario.com/tipos-de-hormigon/>
- Albert. (2024). Concreto celular: características, aplicaciones y fabricación. *Olisius*. <https://olisius.com/concreto-celular>
- Aldana, R. (2021). Ensayos de compactación - proctor normal y modificado. *Firmes y Pavimentos*.
- Amevec. (2024). *Muros de concreto celular*. <https://amevec.mx/muros-de-concreto-celula>
- Ampuero, A. (2013). *La compactación y su control en obras civiles son claves para el éxito de un proyecto*. <https://www.ing.uc.cl/estructural-y-geotecnica/wp-content/uploads/2013/08/la-compactacion-y-su-control-en-obras-civiles-son-claves-para-el-xito-de-un-proyecto-por-alejandro-ampuero1.pdf>
- Andy. (2024). Módulo de resiliencia: fórmula, cálculo y materiales clave. *Blog de Toufa*. <https://www.tuofa-cncmachining.com/es/tuofa-blog/modulus-of-resilience.html>
- Aristizabal, L., Hoyos, J., Gil, L., Gomez, M., & Gomez, D. (2014). *Diseño de un pavimento flexible por los métodos AASHTO y Racional*. Universidad Libre.
- Asfaltofarvias. (2024). *Compactación de mezclas asfálticas: Guía completa*. <https://asfaltofarvias.com/compactacion-de-mezclas-asfalticas-guia-completa>
- ASTM D6938. (2024). *Método de ensayo estandarizado para densidad en sitio y contenido de agua de suelo y agregado por método nuclear (superficial)*. https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/ASTMD6938_08aE.pdf
- Auccahuaqui, I., & Corahua, R. (2016). *Evaluación del sistema de pavimentos flexibles en la prolongación de la Av La Cultura tramo (4to Paradero de San Sebastián Grifo Mobil de San Jerónimo)*. Universidad Andina del Cusco.
- Bautista, I. (2024). *Relación entre la consistencia y la humedad del suelo*. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/185001/Bautista - Relacion entre la consistencia y la humedad del suelo.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/185001/Bautista%20-%20Relacion%20entre%20la%20consistencia%20y%20la%20humedad%20del%20suelo.pdf)

- Blogger. (2024). Pavimentos II. *Civil Ingeniero Blog Spot*.
- Boiero, A. (2020). *El ensayo granulométrico por tamizado*.
- Bowles, J. (1984). *Physical and geotechnical properties of soils* (M.-H. B. Company (ed.)).
- Bravo, C. (2020). *Análisis por deflectometría aplicando viga Benkelman en dos pavimentaciones, en av. Canta Callao y av. Carlos Izaguirre, Lima 2020* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/61736>
- CENEPRED. (2015). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA_PUBLICAR/CENEPRED/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- Civil Mac. (2024). *Concreto Estructural Liviano*. Mac. <https://www.civilmac.com/construccion/concreto-estructural-liviano>
- Construneic. (2024). Ensayo Proctor. *Mecánica de Suelos*.
- Construye Mejor. (2024). Análisis de costo unitario imprimación asfáltica. *Construye Mejor*.
- Cordova, M., & Flores, J. (2021). *Análisis Comparativo De Las Propiedades Mecánicas Del Concreto Celular Para Optimizar El Diseño Utilizando Aditivo Espumante y Polvo De Aluminio* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/66841>
- Costa, A. (2019). *Patologías de los pavimentos*. 9, 32.
- Cruz, L. (2020). Capítulo 5: Distribucion de esfuerzos en el suelo debido a cargas. *Introducción Al Cálculo y Diseño de Cimentaciones*. <https://www.udocz.com/apuntes/120540/capitulo-5-distribucion-de-esfuerzos-en-el-suelo-debido-a-cargas>
- Curacreto. (2020). Concreto celular aislante térmico y acústico ultra ligero. *Curacreto Celular*. <https://curacreto.com.mx/productos/concreto-celular-ultraligero/aircreto-celular>
- De La Cruz, K. (2020). *Evaluación de propiedades mecánicas de mezclas con asfalto PG 76-10E modificado con polímero elastómero y con polímero*. Universidad Cesar Vallejo.
- Dynatest. (2021). *Georadar GPR: Radar de Penetración Terrestre*. <https://www.dynatestlatam.com/gpr>
- EGC Consulting. (2023). Importancia de la compactación del suelo en la construcción: Técnicas y consideraciones. *EGC Consulting*. <https://egcconsulting.net/importancia-de-la-compactacion-del-suelo-en-la-construccion-tecnicas-y-consideraciones>
- Enriquez, V., & Orbegoso, J. (2020). *Diseño de un concreto celular con la aplicación de perlas de poliestireno para mejorar la resistencia a compresión*. Tarapoto, 2020 [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/54623>

- FAO. (2022). *Consistencia del Suelo*.
https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm#:~:text=El índice de plasticidad se,el suelo se mantiene plástico .
- Farro, A. (2023). Ensayo de Densidad de Campo. *Construneic*.
<https://construneic.com/mecanica-de-suelos/ensayo-de-densidad-de-campo>
- Figueroa, E. (2019). *Análisis del comportamiento a compresión del concreto ligero reemplazando el agregado grueso por perlas de poliestireno expandido* [Universidad Andina del Cusco]. <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/267f605b-ac1c-4e8a-8e73-9998f8033ff3>
- France. (2023). *Carreteras de hielo: vitales para Canadá, amenazadas por el calentamiento global*. <https://www.france24.com/es/programas/en-foco/20230505-carreteras-de-hielo-vitales-para-canada-amenazadas-por-el-calentamiento-global>
- Galaviz, J., Horta, J., Rojas, E., & Perez, M. (2020). Determinación del coeficiente de variación volumétrica por hidratación para suelos expansivos. *Dirección de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro*.
<https://promep.sep.gob.mx/archivospdf/MEMORIAS/Producto2794220.PDF>
- Galistar. (2024). *Hormigón ligero: ventajas, características y aplicaciones*.
<https://www.galistar.es/hormigon-ligero>
- Gardiner, K. (2019). *Las carreteras de hielo de Canadá se están derritiendo demasiado pronto*. <https://www.findinterestingplaces.com/articles/canada-frozen-rivers-ice-roads>
- Geofantex. (2024). *Explicación de las geomallas: Una guía completa para el refuerzo del suelo y la prevención de la erosión*.
- Geostru. (2024). Clasificación de suelos. *GeoStru / Artículos Geotécnica*.
https://help.geostru.eu/geostruformula/es/classificazione_suoli.htm
- Geotecnia. (2017). Ensayo de penetración estándar SPT (Standard Penetration Test). *Geotecnia Facil*. <https://geotecniafacil.com/ensayo-de-penetracion-estandar-spt>
- Geotecnia. (2018). Ensayo Proctor Normal y Modificado. Descripción e interpretación. *Geotecnia Facil*. <https://geotecniafacil.com/ensayo-proctor-normal-y-modificado>
- Gonzalez, L. (2012). *Cargas de Tránsito*.
- Gregory, G., & Cross, S. (2007). Correlation of California Bearing Ratio with Shear Strength Parameters. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1989–1(1)*, 148–153. <https://doi.org/10.3141/1989-17>
- Grossmann, F., & Groover, M. (2017). *Propiedades mecánicas de lo materiales*.
<https://cadcamiutjaa.wordpress.com/wp->

- content/uploads/2017/03/propiedades_mecanicas_de_los_materiales.pdf
- Grupo MOA. (2024). *Estrategias de mantenimiento asfáltico: ¿Preventivo o Correctivo?*
<https://moasfaltos.com/estrategias-de-mantenimiento-asfaltico-preventivo-o-correctivo>
- Guerrero. (2021). Funciones de las capas de un suelo pavimentado. *Guerrero Constructores*.
- Guerrero, J. (2024). Cimentación superficial vs. profunda: ¿cuál elegir y cuándo? *Pisos & Casas*. <https://pisoscasas.net/cimentacion-superficial-vs-profunda-cual-elegir-y-cuando>
- Guillermo, R., & Urrutia, V. (2021). *Análisis de las propiedades mecánicas de muros fabricado con bloques apilables de concreto celular*, Lima. [Universidad Cesar Vallejo].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/85827/Guillermo_BRJ-Urrutia_LVR-SD.pdf
- Guzmán, E. (2023). Aplicación de la metodología RAMCODES en el control de compactación de capas granulares de pavimento flexible. *Revista Cultura Científica*, 17.
<https://doi.org/https://doi.org/10.38017/1657463X.819>
- Hebel. (2019). *Concreto Celular Hebel - Propiedades únicas en un solo material*.
<https://www.hebel.mx/pdf/CATALOGO-HEBEL-MEXICO-Final.pdf>
- Huaman, E., & Sanchez, J. (2020). *Obtención de las propiedades del concreto celular para su aplicación en el análisis sísmico de edificios de muros de ductilidad limitada* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<http://hdl.handle.net/20.500.12773/11628>
- Icotec. (2009). *Análisis de la flexo tracción del concreto permeable*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- INACAL. (2019). Suelos. Método de ensayo para el análisis granulométrico. *Norma Técnica Peruanad NTP 339.134*. <https://es.slideshare.net/slideshow/ntp-339128-granulometria-por-tamizado-y-por-sedimentacion-2019/250459521>
- INCOL. (2024). *Ficha técnica-aditivo celulosa para hormigón*.
https://incol.com.pe/public/frontend/images/producto/ficha_66b13e296e1ca.pdf
- Industry Surfer. (2023a). *Determinación de la Densidad Seca Máxima y el Contenido Óptimo de Agua de los Suelos – IS:2720. 6*. <https://industrysurfer.com/blog-industrial/construccion/determinacion-de-la-densidad-seca-maxima-y-el-contenido-optimo-de-agua-de-los-suelos-is2720-parte-vii>
- Industry Surfer. (2023b). *Hormigón celular: material, propiedades, ventajas y métodos de fabricación*. <https://industrysurfer.com/blog-industrial/construccion/hormigon-celular-material-propiedades-ventajas-y-metodos-de-fabricacion>
- Ingeotecnia. (2024). *Análisis Granulométrico*. <https://ingeotecnia.com/analisis->

granulometrico

- Innova Ingeniería. (2022). *Compactación de terrenos, importancia y aplicación*.
- Instituto Mexicano de Transportes. (2001). Módulo de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>
- Ioana, A., Paunescu, L., Constantin, N., Rucai, V., Dobrescu, C., Pasare, V., & Istrate, A. (2022). High-Strength and Heat-Insulating Cellular Building Concrete Based on Calcined Gypsum. *Materials*, 16(1), 118. <https://doi.org/10.3390/ma16010118>
- Ipur. (2017). *Espuma rígida de poliuretano*. <https://aislaconpoliuretano.com/espuma-rigida-poliuretano/>
- Izquierdo, M., & Ortega, O. (2017). *Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/622468?locale-attribute=es>
- Izuloaga. (2023). Capacidad de Soporte. *Geotecnia. Online*.
<https://geotecnia.online/diccionario/capacidad-de-soporte>
- Kraeb Bolivia. (2018). *Hidratación del cemento: La importancia del tiempo de reacción*. Itacamba Cemento S.A. <https://www.itacamba.com/hidratacion-del-cemento-la-importancia-del-tiempo-de-reaccion>
- Lazo, J. (2017). *Diseño de concreto celular para diferentes densidades, analisis de sus propiedades y sus aplicaciones* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<https://es.scribd.com/document/374823946/Diseno-Hormigon-Celular>
- Leiva, F., Aguiar, J., & Camacho, E. (2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. *Revista Infraestructura Vial / LanammeUCR*, 18(32), 20–29.
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v18n32/2215-3705-infraestructura-18-32-00020.pdf>
- Library. (2021). *Control de Compactacion en El Campo*.
<https://1library.co/document/yr00jpy-control-de-compactacion-en-el-campo.html>
- Lidia, A. (2023a). Factores que influyen en la geotecnia de cimentaciones en suelos. *Todo Ingenierias*. <https://todoingenierias.com/factores-que-influyen-en-la-geotecnia-de-cimentaciones-en-suelos>
- Lidia, A. (2023b). Importancia de la compactación de suelos en ingeniería: beneficios y procesos. *Todo Ingenierias*. <https://todoingenierias.com/importancia-de-la->

compactacion-de-suelos-en-ingenieria-beneficios-y-procesos

- Limaymanta, F., & Gutierrez, W. (2003). Ensayo de Modulo Resiliente. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil - Iquitos 2003 - Capítulo de Ingeniería Civil Del Consejo Departamental de Loreto Del Colegio de Ingenieros Del Perú*.
<https://studylib.es/doc/5514337/ensayo-de-modulo-resiliente>
- María, F. (2024). Nueva técnica para fabricar cemento de forma sostenible y sin agresión al medio. *Ok Diario*. <https://okdiario.com/ciencia/nueva-tecnica-fabricar-cemento-forma-sostenible-sin-agresion-medio-13097154>
- Martinez, D. (2024). *Optimización de Estructuras en Construcción: Claves para Eficiencia*.
- Massenlli, G., & Paiva, C. (2019). Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(4), 613–624. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000400613>
- Mathios, M., & Cotrina, N. (2021). *Propuesta de diseño sismorresistente y su relación con el desempeño de un edificio multifamiliar de albañilería confinada, con bloques de concreto celular, distrito de la banda de Chiclayo, provincia y departamento de San Martín - 2019* [Universidad Científica del Sur].
<https://repositorio.ucp.edu.pe/items/956fcf4d-091c-4ebb-82da-4dfeffbcb10f>
- Mendieta, D. (2016). *Aplicación de una metodología para rehabilitación de pavimentos mediante sobrecapas de refuerzo, utilizando AASHTO 93*. Universidad del Azuay.
- Meskovska, A. (2024). Cómo estructurar la documentación del sistema de gestión de calidad. *Advisera*. <https://advisera.com/9001academy/es/knowledgebase/como-estructurar-la-documentacion-del-sistema-de-gestion-de-calidad>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2015). Manual de Carreteras: Diseño Geométrico. *Resolución Directoral N.º 03-2018-MTC/14*.
<https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/10438-03-2018-mtc-14>
- Morales, M., Echezuría, H., & Velásquez, J. (2022). Diseño optimizado para la prefabricación de fundaciones superficiales. *Boletín de La Academia Nacional de La Ingeniería y El Hábitat*, 54, 67–74. <https://socvengeotecnica.com/wp-content/uploads/2022/07/2022-Miguel-Morales-Heriberto-Echezuria-y-Jose-Velasquez-Diseno-optimizado-para-la-prefabricacion-de-fundaciones-superficiales.pdf>
- MTC. (2014). Suelos, geología, geotecnia y pavimentos: Sección suelos y pavimentos. *Manual de Carreteras*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES DE CARRETERAS 2019/MC-05-14 Seccion Suelos y

- Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf
- Manual de ensayo de materiales, (2016).
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual_Ensayo_de_Materiales.pdf
- MTC. (2018). *Manual de carreteras: diseño geométrico DG-2018*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- MTC Provias Nacional. (2021). *Estado de la superficie de rodadura de diciembre del 2021*.
<https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2022/04/rn-estado2021.pdf>
- Municipalidad provincial de Canchis. (2022). *Plan de desarrollo urbano del distrito de Sicuani al 2022*. <https://www.gob.pe/institucion/municanchis/informes-publicaciones/2827085-plan-de-desarrollo-urbano>
- Ni, F., Oyeyi, A., & Tighe, S. (2022). Structural capacity evaluation of lightweight cellular concrete for flexible pavement subbase. *Road Materials and Pavement Design*, 23(12), 2781–2797. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1999844>
- Noguera, A., & Miró, R. (2011). Efecto de la tenacidad del asfalto en la resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas. *Revista Ingeniería de Construcción*, 26(2), 224–239.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732011000200006>
- CE.010 Pavimentos urbanos, (2016). https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf
- Núñez, L. (2023). Capacidad portante del suelo: Introducción, definición y cálculo. *Inesa Tech*. <https://www.inesa-tech.com/blog/capacidad-portante-del-suelo>
- Ocete, I., Hernández del Pozo, C., Rubio, F., & Hernández Garvayo, C. (2018). La densidad seca como propiedad índice de los suelos para la determinación del grado de estabilidad en taludes y laderas. *Geotecnia Del Sur*. https://geotecnicadelsur.com/wp-content/uploads/2012/10/La-densidad-seca-como-propiedad-_ndice-de-los-suelos-para-_pdf
- Ortiz, A. (2017). *Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible*.
- P&H Construyendo Soluciones. (2022). *Importancia de las obras de drenaje en las carreteras*.
- Pari, R. (2018). Esfuerzos y deformaciones en el pavimento. *Civil Para El Mundo*.
- Pérez. (2019). *Diseño de la estructura de un Pavimento Flexible Aplicando el Método AASHTO-93, para el corredor Vial comprendido entre la Diagonal 65 – Cai Boston – Cruce vía Yuma en Barrancabermeja, Santander*. Universidad Militar Nueva Granada.

- Pérez, N., Garnica, P., & Mestas, N. (2016). El Módulo de Resiliencia: Cómo fluctúa después de la construcción del pavimento y cómo estimar estas fluctuaciones. *Instituto Mexicano Del Transporte*, 1(478).
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt478.pdf>
- Pinto, O. (2022). Imprimación Asfáltica. *Proceso Constructivo Imprimacion Construccion Autopista Regional Arequipa La Joya*.
- PSI. (2021). *Gráfica del concreto*.
- Puertos, E. C. C. y. (2015). *Ensayo de compactación. Proctor modificado*.
- Quezada, J. (2015). *Efecto del porcentaje de cemento asfáltico en pruebas de desempeño rueda deHamburgo (HWT), tracción indirecta (TSR) y adherencia pasiva* [Universidad Técnica Federico Santa Maria]. <http://hdl.handle.net/11673/42722>
- Retamal, F. A., & Rougier, V. C. (2022). Mechanical Behaviour, Properties and Characteristics of Foamed Cellular Concrete: A Review. *Advanced Materials Research*, 1170, 61–85. <https://doi.org/10.4028/p-ds0fcq>
- Reyes, F., Torres, A., Castaño, F., Herrera, J., Ruiz, A., & Rojas, L. (2011). Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible. *Pavimentos Flexibles*.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5051939.pdf>
- Rivera, J. (2022). *La Adherencia Entre Capas de un Pavimento Flexible*.
- Rodríguez, O. A. V. (2014). *Determinación de las Curvas Esfuerzo-Deformación sobre Cargas Axiales de una Raíz Tropical*.
- Rondon, H., & Reyes, F. (2009). Deformación permanente de materiales granulres en pavimentos flexibles: Estado del conocimiento. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14), 71–94. <https://www.redalyc.org/pdf/750/75012454006.pdf>
- Rovem Partner. (2023). *Medición de la deformación del suelo*.
- Roylance, D. (2022). Curvas de esfuerzo-deformación. *Libre Texts*.
https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingeniería_Mecánica/Mecánica_de_Materiales_%28Roylance%29/01%3A_Respuesta_a_la_Tensión_de_Materiales/1.04%3A_Curvas_de_esfuerzo-deformación
- Sampieri, H., Fernandez, C., & Baptista, P. (2018). *Metodología de la Investigación : Las Rutas Cuantitativas, Cualitativa y Mixta* (McGRAW-HILL (ed.); I).
- Sánchez, R. (2003). *Confiabilidad en el diseño estructural de pavimentos*. Universidad de los Andes.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2011). *CMT. Características de los materiales*.

- Sika. (2024). *Agente espumante para la fabricación de hormigón celular*.
<https://bol.sika.com/es/construccion-sika/concreto/esenciales-para-concreto/sika-poro-plus.html>
- Silva, O. (2022). *Propiedades y aplicaciones del concreto celular*.
<https://360enconcreto.com/blog/detalle/propiedades-y-aplicaciones-del-concreto-celular-1/>
- Structuralia. (2022). Todo sobre el análisis granulométrico y su curva. *Blog y Noticias Sobre Ingeniería*. <https://blog.structuralia.com/curva-y-analisis-granulometrico>
- Tella, L. (2024). Conservación de carreteras en Navarra: “Necesitamos pasar de los 40 millones de inversión a los 72 si queremos un buen mantenimiento.” *Radio Pamplona*.
- Thigolith. (2024). *Concreto Celular: Fabricación y Ventajas sobre el Concreto Tradicional*.
<https://thigolith.com/concreto-celular-fabricacion-y-ventajas-sobre-el-concreto-tradicional/>
- Universidad de Guanajuato. (2022). Ley de Hooke y el módulo de elasticidad. *Recursos Educativos Abiertos*. <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-1-ley-de-hooke-y-el-modulo-de-elasticidad/>
- URSA. (2020). *Paneles aislantes para cubiertas y pavimentos*.
- Vargas, P. (2008). *Estudio experimental de soluciones de construcción para asegurar la adherencia entre capas asfálticas* [Universidad de Chile].
https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2008/vargas_p/sources/vargas_p.pdf
- Villegas, O. (2013). *Capacidad de un material o estructura para resistir el desgaste, la degradación y las condiciones ambientales adversas durante su vida útil* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000687972/3/0687972.pdf>
- Vise, C. (2023). Importancia de la compactación de suelos. *Blog Vise*.
- Votatera. (2024). Módulo de Elasticidad | Tensión-Deformación, Rigidez y Análisis. *Modern Physics Insights*. <https://modern-physics.org/modulo-de-elasticidad-tension-deformacion-rigidez-y-analisis/>
- Yepes, V. (2013). ¿Qué es la curva de compactación de un suelo? *Blog de Victor Yepes*.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/09/05/curva-compactacion-suelo>
- Yepes, V. (2021). Introducción a los equipos de compactación mecánica. *Poli Blogs*.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/03/06/introduccion-a-los-equipos-de-compactacion-mecanica>
- Yepes, V. (2023). El hormigón para pavimentos de hormigón en carreteras. *Poli Blogs*.

Capítulo IX: Anexos

Anexo 1.

Matriz de consistencia

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores	Metodología	
¿Cuál es el efecto del reemplazo de material granular por material celular ligero en el comportamiento estructural a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?	Analizar experimentalmente el comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo de material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.	Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene una mejora en el comportamiento estructural del pavimento flexible del distrito de Sicuani - 2024.	VI: Material a nivel de Base	D1: Material celular ligero D2: Material granular de cantera	I1: Densidad I2: Diseño de mezcla I3: Módulo de Elasticidad I1: Granulometría I2: Plasticidad I3: CBR I4: Módulo Resiliente	Enfoque de investigación: Cuantitativo	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores		
¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en la capacidad de soporte a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?	Calcular la capacidad de soporte de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.	Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene un incremento en la capacidad de soporte a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.	VD1: Comportamiento estructural a nivel de base	D1: Capacidad de soporte	I1: Resistencia a la compresión I2: CBR	Método de investigación: Hipotético deductivo	
¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en el valor del módulo de elasticidad a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?	Estimar el módulo de elasticidad de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.	Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se obtiene una mejora en el módulo de elasticidad a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.		D2: Módulo de Elasticidad a nivel de base	I1: Esfuerzo axial I2: Deformación unitaria I3: Gráfica Esfuerzo - Deformación	Tipo de investigación: Aplicado Nivel de investigación: Descriptivo	
¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en el espesor de la base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?	Determinar el espesor más favorable de la base de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.	Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se optimiza los espesores a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.		D3: Espesor a nivel de base	I1: 100 mm I2: 150 mm I3: 200 mm I4: 250 mm I5: 300 mm	Diseño de investigación: Cuasiexperimental Técnica: Observación directa	
¿Cuál es el efecto que tendrá el reemplazo de material granular por material celular ligero en el espesor de la carpeta asfáltica en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024?	Determinar el espesor más favorable de la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles al reemplazar el material granular por material celular ligero en el distrito de Sicuani - 2024.	Al analizar experimentalmente el reemplazo del material granular con material celular ligero, se optimiza los espesores de la carpeta asfáltica en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024.		VD2: Carpeta asfáltica	D1: Espesor de la carpeta asfáltica	I1: Ejes Simples de 8.2 Ton I2: CBR I3: Módulo Resiliente I4: Espesor de la carpeta	Instrumento: Ficha de recolección de datos
¿Cuál es la alternativa técnico-económica más favorable, en términos de costo de inversión por kilómetro, entre el uso de material celular ligero y material granular a nivel de base en pavimentos flexibles?	Realizar un análisis comparativo del costo de inversión por kilómetro entre un pavimento con material celular ligero y un pavimento con material granular como capa estructural a nivel de base	El material celular ligero como capa estructural a nivel de base permite obtener una alternativa técnico-económica más favorable.		VD3: Evaluación Técnico-Económica	D1: Costo de inversión por kilómetro	I1: Costo de la base por Km I2: Costo total de inversión por Km	

Anexo 2.

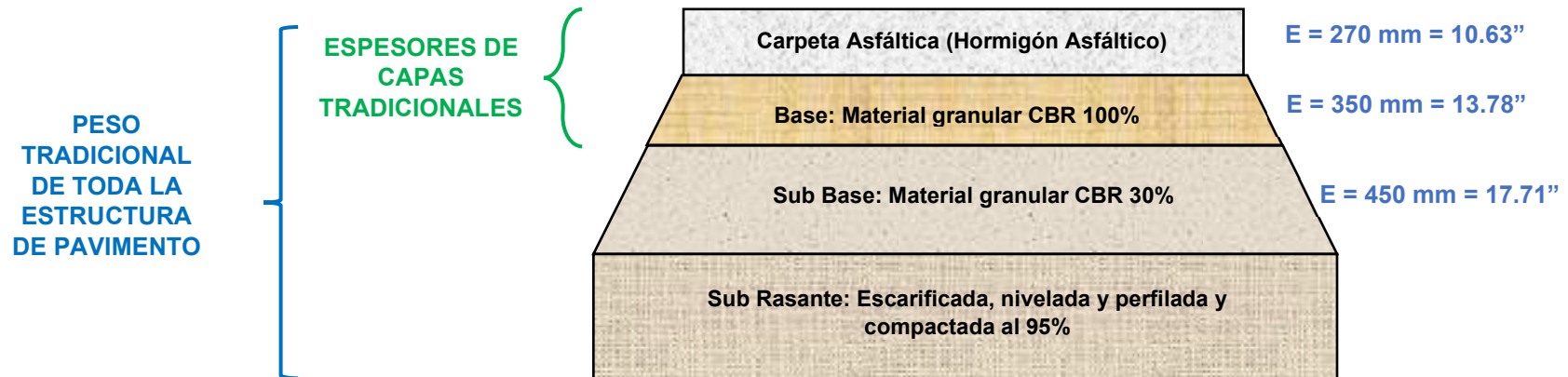
Matriz de operacionalización de variables

Variable Independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de medición	Escalas de medición
VI: Material a nivel de Base	El material celular ligero es un material de que se caracteriza por su baja densidad y su estructura porosa, lo que lo convierte en un material extremadamente liviano y altamente resistente. Se produce mediante la introducción de burbujas de aire en la mezcla cementicia, ya sea mediante la adición de un agente espumante o mediante la incorporación de aire comprimido.	Se analizará las propiedades internas del material celular ligero y el material para base granular utilizado en la vía en estudio, con lo cual se podrá identificar las ventajas de uno de ellos frente al otro antes de su conformación como material de base del pavimento flexible.	D1: Material celular ligero	I1: Densidad	ASTM C138	gr/cm ³
				I2: Diseño de mezcla	ASTM C150/C150M y ACI 211.1-91	Adimensional
				I3: Módulo de Elasticidad	ASTM C469	kg/cm ²
			El material granular se refiere a cualquier mezcla de partículas sólidas que tienen un tamaño relativamente uniforme y que pueden variar desde pequeñas partículas de arena hasta partículas más grandes como grava, piedras trituradas o incluso rocas. Este material granular proporciona soporte estructural al pavimento y distribuye las cargas del tráfico.	D2: Material granular de cantera	I1: Granulometría	ASTM D-422 Análisis granulométrico
	I2: Plasticidad				ASTM D-4318-95 Límites de Atterberg	%
	I3: CBR				ASTM D-4123 CBR	%
	I4: Módulo Resiliente				Ecuación Empírica $MR=2555 \times CBR^{0.64}$	psi
	Variable Dependiente		Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
VD1: Comportamiento estructural a nivel de base	El Comportamiento Estructural hace referencia a la capacidad del material celular ligero, utilizado como reemplazo de material granular a nivel de base en pavimentos flexibles, para resistir cargas aplicadas y mantener su integridad y funcionalidad sin experimentar fallas o deformaciones significativas.	Se realizará ensayos para determinar las propiedades de la capa estructural a nivel de base y determinar el comportamiento estructural de la configuración estructural planteada en el pavimento, posteriormente se analizará cual es el espesor de capa que ofrece mejores resultados tanto para el material celular ligero como para el material granular convencional.	D1: Capacidad de soporte	I1: Resistencia a la compresión	Ensayo de compresión	kg/cm ²
				I2: CBR	Ensayo CBR en laboratorio	%
			D2: Módulo de Elasticidad a nivel de base	I1: Esfuerzo axial	Ensayo de compresión	N/m ²
				I2: Deformación unitaria		mm
				I3: Gráfica Esfuerzo - Deformación		Adimensional
			D3: Espesor a nivel de base	I1: 100 mm	Vernier digital	mm
				I2: 150 mm		mm
				I3: 200 mm		mm
				I4: 250 mm		mm
				I5: 300 mm		mm
VD2: Carpeta asfáltica	La carpeta asfáltica actúa como una capa protectora que soporta el tráfico vehicular y protege la base del pavimento de los efectos del clima y el desgaste por uso. Su flexibilidad permite resistir las deformaciones causadas por las cargas del tráfico y las variaciones de temperatura.	Se determinará el espesor de la carpeta asfáltica en función de las propiedades físico-mecánicas de la base, ya que estas influyen en las tensiones y deformaciones que llegan a la carpeta y condicionan el espesor estructural requerido.	D1: Espesor de la carpeta asfáltica	I1: Ejes Simples de 8.2 Ton	Software WindePAV Hoja de Cálculo	ESALs
				I2: CBR		%
				I3: Módulo Resiliente		psi
				I4: Espesor de la carpeta		mm
VD3: Evaluación técnico - económica	Evaluación comparativa de alternativas estructurales en función del costo de inversión requerido para su implementación por unidad de longitud de vía.	Se realizará una comparación del costo de inversión por kilómetro entre las alternativas de pavimento con material celular ligero y con material granular convencional a nivel de base	D1: Costo de inversión por km	I1: Costo de la base por kilómetro	Hoja de cálculo	S/.
				I2: Costo total de la inversión por kilómetro		S/.

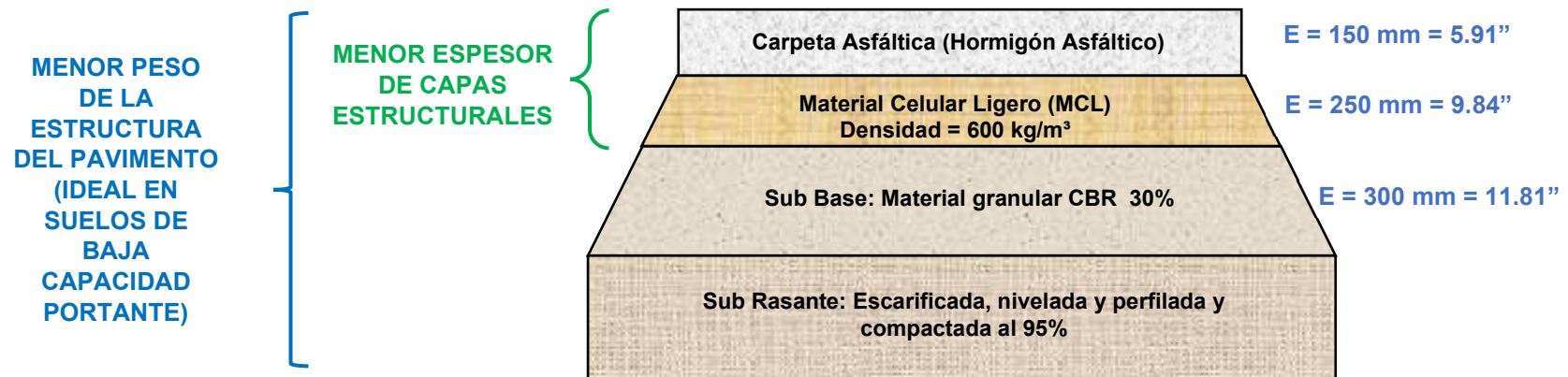
Anexo 3.

Propuesta de diseño esquematizada

CAPAS ESTRUCTURALES TRADICIONALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

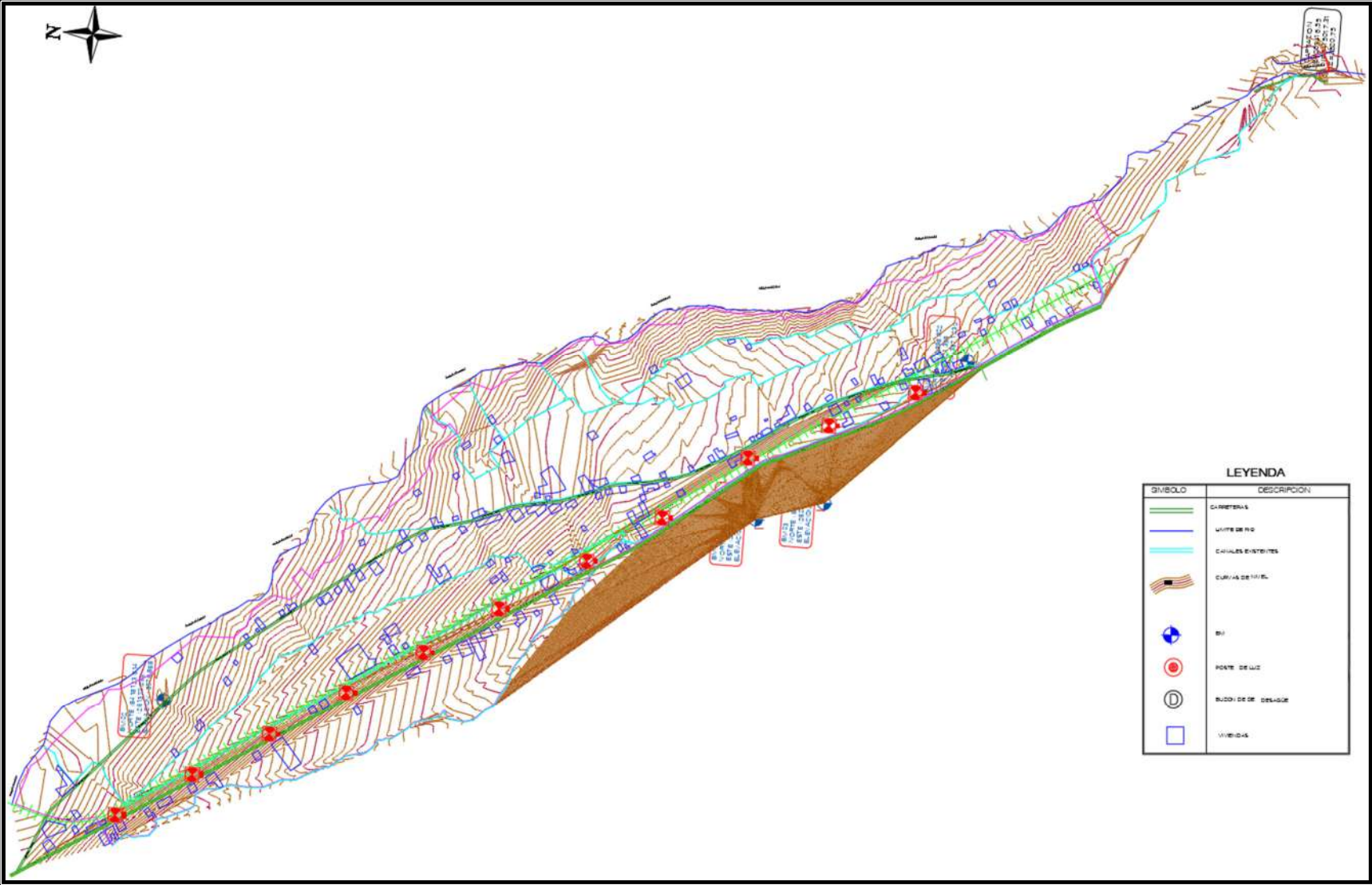


PROPUESTA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES



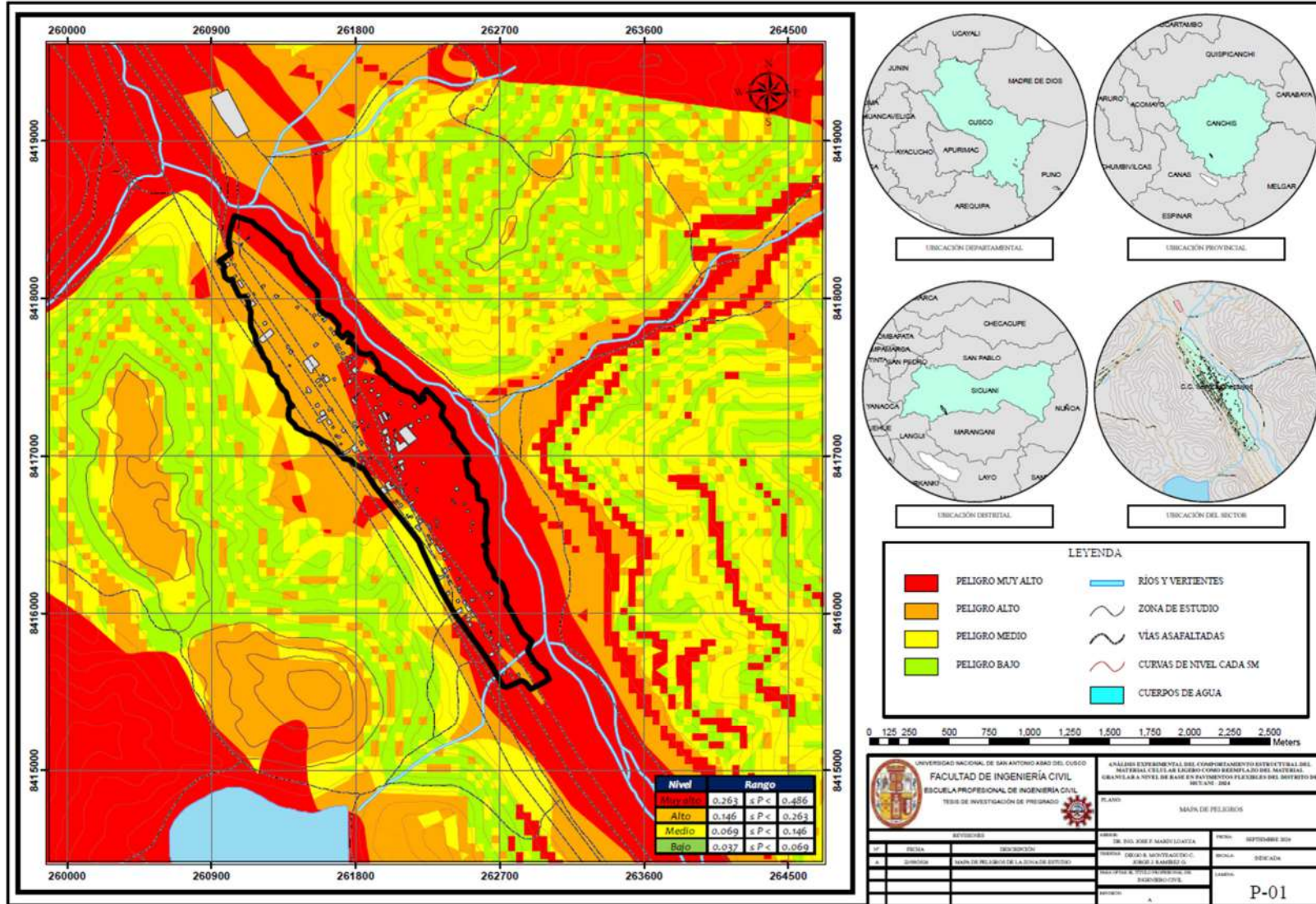
Anexo 4.

Mapa Topográfico



Anexo 5.

Mapa de Peligros



Anexo 6.

Formatos de campo de conteo y clasificación vehicular

Tabla 105.






















Volumen diario (lunes) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
		Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesis 01: Bach. Monteagudo Checca, Diego Royeyro Tesis 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhafler Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Maranganí Maranganí - Sicuani														Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sendido: Ambos Día: lunes, 07/10/2024							
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camion				Semitrayer				Trayer				Otros	Total	Porcentaje (%)
			Pick Up	Panel	Rural Conbi		2E	>-3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>-3S3	2T2	2T3	3T2	>-3T3				
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	2	7	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	20	1.17%
01:00 - 02:00	3	7	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	24	1.40%
02:00 - 03:00	2	7	2	1	3	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	23	1.34%
03:00 - 04:00	2	6	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	1.11%
04:00 - 05:00	4	12	3	1	6	1	1	2	3	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	37	2.16%
05:00 - 06:00	5	16	4	1	7	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	46	2.69%
06:00 - 07:00	8	24	6	2	11	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	2	-	76	4.44%
07:00 - 08:00	10	31	8	2	14	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	2	-	1	-	99	5.78%
08:00 - 09:00	11	33	9	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	103	6.02%
09:00 - 10:00	13	38	10	3	18	4	5	6	8	2	1	-	1	-	-	11	-	1	-	2	-	123	7.18%
10:00 - 11:00	11	33	9	3	16	3	4	5	7	2	1	-	2	-	-	10	-	2	-	1	-	109	6.37%
11:00 - 12:00	10	29	8	2	14	3	4	5	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	1	-	93	5.43%
12:00 - 13:00	8	25	7	2	12	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	2	-	2	-	81	4.73%
13:00 - 14:00	7	24	6	2	10	4	3	3	5	1	2	-	-	-	-	6	-	-	-	1	-	74	4.32%
14:00 - 15:00	7	20	5	1	9	2	2	3	4	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	1	-	62	3.62%
15:00 - 16:00	8	24	6	2	11	5	3	4	5	2	1	-	-	-	-	7	-	-	-	3	-	81	4.73%
16:00 - 17:00	8	24	6	2	11	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	1	-	75	4.38%
17:00 - 18:00	11	34	9	3	16	3	4	5	7	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	108	6.31%
18:00 - 19:00	14	41	11	3	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	2	-	1	-	131	7.65%
19:00 - 20:00	13	39	10	3	18	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	11	-	1	-	2	-	125	7.30%
20:00 - 21:00	9	27	7	2	13	3	3	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	1	-	86	5.02%
21:00 - 22:00	7	20	5	1	9	2	2	3	4	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	1	-	62	3.62%
22:00 - 23:00	4	12	3	1	5	1	1	2	3	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	36	2.10%
23:00 - 24:00	2	6	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	1.11%
Total	179	539	142	40	250	57	66	83	115	27	17	-	6	-	155	-	14	-	22	-	-	1,712	100.00%
IMDs	25.5714	77.0000	20.2857	5.7143	35.7143	8.1429	9.4286	11.8571	16.4286	3.8571	2.4286	-	0.8571	-	22.1429	-	2.0000	-	3.1429	-	-	244.5714	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	26.3224	79.2614	20.8815	5.8821	36.7632	8.3820	9.7055	12.2054	16.9110	3.6389	2.2911	-	0.8086	-	20.8899	-	1.8868	-	2.9650	-	-	248.7948	
IMDa Entero	27	80	21	6	37	9	10	13	17	4	3	-	1	-	21	-	2	-	3	-	-	249	

Nota: Elaboración propia

Tabla 106.






















Volumen diario (martes) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesisista 01: Bach. Montenegro Checca, Diego Royeyro Tesisista 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Maranganí Maranganí - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: martes, 08/10/2024																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camión			Semitrailer				Trayler				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	3	10	3	1	5	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	30	1.50%
01:00 - 02:00	2	6	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	0.95%
02:00 - 03:00	3	10	3	1	5	1	1	2	2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	31	1.55%
03:00 - 04:00	2	6	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	0.95%
04:00 - 05:00	3	10	3	1	5	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	32	1.60%
05:00 - 06:00	6	18	5	1	9	2	2	3	4	1	1	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	57	2.84%
06:00 - 07:00	10	29	8	2	14	3	4	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	-	3	94	4.69%
07:00 - 08:00	12	34	9	3	16	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	10	-	1	-	-	1	108	5.38%
08:00 - 09:00	14	42	11	3	20	4	5	7	9	2	2	-	1	-	-	12	-	2	1	2	-	137	6.83%
09:00 - 10:00	15	45	12	3	21	4	5	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	2	2	1	-	144	7.18%
10:00 - 11:00	13	39	10	3	18	4	5	6	9	2	1	-	2	-	-	11	-	1	-	-	1	125	6.23%
11:00 - 12:00	12	36	10	3	17	3	4	6	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	-	1	115	5.73%
12:00 - 13:00	10	30	8	2	14	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	-	1	97	4.84%
13:00 - 14:00	8	24	6	2	11	2	3	4	5	1	2	-	-	-	-	7	-	3	-	-	2	80	3.99%
14:00 - 15:00	8	23	6	2	11	5	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	-	1	77	3.84%
15:00 - 16:00	9	25	7	2	12	2	3	4	6	1	1	-	-	-	-	7	-	2	-	-	1	82	4.09%
16:00 - 17:00	10	29	8	2	14	3	4	6	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	-	1	92	4.59%
17:00 - 18:00	13	39	10	3	18	4	5	6	9	2	2	-	1	-	-	11	-	1	1	1	-	126	6.28%
18:00 - 19:00	17	50	13	4	23	5	6	8	11	3	1	-	1	-	-	14	-	2	1	2	-	161	8.03%
19:00 - 20:00	16	46	12	3	22	4	6	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	1	1	1	-	146	7.28%
20:00 - 21:00	10	31	8	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	-	1	99	4.94%
21:00 - 22:00	8	23	6	2	11	2	3	3	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	-	1	73	3.64%
22:00 - 23:00	4	12	3	1	6	1	1	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	38	1.89%
23:00 - 24:00	3	7	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	24	1.20%
Total	211	624	167	47	297	63	77	98	137	30	20	-	8	-	-	180	-	20	6	21	-	2,006	100.00%
IMDs	30.1429	89.1429	23.8571	6.7143	42.4286	9.0000	11.0000	14.0000	19.5714	4.2857	2.8571	-	1.1429	-	-	25.7143	-	2.8571	0.8571	3.0000	-	286.5714	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	31.0281	91.7608	24.5578	6.9115	43.6746	9.2643	11.3231	14.4112	20.1462	4.0432	2.6955	-	1.0782	-	-	24.2592	-	2.6955	0.8086	2.8302	-	291.4879	
IMDa Entero	32	92	25	7	44	10	12	15	21	5	3	-	2	-	-	25	-	3	1	3	-	292	

Nota: Elaboración propia

Tabla 107.






















Volumen diario (miércoles) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesis 01: Bach. Montenegro Checca, Diego Royeyro Tesis 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Maranganí Maranganí - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: miércoles, 09/10/2024																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camión			Semitrailer				Trayler				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	2	7	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	20	1.01%
01:00 - 02:00	3	8	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	25	1.26%
02:00 - 03:00	2	6	2	-	3	1	1	2	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	20	1.01%
03:00 - 04:00	2	6	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	0.96%
04:00 - 05:00	6	14	4	1	6	1	2	2	3	1	-	-	-	-	2	4	-	-	-	-	-	44	2.23%
05:00 - 06:00	5	15	4	1	7	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	45	2.28%
06:00 - 07:00	8	24	6	2	11	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	-	1	75	3.79%
07:00 - 08:00	12	35	9	3	16	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	111	5.61%
08:00 - 09:00	14	41	11	4	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	1	-	1	-	131	6.63%
09:00 - 10:00	15	44	12	3	21	4	5	7	10	2	2	-	2	-	-	13	-	1	1	1	-	143	7.23%
10:00 - 11:00	14	40	11	3	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	2	-	1	-	130	6.58%
11:00 - 12:00	12	34	9	3	16	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	110	5.56%
12:00 - 13:00	10	30	8	2	14	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	97	4.91%
13:00 - 14:00	9	26	7	2	12	3	3	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	1	-	84	4.25%
14:00 - 15:00	7	21	6	2	10	2	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1	68	3.44%
15:00 - 16:00	9	27	7	2	13	3	3	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	2	-	87	4.40%
16:00 - 17:00	11	31	8	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	100	5.06%
17:00 - 18:00	14	41	11	3	19	4	5	6	9	2	2	-	1	-	-	12	-	1	-	1	-	131	6.63%
18:00 - 19:00	17	51	13	4	24	5	6	8	11	3	1	-	2	-	-	15	-	1	1	1	-	163	8.24%
19:00 - 20:00	15	44	12	3	21	4	5	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	1	-	1	-	140	7.08%
20:00 - 21:00	10	31	8	2	14	3	3	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	2	-	1	-	98	4.96%
21:00 - 22:00	8	22	6	2	11	4	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	1	-	73	3.69%
22:00 - 23:00	5	14	4	1	6	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	43	2.18%
23:00 - 24:00	2	7	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	20	1.01%
Total	212	619	166	46	290	62	76	95	137	31	18	-	10	-	-	181	-	15	2	17	-	1,977	100.00%
IMDs	30.2857	88.4286	23.7143	6.5714	41.4286	8.8571	10.8571	13.5714	19.5714	4.4286	2.5714	-	1.4286	-	-	25.8571	-	2.1429	0.2857	2.4286	-	282.4286	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	31.1752	91.0256	24.4107	6.7644	42.6453	9.1173	11.1760	13.9700	20.1462	4.1780	2.4259	-	1.3477	-	-	24.3940	-	2.0216	0.2695	2.2911	-	287.3585	
IMDa Entero	32	92	25	7	43	10	12	14	21	5	3	-	2	-	-	25	-	3	1	3	-	288	

Nota: Elaboración propia

Tabla 108.






















Volumen diario (jueves) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesisista 01: Bach. Montenegro Checca, Diego Royeyro Tesisista 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Maranganí Maranganí - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: jueves, 10/10/2024																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camión			Semi-trayler				Trayler				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	2	7	2	1	3	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	22	0.96%
01:00 - 02:00	2	6	1	-	3	2	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	0.83%
02:00 - 03:00	3	7	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	24	1.05%
03:00 - 04:00	3	10	3	2	5	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	33	1.44%
04:00 - 05:00	4	12	3	1	6	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	39	1.70%
05:00 - 06:00	7	20	5	2	10	2	2	3	4	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1	64	2.80%
06:00 - 07:00	10	30	8	2	14	3	4	5	6	1	1	-	-	-	-	9	-	1	-	-	1	95	4.15%
07:00 - 08:00	15	43	11	3	20	5	5	7	9	2	1	-	1	-	-	13	-	1	1	1	-	138	6.03%
08:00 - 09:00	16	46	12	4	22	4	6	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	1	1	1	-	147	6.42%
09:00 - 10:00	17	51	13	4	24	5	7	8	11	3	1	-	1	1	-	15	-	1	2	1	-	164	7.17%
10:00 - 11:00	15	45	12	3	21	4	6	7	10	2	2	-	2	-	-	13	-	1	1	1	-	145	6.34%
11:00 - 12:00	14	40	11	3	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	2	1	1	-	131	5.73%
12:00 - 13:00	11	33	9	3	16	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	108	4.72%
13:00 - 14:00	10	31	8	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	99	4.33%
14:00 - 15:00	8	25	7	4	12	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	-	1	80	3.50%
15:00 - 16:00	11	32	8	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	101	4.41%
16:00 - 17:00	12	36	9	3	17	3	6	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	2	-	116	5.07%
17:00 - 18:00	16	46	12	3	22	4	6	7	10	2	2	-	1	1	-	13	-	1	1	1	-	147	6.42%
18:00 - 19:00	19	56	15	4	27	5	7	9	12	3	2	-	1	1	-	16	1	1	1	1	-	181	7.91%
19:00 - 20:00	18	54	14	4	25	5	7	8	12	3	2	-	3	1	-	15	1	1	1	1	-	175	7.65%
20:00 - 21:00	12	36	9	3	17	6	4	6	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	117	5.11%
21:00 - 22:00	8	24	6	2	11	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	1	-	75	3.28%
22:00 - 23:00	5	13	4	2	6	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	43	1.88%
23:00 - 24:00	3	8	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	25	1.09%
Total	241	711	186	59	338	71	92	111	156	36	21	-	14	2	206	2	15	9	18	-	2,288	100.00%	
IMDs	34.4286	101.5714	26.5714	8.4286	48.2857	10.1429	13.1429	15.8571	22.2857	5.1429	3.0000	-	2.0000	0.2857	29.4286	0.2857	2.1429	1.2857	2.5714	-	326.8571		
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	35.4397	104.5544	27.3518	8.6761	49.7038	10.4407	13.5288	16.3228	22.9402	4.8518	2.8302	-	1.8868	0.2695	27.7633	0.2695	2.0216	1.2130	2.4259	-	332.4902		
IMDa Entero	36	105	28	9	50	11	14	17	23	5	3	-	2	1	28	1	3	2	3	-	333		

Nota: Elaboración propia

Tabla 109.






















Volumen diario (viernes) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesis 01: Bach. Montenegro Checca, Diego Royeyro Tesis 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Maranganí Maranganí - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: viernes, 11/10/2024																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camión			Semitrailer				Trayler				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	2	6	1	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	18	0.82%
01:00 - 02:00	3	7	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	24	1.10%
02:00 - 03:00	2	7	2	-	3	1	1	3	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	22	1.01%
03:00 - 04:00	3	9	2	1	4	2	1	1	2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	28	1.28%
04:00 - 05:00	4	11	3	1	5	1	2	2	2	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	35	1.60%
05:00 - 06:00	5	15	4	1	7	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	45	2.06%
06:00 - 07:00	8	25	7	2	12	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	1	-	-	1	79	3.61%
07:00 - 08:00	13	38	10	3	18	4	5	6	8	2	1	-	1	-	-	11	-	1	-	-	1	122	5.57%
08:00 - 09:00	14	41	11	3	19	5	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	1	-	-	1	131	5.98%
09:00 - 10:00	17	49	13	4	23	5	6	7	11	2	1	-	1	-	-	14	-	1	1	1	-	156	7.13%
10:00 - 11:00	16	46	12	3	22	4	6	7	10	2	1	-	2	-	-	13	-	1	1	2	-	148	6.76%
11:00 - 12:00	13	38	10	4	18	4	5	6	8	2	2	-	1	-	-	11	-	2	-	-	1	125	5.71%
12:00 - 13:00	12	34	9	3	16	3	4	5	7	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	-	1	109	4.98%
13:00 - 14:00	10	31	8	2	15	3	4	5	8	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	-	1	100	4.57%
14:00 - 15:00	8	25	8	3	12	2	3	4	5	1	2	-	-	-	-	7	-	1	-	-	1	82	3.75%
15:00 - 16:00	10	30	8	2	14	5	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	-	1	99	4.52%
16:00 - 17:00	12	35	9	3	17	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	-	1	112	5.12%
17:00 - 18:00	16	47	12	4	22	4	6	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	1	1	2	-	149	6.81%
18:00 - 19:00	18	53	14	4	25	5	6	8	12	3	2	-	1	-	-	15	-	1	2	1	-	170	7.77%
19:00 - 20:00	16	48	13	4	23	5	6	7	10	2	1	-	1	-	-	14	-	1	1	1	-	153	6.99%
20:00 - 21:00	12	35	9	3	17	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	-	1	112	5.12%
21:00 - 22:00	9	26	7	2	12	2	3	4	6	1	1	-	-	-	-	7	-	1	-	-	1	82	3.75%
22:00 - 23:00	6	17	5	1	8	2	2	3	4	1	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	54	2.47%
23:00 - 24:00	4	11	3	1	5	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	34	1.55%
Total	233	684	182	55	324	69	85	106	149	34	19	-	12	-	196	-	17	6	18	-	2,189	100.00%	
IMDs	33.2857	97.7143	26.0000	7.8571	46.2857	9.8571	12.1429	15.1429	21.2857	4.8571	2.7143	-	1.7143	-	28.0000	-	2.4286	0.8571	2.5714	-	-	312.7143	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	34.2633	100.5840	26.7636	8.0879	47.6450	10.1466	12.4995	15.5876	21.9108	4.5823	2.5607	-	1.6173	-	26.4156	-	2.2911	0.8086	2.4259	-	-	318.1898	
IMDa Entero	35	101	27	9	48	11	13	16	22	5	3	-	2	-	27	-	3	1	3	-	-	319	

Nota: Elaboración propia

Tabla 110.






















Volumen diario (sábado) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesisista 01: Bach. Montenegro Checca, Diego Royeyro Tesisista 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Maranganí Maranganí - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: sábado, 12/10/2024																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camión			Semi-trayler				Trayler				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	3	10	3	1	5	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	32	1.49%
01:00 - 02:00	3	8	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	25	1.17%
02:00 - 03:00	3	9	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	27	1.26%
03:00 - 04:00	3	8	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	25	1.17%
04:00 - 05:00	6	19	5	1	9	2	2	3	4	1	1	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	58	2.70%
05:00 - 06:00	7	21	6	2	10	2	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1	68	3.17%
06:00 - 07:00	10	29	8	2	13	3	4	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	-	2	92	4.29%
07:00 - 08:00	13	39	10	3	18	4	5	6	8	2	1	-	1	-	-	11	-	1	-	1	-	123	5.73%
08:00 - 09:00	14	41	11	3	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	1	-	1	-	130	6.06%
09:00 - 10:00	15	46	12	3	21	4	6	7	10	2	2	-	1	1	-	13	-	1	1	-	1	145	6.76%
10:00 - 11:00	14	40	11	3	19	4	5	6	9	2	1	-	2	-	-	12	-	2	-	1	-	131	6.11%
11:00 - 12:00	12	35	9	3	17	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	112	5.22%
12:00 - 13:00	10	31	8	4	14	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	100	4.66%
13:00 - 14:00	9	27	7	2	13	3	3	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	1	-	86	4.01%
14:00 - 15:00	7	21	6	2	10	2	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1	68	3.17%
15:00 - 16:00	8	25	7	2	12	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	2	-	79	3.68%
16:00 - 17:00	11	32	8	2	15	3	4	5	7	2	2	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	102	4.76%
17:00 - 18:00	14	40	11	4	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	1	-	1	-	130	6.06%
18:00 - 19:00	17	49	13	4	23	5	6	8	11	2	1	-	1	-	-	14	-	1	1	1	-	157	7.32%
19:00 - 20:00	15	44	12	3	21	4	5	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	2	1	2	-	143	6.67%
20:00 - 21:00	11	33	9	2	16	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	10	-	1	-	1	-	105	4.90%
21:00 - 22:00	9	27	7	2	12	3	3	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	1	-	85	3.96%
22:00 - 23:00	7	22	6	2	10	2	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1	69	3.22%
23:00 - 24:00	6	17	4	1	8	2	2	3	4	1	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	53	2.47%
Total	227	673	179	54	316	66	83	102	149	32	21	-	9	-	-	194	-	16	3	21	-	2,145	100.00%
IMDs	32.4286	96.1429	25.5714	7.7143	45.1429	9.4286	11.8571	14.5714	21.2857	4.5714	3.0000	-	1.2857	-	-	27.7143	-	2.2857	0.4286	3.0000	-	306.4286	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	33.3809	98.9664	26.3224	7.9408	46.4686	9.7055	12.2054	14.9994	21.9108	4.3127	2.8302	-	1.2130	-	-	26.1460	-	2.1564	0.4043	2.8302	-	311.7932	
IMDa Entero	34	99	27	8	47	10	13	15	22	5	3	-	2	-	-	27	-	3	1	3	-	312	

Nota: Elaboración propia

Tabla 111.






















Volumen diario (domingo) clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesisista 01: Bach. Montenegro Checca, Diego Royeyro Tesisista 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Marangani Marangani - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: domingo, 13/10/2024																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camión			Semi-trayler				Trayler				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	4	12	3	1	6	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	39	1.94%
01:00 - 02:00	2	7	2	1	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	21	1.04%
02:00 - 03:00	3	7	2	1	4	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	24	1.19%
03:00 - 04:00	2	6	2	-	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	19	0.94%
04:00 - 05:00	5	15	4	1	7	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	45	2.24%
05:00 - 06:00	7	22	6	2	10	2	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	69	3.43%
06:00 - 07:00	10	30	8	2	14	3	4	5	6	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	-	1	96	4.77%
07:00 - 08:00	12	35	9	3	17	3	4	5	8	2	1	-	1	-	-	10	-	1	-	1	-	112	5.56%
08:00 - 09:00	13	37	10	3	17	4	5	6	8	2	2	-	2	-	-	11	-	1	-	1	-	122	6.06%
09:00 - 10:00	14	40	11	3	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	12	-	2	1	2	-	132	6.56%
10:00 - 11:00	13	40	10	3	19	4	5	6	9	2	1	-	1	-	-	11	-	1	1	1	-	127	6.31%
11:00 - 12:00	11	32	8	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	101	5.02%
12:00 - 13:00	10	29	8	2	13	3	4	4	6	1	1	-	-	-	-	8	-	1	-	2	-	92	4.57%
13:00 - 14:00	8	24	6	2	11	2	3	4	5	1	2	-	-	-	-	7	-	-	-	1	-	76	3.78%
14:00 - 15:00	7	21	6	2	10	4	3	3	5	1	1	-	-	-	-	6	-	-	-	1	-	70	3.48%
15:00 - 16:00	8	23	6	2	11	2	3	4	5	1	1	-	-	-	-	7	-	-	-	1	-	74	3.68%
16:00 - 17:00	10	30	8	2	14	3	4	5	6	2	2	-	-	-	-	9	-	1	-	2	-	98	4.87%
17:00 - 18:00	13	37	10	3	17	4	5	6	8	2	1	-	1	-	-	11	-	1	-	1	-	120	5.96%
18:00 - 19:00	16	46	12	3	22	4	6	7	10	2	2	-	1	-	-	13	-	1	2	1	-	148	7.35%
19:00 - 20:00	15	44	12	3	21	4	5	7	10	2	1	-	1	-	-	13	-	1	1	1	-	141	7.00%
20:00 - 21:00	11	32	9	2	15	3	4	5	7	2	1	-	-	-	-	9	-	1	-	1	-	102	5.07%
21:00 - 22:00	9	26	7	2	12	4	3	4	6	1	1	-	-	-	-	7	-	1	-	1	-	84	4.17%
22:00 - 23:00	6	18	5	1	9	2	2	3	4	1	1	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	57	2.83%
23:00 - 24:00	5	14	4	1	7	1	2	2	3	1	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	44	2.19%
Total	214	627	168	47	296	64	81	97	137	32	22	-	8	-	-	181	-	14	5	20	-	2,013	100.00%
IMDs	30.5714	89.5714	24.0000	6.7143	42.2857	9.1429	11.5714	13.8571	19.5714	4.5714	3.1429	-	1.1429	-	-	25.8571	-	2.0000	0.7143	2.8571	-	287.5714	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	31.4693	92.2020	24.7048	6.9115	43.5276	9.4114	11.9113	14.2641	20.1462	4.3127	2.9650	-	1.0782	-	-	24.3940	-	1.8868	0.6739	2.6955	-	292.5541	
IMDa Entero	32	93	25	7	44	10	12	15	21	5	3	-	2	-	-	25	-	2	1	3	-	293	

Nota: Elaboración propia

Tabla 112.

Volumen semanal clasificado - Estación Grifo Dorado SAC

Formato de Clasificación Vehicular																							
Estudio de tráfico																							
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesista 01: Bach. Monteagudo Checca, Diego Royeyro Tesista 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaiffet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani		Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Día: Restumen semanal																					
Hora	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camion			Semitrayer				Trayer				Otros	Total	Porcentaje (%)	
Hora de Inicio	Hora de Fin																						
00:00 - 01:00	18	59	16	4	28	7	8	9	12	2	-	-	-	-	-	18	-	-	-	-	-	181	1.26%
01:00 - 02:00	18	49	13	5	25	8	7	7	11	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	157	1.10%
02:00 - 03:00	18	53	15	5	26	7	7	11	12	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	-	171	1.19%
03:00 - 04:00	17	51	15	4	25	8	7	8	10	1	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	162	1.13%
04:00 - 05:00	32	93	25	7	44	8	12	15	20	7	1	-	-	-	-	26	-	-	-	-	-	290	2.02%
05:00 - 06:00	42	127	34	10	60	11	16	18	27	7	4	-	-	-	-	35	-	-	-	-	3	394	2.75%
06:00 - 07:00	64	191	51	14	89	18	25	30	39	8	7	-	-	-	-	55	-	-	5	-	11	607	4.24%
07:00 - 08:00	87	255	66	20	119	25	31	39	55	14	7	-	-	5	-	74	-	-	8	1	7	813	5.67%
08:00 - 09:00	96	281	75	22	131	28	35	43	61	14	9	-	-	7	-	81	-	-	8	2	8	901	6.29%
09:00 - 10:00	106	313	83	23	147	30	39	48	69	15	9	-	-	8	-	91	-	-	9	8	9	1,007	7.03%
10:00 - 11:00	96	283	75	21	134	27	36	43	63	14	8	-	-	12	-	82	-	-	10	3	8	915	6.39%
11:00 - 12:00	84	244	65	20	116	23	30	38	54	13	8	-	-	5	-	70	-	-	9	1	7	787	5.49%
12:00 - 13:00	71	212	57	18	99	20	27	33	47	12	7	-	-	2	-	62	-	-	8	-	9	684	4.77%
13:00 - 14:00	61	187	48	14	87	20	23	29	42	9	10	-	-	-	-	54	-	-	7	-	8	599	4.18%
14:00 - 15:00	52	156	44	16	74	19	20	24	34	7	8	-	-	-	-	45	-	-	1	-	7	507	3.54%
15:00 - 16:00	63	186	49	14	88	22	23	30	41	10	7	-	-	-	-	54	-	-	5	-	11	603	4.21%
16:00 - 17:00	74	217	56	16	103	20	29	33	47	12	9	-	-	2	-	62	-	-	6	-	9	695	4.85%
17:00 - 18:00	97	284	75	23	133	27	36	43	62	14	10	-	-	7	-	82	-	-	7	3	8	911	6.36%
18:00 - 19:00	118	346	91	26	163	33	42	54	76	18	10	-	-	8	1	99	-	-	9	8	8	1,111	7.75%
19:00 - 20:00	108	319	85	23	151	30	39	49	71	15	8	-	-	9	1	92	-	-	8	5	9	1,023	7.14%
20:00 - 21:00	75	225	59	16	107	24	26	35	50	13	7	-	-	2	-	65	-	-	8	-	7	719	5.02%
21:00 - 22:00	58	168	44	13	78	19	20	25	37	7	7	-	-	-	-	48	-	-	3	-	7	534	3.73%
22:00 - 23:00	37	108	30	9	50	10	13	17	25	7	2	-	-	-	-	31	-	-	-	-	1	340	2.37%
23:00 - 24:00	25	70	19	5	34	8	9	11	15	3	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	219	1.53%
Total	1,517	4,477	1,190	348	2,111	452	560	692	980	222	138	-	-	67	2	1,293	2	111	31	137	-	14,330	100.00%
IMDs	216.7143	639.5714	170.0000	49.7143	301.5714	64.5714	80.0000	98.8571	140.0000	31.7143	19.7143	-	-	9.5714	0.2857	184.7143	0.2857	15.8571	4.4286	19.5714	-	2,047.1429	
FCm	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	0.9434	19.6419	
IMDa	223.0788	658.3545	174.9926	51.1743	310.4281	66.4678	82.3495	101.7604	144.1116	29.9197	18.5987	-	-	9.0298	0.2695	174.2619	0.2695	14.9598	4.1780	18.4639	-	2,082.6684	
IMDa Entero	224	659	175	52	311	67	83	102	145	30	19	-	-	10	1	175	1	15	5	19	-	2,083	






















Nota: Elaboración propia

Anexo 7.

Formato de proyección de crecimiento de tráfico vehicular

Tabla 113.

Proyección del Tráfico (IMD)

Formato de Proyección del Tráfico																						
Estudio de tráfico																						
 Tesis: Análisis experimental del comportamiento estructural del material celular ligero como reemplazo del material granular a nivel de base en pavimentos flexibles del distrito de Sicuani - 2024 Tesisista 01: Bach. Monteagudo Checca, Diego Royeyro Tesisista 02: Bach. Ramirez Guillen, Jorge Jhaifet Para optar el título: Ingeniero Civil Tramo de la vía: Sicuani - Marangani, Marangani - Sicuani																Estación: Grifo el Dorado SAC Código de la Estación: E1 Ubicación: E: 262520.00; N: 8415844.00 Sentido: Ambos Año: 2024-2034						
	IMDa	Auto	Station Wagon	Camionetas			Micro	Bus		Camion			Semitrayler					Trayler				Otros
																						
2024	224	659	175	52	311	55	76	94	133	30	19	-	10	1	175	1	15	5	19	-	2,054	100.00%
r	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	0.75%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%	4.43%		
2025	226	664	176	52	313	55	77	95	134	31	20	-	10	1	183	1	16	5	20	-	2,080	101.24%
2026	227	669	178	53	316	56	77	95	135	33	21	-	11	1	191	1	16	5	21	-	2,106	102.52%
2027	229	674	179	53	318	56	78	96	136	34	22	-	11	1	199	1	17	6	22	-	2,133	103.82%
2028	231	679	180	54	320	57	78	97	137	36	23	-	12	1	208	1	18	6	23	-	2,160	105.16%
2029	233	684	182	54	323	57	79	98	138	37	24	-	12	1	217	1	19	6	24	-	2,188	106.54%
2030	234	689	183	54	325	58	79	98	139	39	25	-	13	1	227	1	19	6	25	-	2,217	107.95%
2031	236	694	184	55	328	58	80	99	140	41	26	-	14	1	237	1	20	7	26	-	2,247	109.40%
2032	238	700	186	55	330	58	81	100	141	42	27	-	14	1	248	1	21	7	27	-	2,278	110.88%
2033	240	705	187	56	333	59	81	101	142	44	28	-	15	1	259	1	22	7	28	-	2,309	112.41%
2034	241	710	189	56	335	59	82	101	143	46	29	-	15	2	270	2	23	8	29	-	2,341	113.98%

Nota: Elaboración propia

Anexo 8.

Análisis de Precios Unitarios de base propuesta y base tradicional

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS - BASE GRANULAR		Rendimiento:80 m ³ /Día				
		Costo unitario por m ³				S/ 138.53
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						S/ 4.20
471060003	Operario	hh	1.00	0.10	S/ 13.00	S/ 1.30
471060002	Oficial	hh	1.00	0.10	S/ 11.00	S/ 1.10
471060004	Peón	hh	1.00	0.10	S/ 9.00	S/ 0.90
471060005	Topógrafo	hh	0.50	0.05	S/ 18.00	S/ 0.90
MATERIALES						S/ 80.20
40010001	Material granular selecto	m ³	-	1.00	S/ 80.00	S/ 80.00
391060001	Agua	m ³	-	0.05	S/ 4.00	S/ 0.20
EQUIPO						S/ 54.13
490010139	Motoniveladora 125 hp	hm	1.00	0.10	S/ 220.00	S/ 22.00
490010140	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135 HP 10-12 tn	hm	1.00	0.10	S/ 180.00	S/ 18.00
480010138	Camión cisterna 4x2 agua 122HP 1,500	hm	1.00	0.10	S/ 140.00	S/ 14.00
370010001	Herramientas	%mo	-	3.00	S/ 4.20	S/ 0.13

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS - MCL - 400 kg/m ³		Rendimiento:60 m ³ /Día				
---	--	------------------------------------	--	--	--	--

						Costo unitario por m ³	S/ 273.46
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA							S/ 5.60
471060003	Operario	hh	1.00	0.13	S/ 13.00	S/ 1.73	
471060002	Oficial	hh	1.00	0.13	S/ 11.00	S/ 1.47	
471060004	Peón	hh	1.00	0.13	S/ 9.00	S/ 1.20	
471060005	Topógrafo	hh	0.50	0.07	S/ 18.00	S/ 1.20	
MATERIALES							S/ 267.69
801060001	MCL p=400 kg/m3	m ³	-	1.00	S/ 266.89	S/ 266.89	
391060001	Agua	m ³	-	0.20	S/ 4.00	S/ 0.80	
EQUIPO							S/ 0.17
370010001	Herramientas	%mo	-	3.00	S/ 5.60	S/ 0.17	

						Rendimiento:60 m ³ /Día	
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS - MCL - 500 kg/m3						Costo unitario por m ³	S/ 314.09
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA							S/ 5.60
471060003	Operario	hh	1.00	0.13	S/ 13.00	S/ 1.73	
471060002	Oficial	hh	1.00	0.13	S/ 11.00	S/ 1.47	
471060004	Peón	hh	1.00	0.13	S/ 9.00	S/ 1.20	
471060005	Topógrafo	hh	0.50	0.07	S/ 18.00	S/ 1.20	
MATERIALES							S/ 308.32
800010001	MCL p=500 kg/m3	m ³	-	1.00	S/ 307.52	S/ 307.52	
391060001	Agua	m ³	-	0.20	S/ 4.00	S/ 0.80	
EQUIPO							S/ 0.17
370010001	Herramientas	%mo	-	3.00	S/ 5.60	S/ 0.17	

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS - MCL - 600 kg/m3						Rendimiento: 60 m ³ /Día	
---	--	--	--	--	--	-------------------------------------	--

						Costo unitario por m ³	S/ 354.71
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA							S/ 5.60
471060003	Operario	hh	1.00	0.13	S/ 13.00	S/ 1.73	
471060002	Oficial	hh	1.00	0.13	S/ 11.00	S/ 1.47	
471060004	Peón	hh	1.00	0.13	S/ 9.00	S/ 1.20	
471060005	Topógrafo	hh	0.50	0.07	S/ 18.00	S/ 1.20	
MATERIALES							S/ 348.94
800010002	MCL p=600 kg/m3	m ³	-	1.00	S/ 348.14	S/ 348.14	
391060001	Agua	m ³	-	0.20	S/ 4.00	S/ 0.80	
EQUIPO							S/ 0.17
370010001	Herramientas	%mo	-	3.00	S/ 5.60	S/ 0.17	

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS - MCL - 700 kg/m3						Rendimiento: 60 m ³ /Día	
						Costo unitario por m ³	S/ 395.34
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA							S/ 5.60
471060003	Operario	hh	1.00	0.13	S/ 13.00	S/ 1.73	
471060002	Oficial	hh	1.00	0.13	S/ 11.00	S/ 1.47	
471060004	Peón	hh	1.00	0.13	S/ 9.00	S/ 1.20	
471060005	Topógrafo	hh	0.50	0.07	S/ 18.00	S/ 1.20	
MATERIALES							S/ 389.57
800010003	MCL p=700 kg/m3	m ³	-	1.00	S/ 388.77	S/ 388.77	
391060001	Agua	m ³	-	0.20	S/ 4.00	S/ 0.80	
EQUIPO							S/ 0.17
370010001	Herramientas	%mo	-	3.00	S/ 5.60	S/ 0.17	

Anexo 9.
Panel Fotográfico

Figura 92.
Vía de Estudio



Nota: Elaboración propia

Figura 93.
Vía de Estudio



Nota: Elaboración propia

Figura 94.
Vía de Estudio



Nota: Elaboración propia

Figura 95.
Vía de Estudio



Nota: Elaboración propia

Figura 96.
Vía de Estudio



Nota: Elaboración propia

Figura 97.
Exploración de Calicatas



Nota: Elaboración propia

Figura 98.

Excavación de calicatas con maquinaria



Nota: Elaboración propia

Figura 99.

Exploración de calicatas



Nota: Elaboración propia

Figura 100.

Exploración de calicatas



Nota: Elaboración propia

Figura 101.

Exploración de calicatas



Nota: Elaboración propia

Figura 102.

Determinación de cantera - Chihuaco



Nota: Elaboración propia

Figura 103.

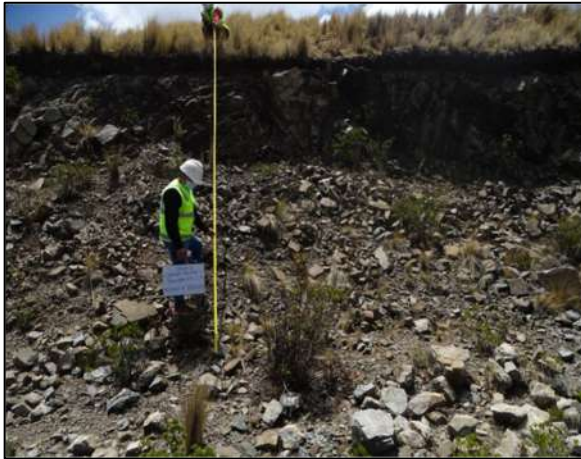
Caracterización de cantera Chihuaco



Nota: Elaboración propia

Figura 104.

Determinación de cantera - Chihuaco



Nota: Elaboración propia

Figura 105.

Visualización de perfil de cantera Chihuaco



Nota: Elaboración propia

Figura 106.

Toma de muestras de cantera - Chihuaco



Nota: Elaboración propia

Figura 107.

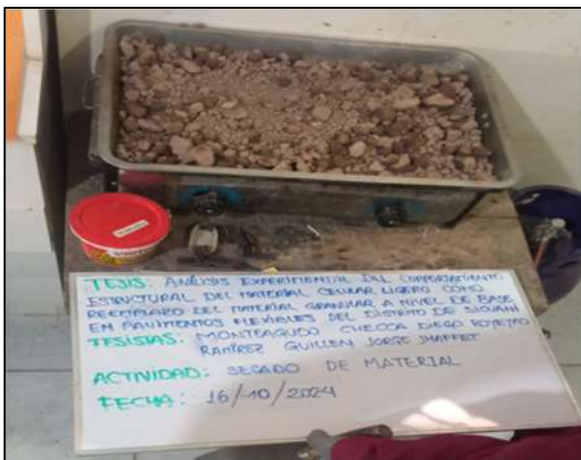
Toma de muestras de cantera Chihuaco



Nota: Elaboración propia

Figura 108.

Secado de material extraído



Nota: Elaboración propia

Figura 109.

Ensayo de granulometría



Nota: Elaboración propia

Figura 110.
Pesado de muestras correspondientes



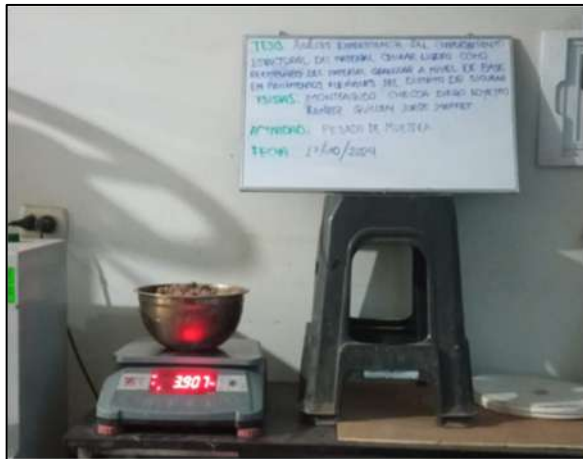
Nota: Elaboración propia

Figura 111.
Secado de muestras extraídas



Nota: Elaboración propia

Figura 112.
Pesado de muestras secas



Nota: Elaboración propia

Figura 113.
Ensayo Granulométrico por tamizado



Nota: Elaboración propia

Figura 114.
Ensayo Granulométrico por tamizado



Nota: Elaboración propia

Figura 115.
Ensayo de granulometría



Nota: Elaboración propia

Figura 116.
Tamices utilizados en el ensayo



Nota: Elaboración propia

Figura 117.
Instrumentos de laboratorio



Nota: Elaboración propia

Figura 118.
Calibración de equipos



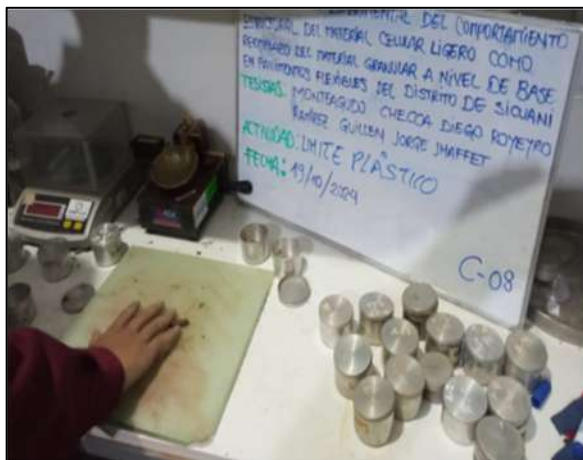
Nota: Elaboración propia

Figura 119.
Equipos para el ensayo de Limite Plástico



Nota: Elaboración propia

Figura 120.
Trabajos con muestra para el ensayo LP



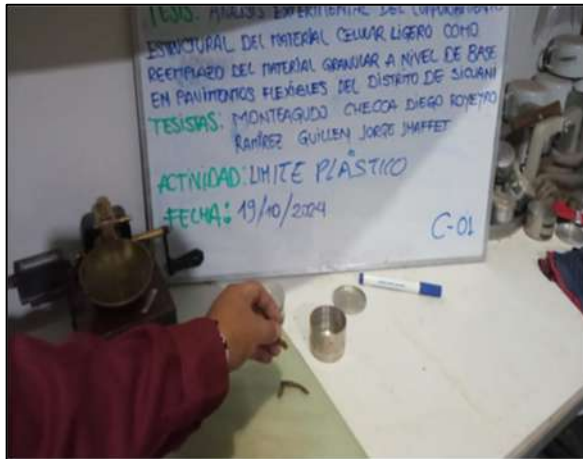
Nota: Elaboración propia

Figura 121.
Ensayo de granulometría



Nota: Elaboración propia

Figura 122.
Colocación de muestras para pesado



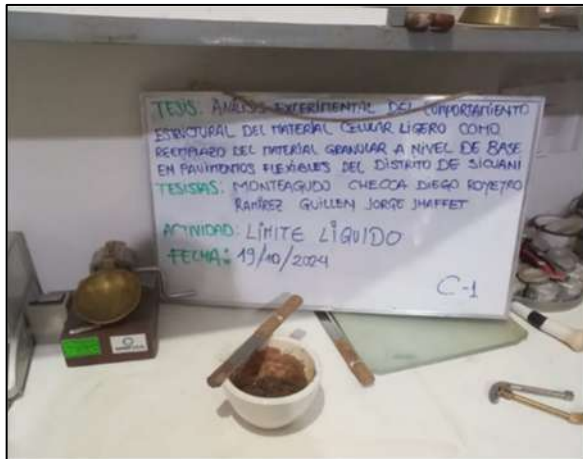
Nota: Elaboración propia

Figura 123.
Pesado de muestras ensayadas



Nota: Elaboración propia

Figura 124.
Instrumentos para ensayo L. Líquido



Nota: Elaboración propia

Figura 125.
Trabajos para el ensayo de L. Líquido



Nota: Elaboración propia

Figura 126.
Saturación de muestras con probeta



Nota: Elaboración propia

Figura 127.
Muestras ensayadas a pesarse



Nota: Elaboración propia

Figura 128.

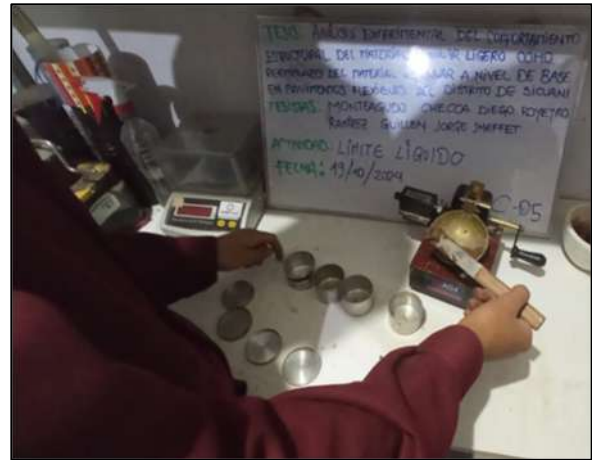
Trabajos de laboratorio para el ensayo LL



Nota: Elaboración propia

Figura 129.

Ensayo empleando el método de Casagrande



Nota: Elaboración propia

Figura 130.

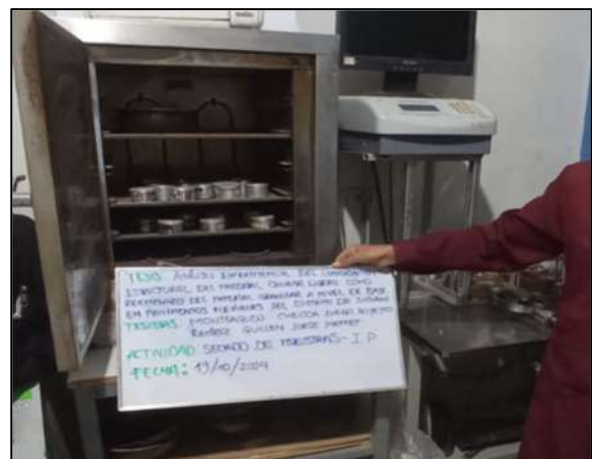
Muestras a ser secadas en Horno



Nota: Elaboración propia

Figura 131.

Secado de muestras en horno



Nota: Elaboración propia

Figura 132.

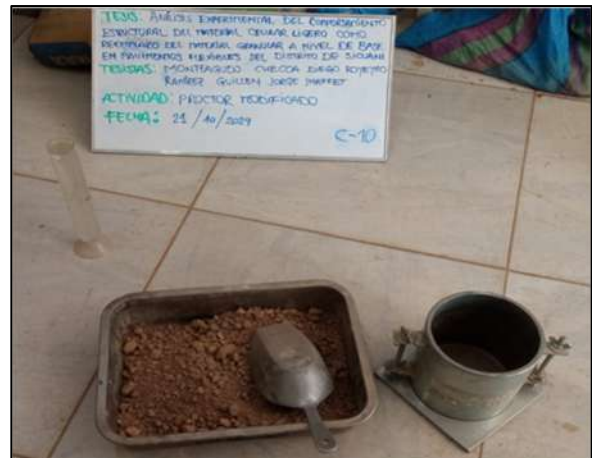
Tamizado de muestras para E. de Proctor



Nota: Elaboración propia

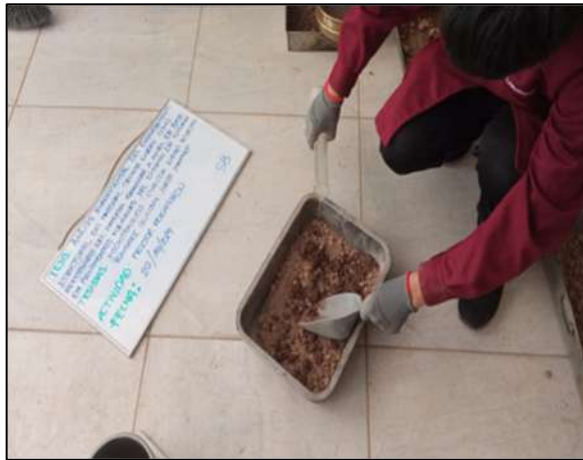
Figura 133.

Muestra a ser ensayada



Nota: Elaboración propia

Figura 134.
Saturación de muestras con probeta graduada



Nota: Elaboración propia

Figura 135.
Compactación de muestra con el martillo



Nota: Elaboración propia

Figura 136.
Instrumentos de laboratorio para P.M.



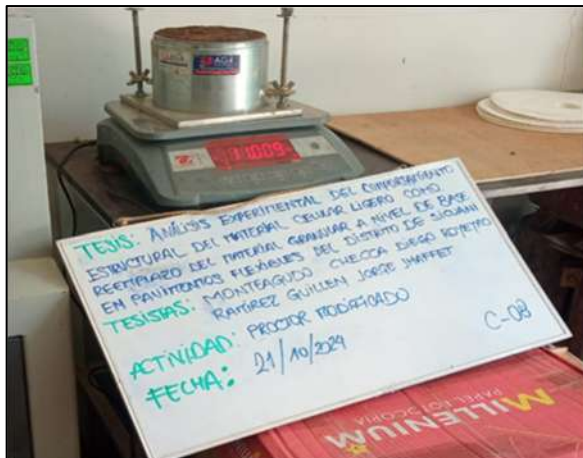
Nota: Elaboración propia

Figura 137.
Enrase de muestra



Nota: Elaboración propia

Figura 138.
Peso de molde y muestra



Nota: Elaboración propia

Figura 139.
Compactación de muestra por capas



Nota: Elaboración propia

Figura 140.
Pesado de molde y muestra compactada



Nota: Elaboración propia

Figura 141.
Muestras para ser secadas en el horno



Nota: Elaboración propia

Figura 142.
Muestra para el ensayo CBR



Nota: Elaboración propia

Figura 143.
Compactación de muestras con martillo



Nota: Elaboración propia

Figura 144.
Enrase de muestra para CBR



Nota: Elaboración propia

Figura 145.
Peso de muestra y molde de CBR



Nota: Elaboración propia

Figura 146.

Preparación de muestras a ensayar



Nota: Elaboración propia

Figura 147.

Sobrecargas instaladas y deformímetro



Nota: Elaboración propia

Figura 148.

Muestras preparadas para ser saturadas



Nota: Elaboración propia

Figura 149.

Lecturas de expansión de muestras



Nota: Elaboración propia

Figura 150.

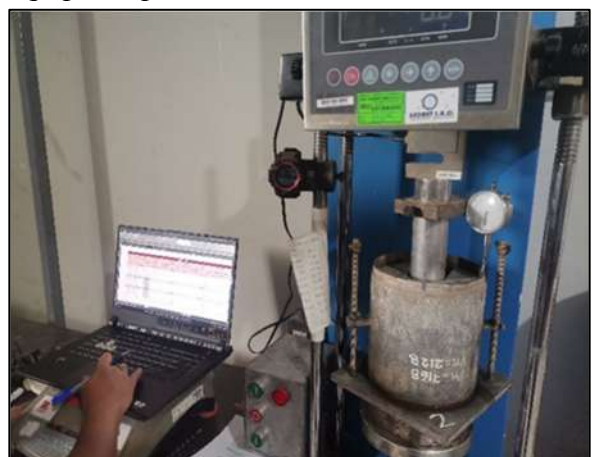
Drenaje de muestras



Nota: Elaboración propia

Figura 151.

Equipo de penetración de muestras



Nota: Elaboración propia

Figura 152.
Deformímetro en el ensayo de penetración



Nota: Elaboración propia

Figura 153.
Carga aplicada para muestra ensayada



Nota: Elaboración propia

Figura 154.
Verificación del ensayo en laboratorio



Nota: Elaboración propia

Figura 155.
Caracterización del MCL



Nota: Elaboración propia

Figura 156.
Mesa de trabajo para caracterización de MCL



Nota: Elaboración propia

Figura 157.
Homogeneización de mortero



Nota: Elaboración propia

Figura 158.
Homogeneización de mortero



Nota: Elaboración propia

Figura 160.
Desencofrado de especímenes a los 28 días



Nota: Elaboración propia

Figura 162.
Instalación de equipos para el ensayo



Nota: Elaboración propia

Figura 159.
Especímenes en probetas de 4"x 8"



Nota: Elaboración propia

Figura 161.
Especímenes a ensayarse



Nota: Elaboración propia

Figura 163.
Ensayo de compresión con deformímetros



Nota: Elaboración propia

Figura 164.
Muestra MCL y deformímetros



Nota: Elaboración propia

Figura 165.
Rotura de muestra MCL



Nota: Elaboración propia

Figura 166.
Retiro de muestras ensayadas



Nota: Elaboración propia

Figura 167.
Composición interna MCL $\rho = 600\text{kg/m}^3$



Nota: Elaboración propia

Figura 168.
Composición interna MCL $\rho = 400\text{kg/m}^3$



Nota: Elaboración propia

Figura 169.
Composición interna MCL $\rho = 800\text{kg/m}^3$




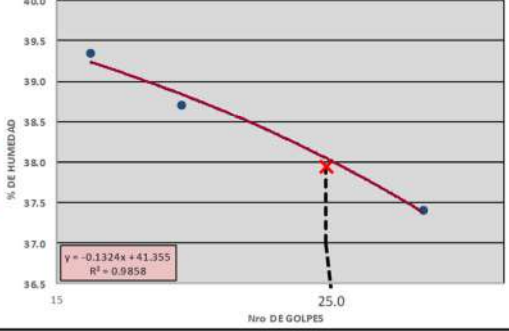
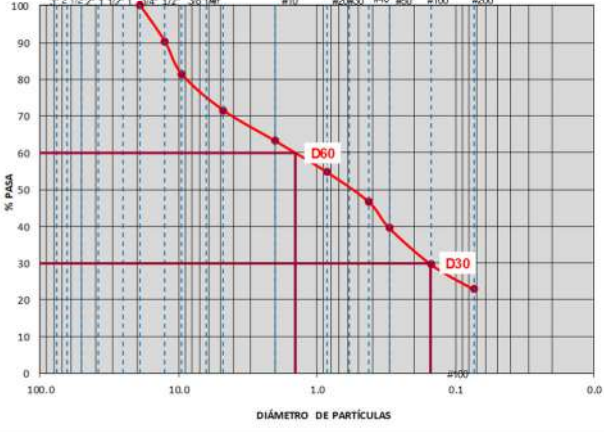
Nota: Elaboración propia

Anexo 10.

Análisis Granulométrico y límites de consistencia de Subrasante

Figura 170.

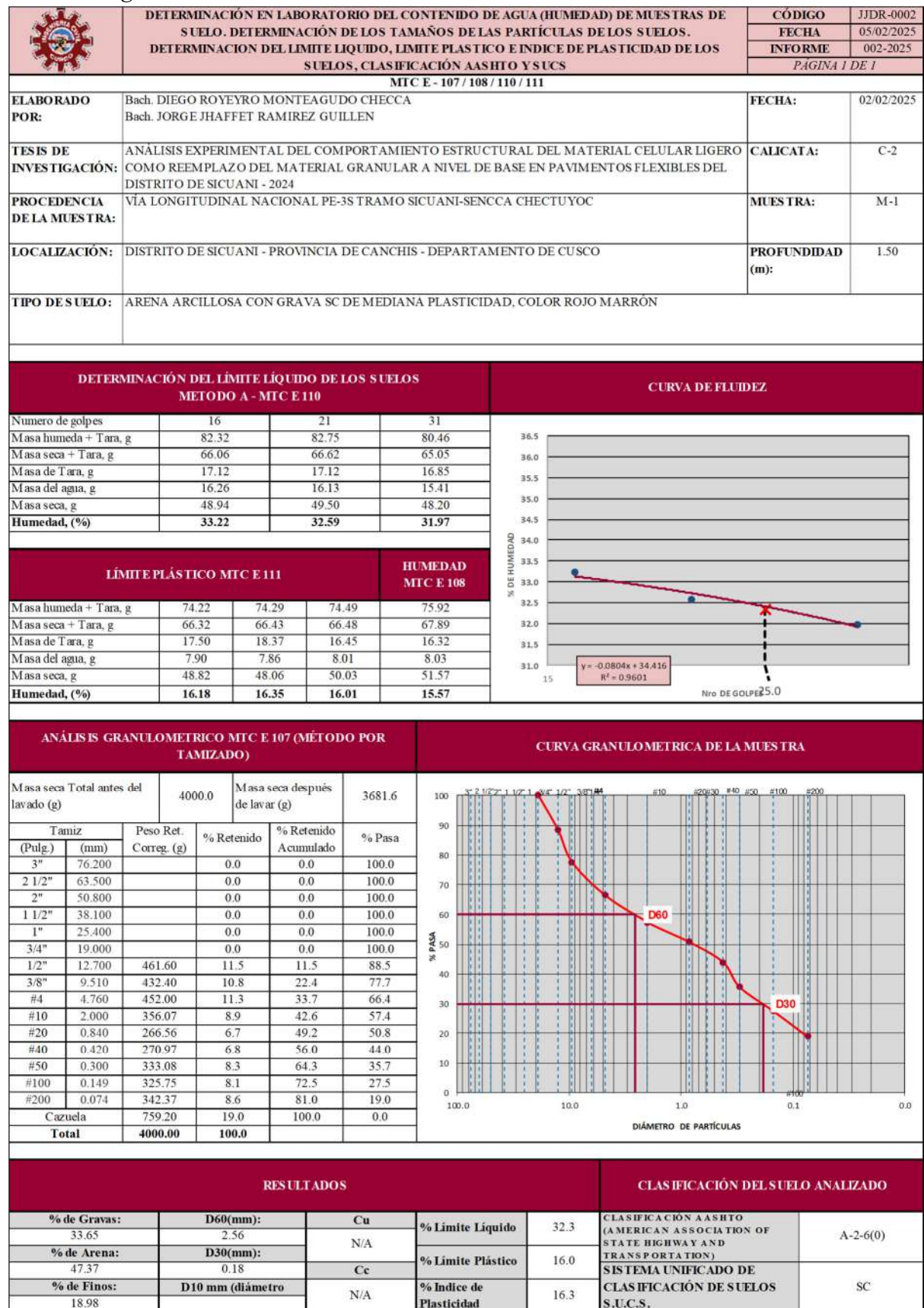
Análisis de granulometría en la Calicata C-1

	DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE MUESTRAS DE SUELO. DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTICULAS DE LOS SUELOS. DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS, CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS MTC E - 107 / 108 / 110 / 111			CÓDIGO	JJDR-0001		
				FECHA	05/02/2025		
				INFORME	001-2025		
				PÁGINA 1 DE 1			
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN			FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024			CALICATA:	C-1		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC			MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO			PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN						
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS MÉTODO A - MTC E 110				CURVA DE FLUIDEZ			
Numero de golpes	16	19	30				
Masa húmeda + Tara, g	85.22	86.98	86.86				
Masa seca + Tara, g	65.96	67.45	67.84				
Masa de Tara, g	17	17	17				
Masa del agua, g	19.26	19.53	19.02				
Masa seca, g	48.96	50.45	50.84				
Humedad, (%)	39.34	38.71	37.41				
LÍMITE PLÁSTICO MTC E 111			HUMEDAD MTC E 108				
Masa húmeda + Tara, g	77.76	77.57	77.34	77.46			
Masa seca + Tara, g	66.31	66.59	66.23	66.60			
Masa de Tara, g	17.00	17.00	17.00	17.00			
Masa del agua, g	11.45	10.98	11.11	10.86			
Masa seca, g	49.31	49.59	49.23	49.60			
Humedad, (%)	23.22	22.14	22.57	21.90			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MTC E 107 (MÉTODO POR TAMIZADO)				CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA			
Masa seca Total antes del lavado (g)	4000.0	Masa seca después de lavar (g)	3388.0				
Tamiz (Pulg.)	(mm)	Peso Ret. Correg. (g)	% Retenido			% Retenido Acumulado	% Pasa
3"	76.200		0.0			0.0	100.0
2 1/2"	63.500		0.0			0.0	100.0
2"	50.800		0.0			0.0	100.0
1 1/2"	38.100		0.0			0.0	100.0
1"	25.400		0.0			0.0	100.0
3/4"	19.000		0.0			0.0	100.0
1/2"	12.700	384.40	9.6			9.6	90.4
3/8"	9.510	361.20	9.0			18.6	81.4
#4	4.760	391.20	9.8			28.4	71.6
#10	2.000	334.00	8.4			36.8	63.2
#20	0.840	341.84	8.5			45.3	54.7
#40	0.420	324.59	8.1			53.4	46.6
#50	0.300	280.17	7.0			60.4	39.6
#100	0.149	398.29	10.0	70.4	29.6		
#200	0.074	267.10	6.7	77.1	22.9		
Cazuela		917.21	22.9	100.0	0.0		
Total		4000.00	100.0				
RESULTADOS				CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO			
% de Gravas:	D60(mm):	Cu	% Límite Líquido	37.9	CLASIFICACIÓN AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION)		
28.42	1.44	N/A	% Límite Plástico	22.5			
% de Arena:	D30(mm):	Cc	% Índice de Plasticidad	15.5	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.		
48.65	0.15	N/A					
% de Finos:	D10 mm (diámetro)				A-2-6(0)		
22.93					SC		

Nota: Elaboración propia

Figura 171.

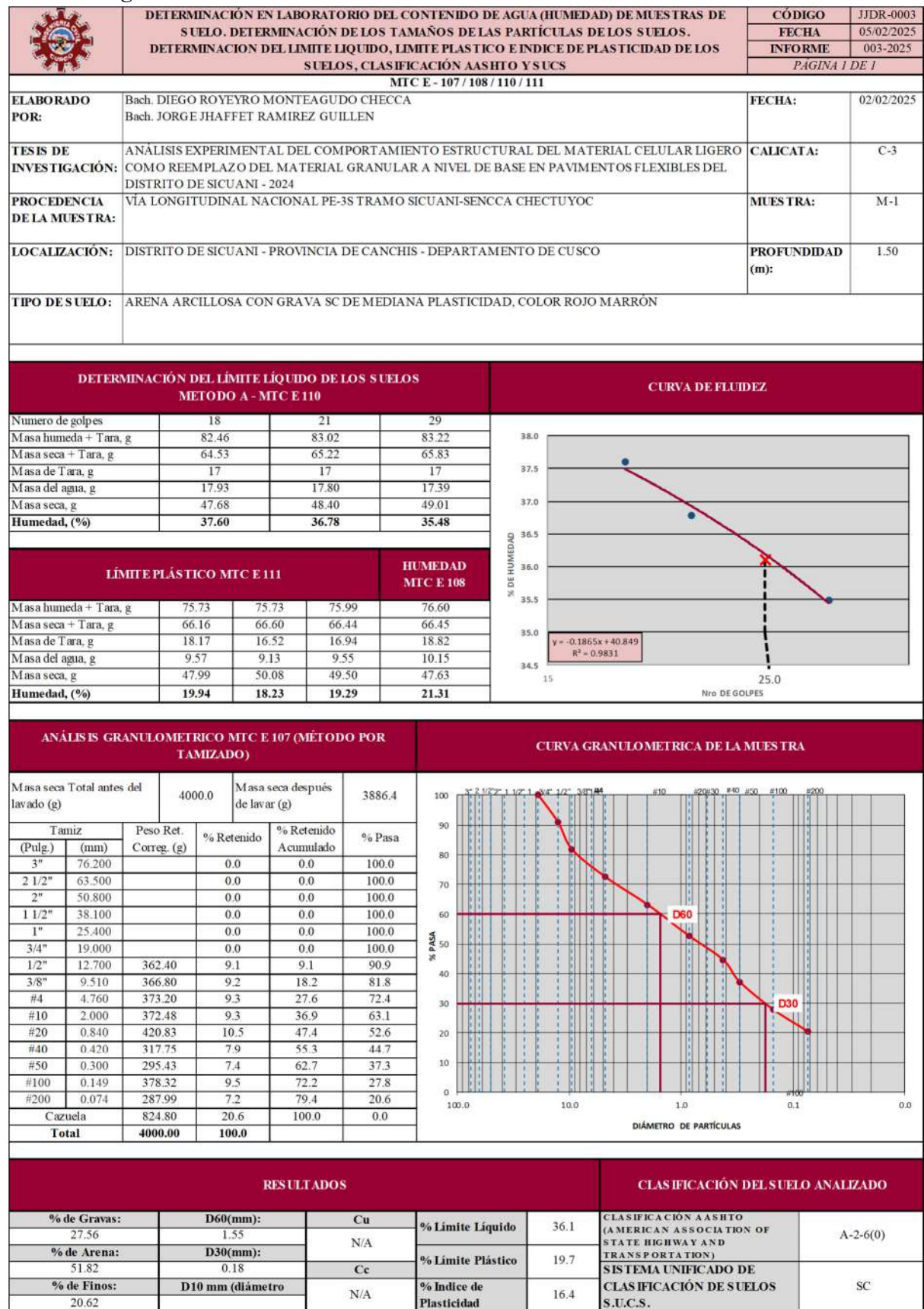
Análisis de granulometría en la Calicata C-2



Nota: Elaboración propia

Figura 172.

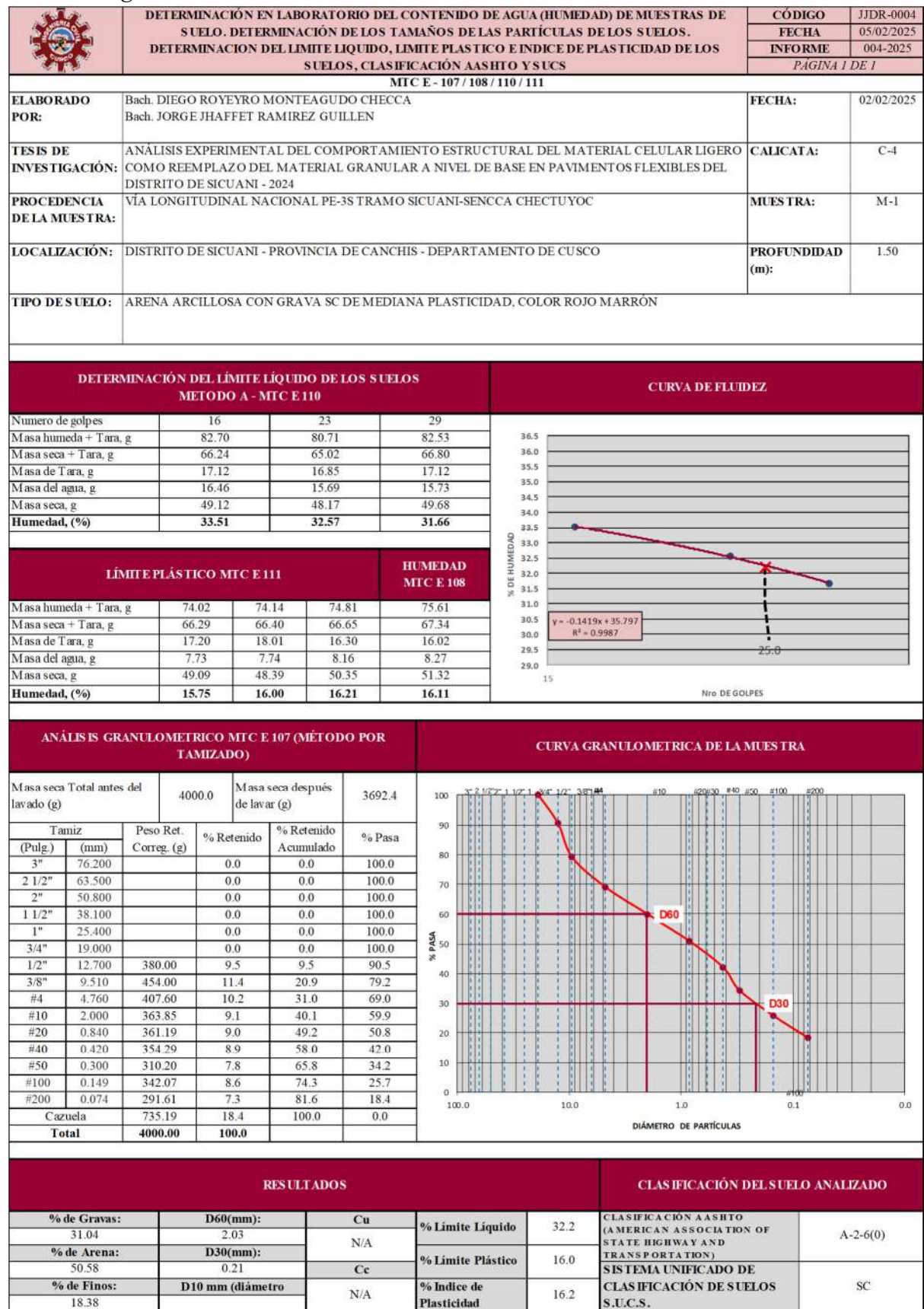
Análisis de granulometría en la Calicata C-3



Nota: Elaboración propia

Figura 173.

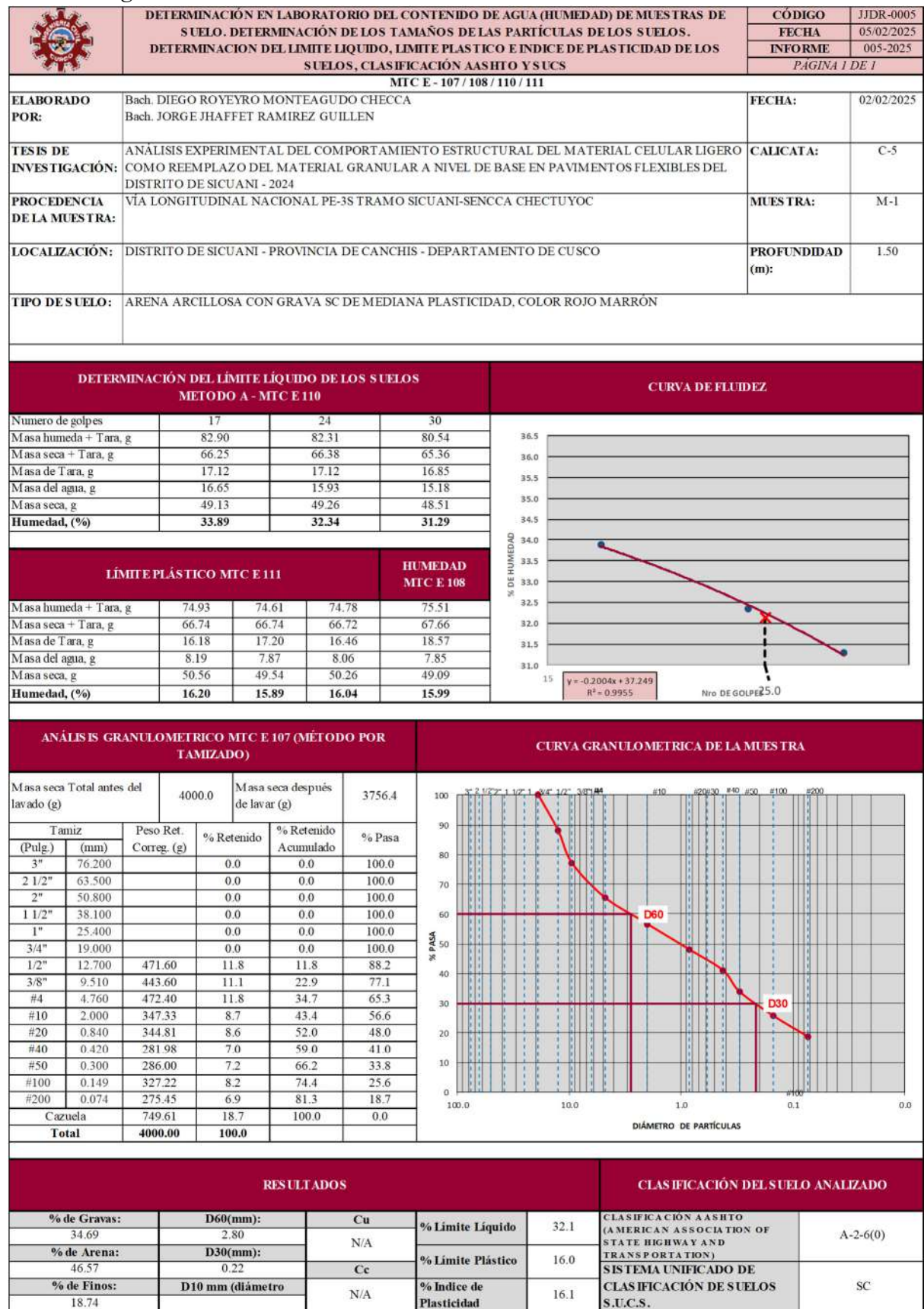
Análisis de granulometría en la Calicata C-4



Nota: Elaboración propia

Figura 174.


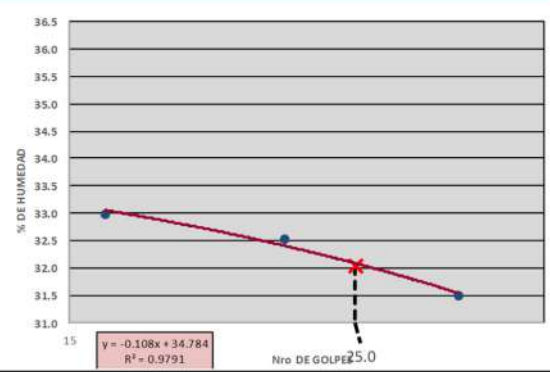
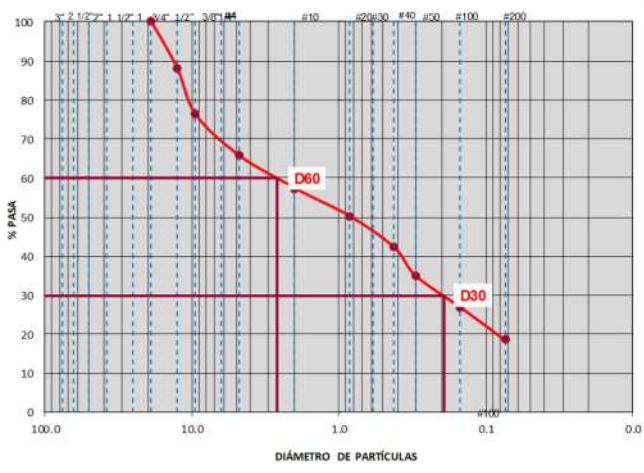
Análisis de granulometría en la Calicata C-5



Nota: Elaboración propia

Figura 175.


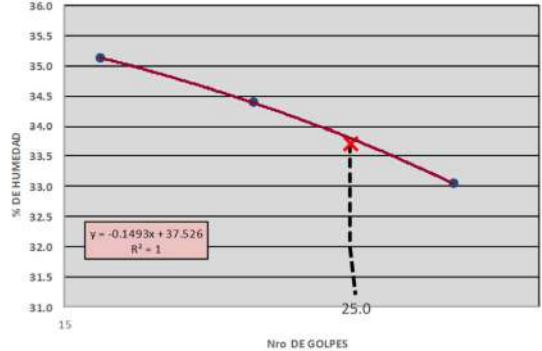
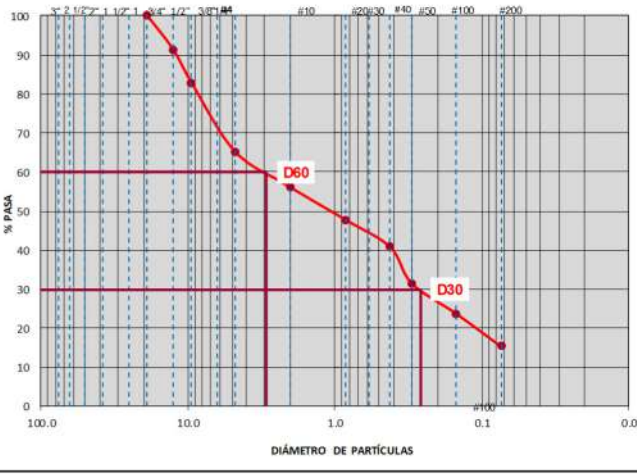
Análisis de granulometría en la Calicata C-6

	DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE MUESTRAS DE SUELO. DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS. DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS, CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS			CÓDIGO	JJDR-0006		
				FECHA	05/02/2025		
				INFORME	006-2025		
				PÁGINA 1 DE 1			
MTC E - 107 / 108 / 110 / 111							
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN			FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024			CALICATA:	C-6		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC			MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO			PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN						
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS METODO A - MTC E 110				CURVA DE FLUIDEZ			
Numero de golpes	16	22	30				
Masa humeda + Tara, g	82.76	82.91	82.43				
Masa seca + Tara, g	66.48	66.76	66.79				
Masa de Tara, g	17.12	17.12	17.12				
Masa del agua, g	16.28	16.15	15.64				
Masa seca, g	49.36	49.64	49.67				
Humedad, (%)	32.98	32.53	31.49				
LÍMITE PLÁSTICO MTC E 111				HUMEDAD MTC E 108			
Masa humeda + Tara, g	74.16	74.56	74.40	75.25			
Masa seca + Tara, g	66.12	66.47	66.55	67.08			
Masa de Tara, g	16.36	16.33	17.22	16.51			
Masa del agua, g	8.04	8.09	7.85	8.17			
Masa seca, g	49.76	50.14	49.33	50.57			
Humedad, (%)	16.16	16.13	15.91	16.16			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MTC E 107 (MÉTODO POR TAMIZADO)				CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA			
Masa seca Total antes del lavado (g)	4000.0	Masa seca después de lavar (g)	3766.0				
Tamiz (Pulg.)	(mm)	Peso Ret. Correg. (g)	% Retenido			% Retenido Acumulado	% Pasa
3"	76.200		0.0			0.0	100.0
2 1/2"	63.500		0.0			0.0	100.0
2"	50.800		0.0			0.0	100.0
1 1/2"	38.100		0.0			0.0	100.0
1"	25.400		0.0			0.0	100.0
3/4"	19.000		0.0			0.0	100.0
1/2"	12.700	470.80	11.8			11.8	88.2
3/8"	9.510	476.40	11.9			23.7	76.3
#4	4.760	425.20	10.6			34.3	65.7
#10	2.000	328.57	8.2			42.5	57.5
#20	0.840	286.19	7.2			49.7	50.3
#40	0.420	320.20	8.0			57.7	42.3
#50	0.300	291.42	7.3			65.0	35.0
#100	0.149	322.81	8.1	73.0	27.0		
#200	0.074	336.42	8.4	81.5	18.5		
Cazuela		741.99	18.5	100.0	0.0		
Total		4000.00	100.0				
RESULTADOS				CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO			
% de Gravas:	D60(mm):	Cu	% Límite Líquido	32.0	CLASIFICACIÓN AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION)		
34.31	2.61	N/A	% Límite Plástico	16.1			
% de Arena:	D30(mm):	Cc	% Índice de Plasticidad	15.9	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.		
47.14	0.19	N/A			SC		
% de Finos:	D10 mm (diámetro)						
18.55							

Nota: Elaboración propia

Figura 176.

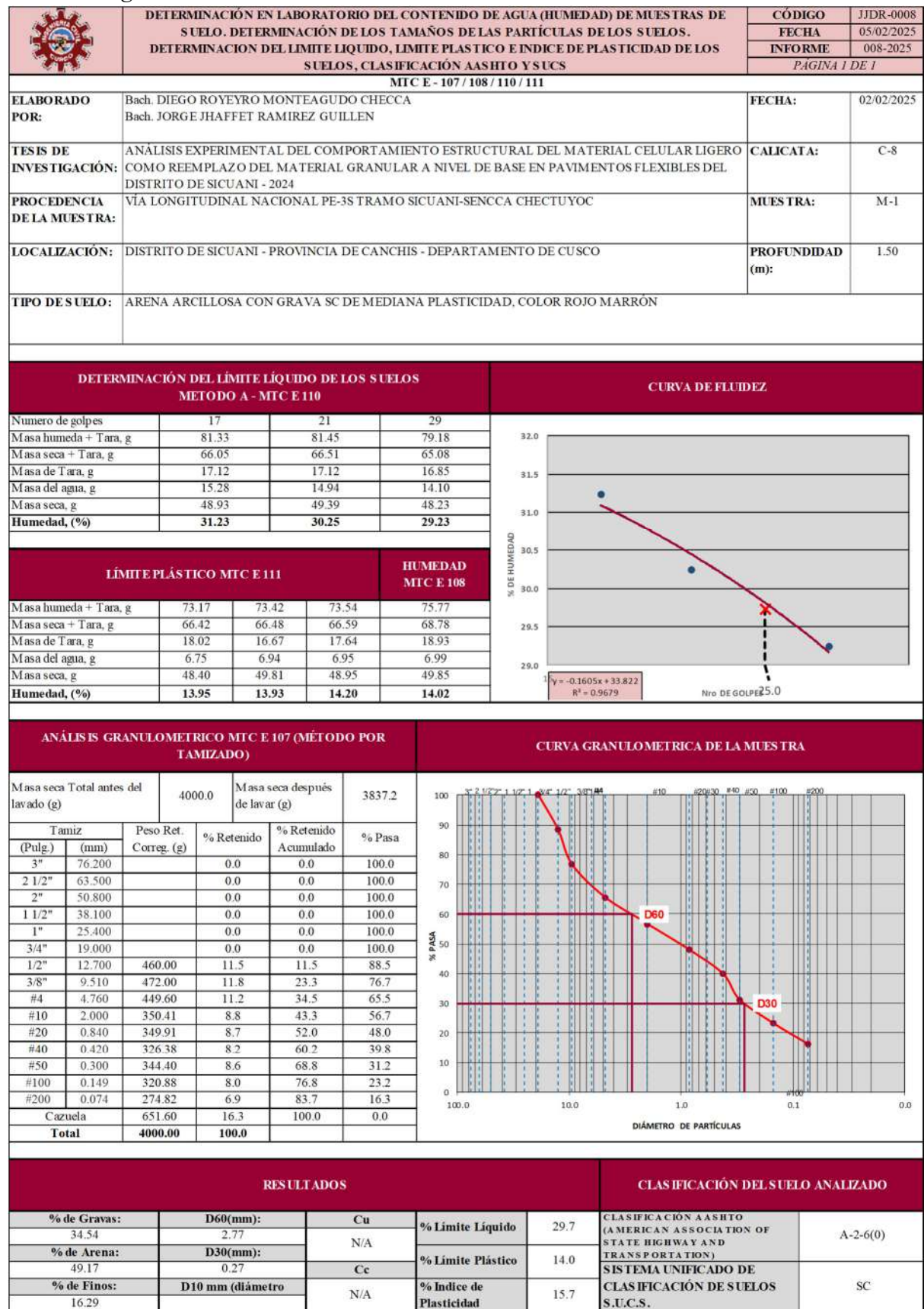
Análisis de granulometría en la Calicata C-7

	DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE MUESTRAS DE SUELO. DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS. DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS, CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS			CÓDIGO	JJDR-0007		
				FECHA	05/02/2025		
				INFORME	007-2025		
				PÁGINA 1 DE 1			
MTC E - 107 / 108 / 110 / 111							
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN			FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024			CALICATA:	C-7		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC			MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO			PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN						
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS METODO A - MTC E 110				CURVA DE FLUIDEZ			
Numero de golpes	16	21	30				
Masa humeda + Tara, g	81.93	82.97	83.15				
Masa seca + Tara, g	65.01	66.04	66.75				
Masa de Tara, g	16.85	16.82	17.12				
Masa del agua, g	16.92	16.93	16.40				
Masa seca, g	48.16	49.22	49.63				
Humedad, (%)	35.13	34.40	33.04				
LÍMITE PLÁSTICO MTC E 111				HUMEDAD MTC E 108			
Masa humeda + Tara, g	75.58	75.86	76.12	75.99			
Masa seca + Tara, g	66.58	66.75	67.39	67.42			
Masa de Tara, g	16.20	18.09	18.93	18.76			
Masa del agua, g	9.00	9.11	8.73	8.57			
Masa seca, g	50.38	48.66	48.46	48.66			
Humedad, (%)	17.86	18.72	18.01	17.61			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MTC E 107 (MÉTODO POR TAMIZADO)				CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA			
Masa seca Total antes del lavado (g)	4000.0	Masa seca después de lavar (g)	3789.2				
Tamiz (Pulg.)	(mm)	Peso Ret. Correg. (g)	% Retenido			% Retenido Acumulado	% Pasa
3"	76.200		0.0			0.0	100.0
2 1/2"	63.500		0.0			0.0	100.0
2"	50.800		0.0			0.0	100.0
1 1/2"	38.100		0.0			0.0	100.0
1"	25.400		0.0			0.0	100.0
3/4"	19.000		0.0			0.0	100.0
1/2"	12.700	342.40	8.6			8.6	91.4
3/8"	9.510	342.40	8.6			17.1	82.9
#4	4.760	374.80	9.4			35.0	65.1
#10	2.000	356.58	8.9			43.9	56.1
#20	0.840	334.03	8.4			52.2	47.8
#40	0.420	277.65	6.9			59.2	40.8
#50	0.300	372.55	9.3			68.5	31.5
#100	0.149	311.01	7.8	76.2	23.8		
#200	0.074	334.97	8.4	84.6	15.4		
Cazuela		615.21	15.4	100.0	0.0		
Total		4000.00	100.0				
RESULTADOS				CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO			
% de Gravas:	D60(mm):	Cu	% Límite Líquido	33.7	CLASIFICACIÓN AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION)		
34.95	2.91	N/A	% Límite Plástico	18.1			
% de Arena:	D30(mm):	Cc	% Índice de Plasticidad	15.6	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.		
49.67	0.26	N/A			A-2-6(0)		
% de Finos:	D10 mm (diámetro)				SC		
15.38							

Nota: Elaboración propia

Figura 177.

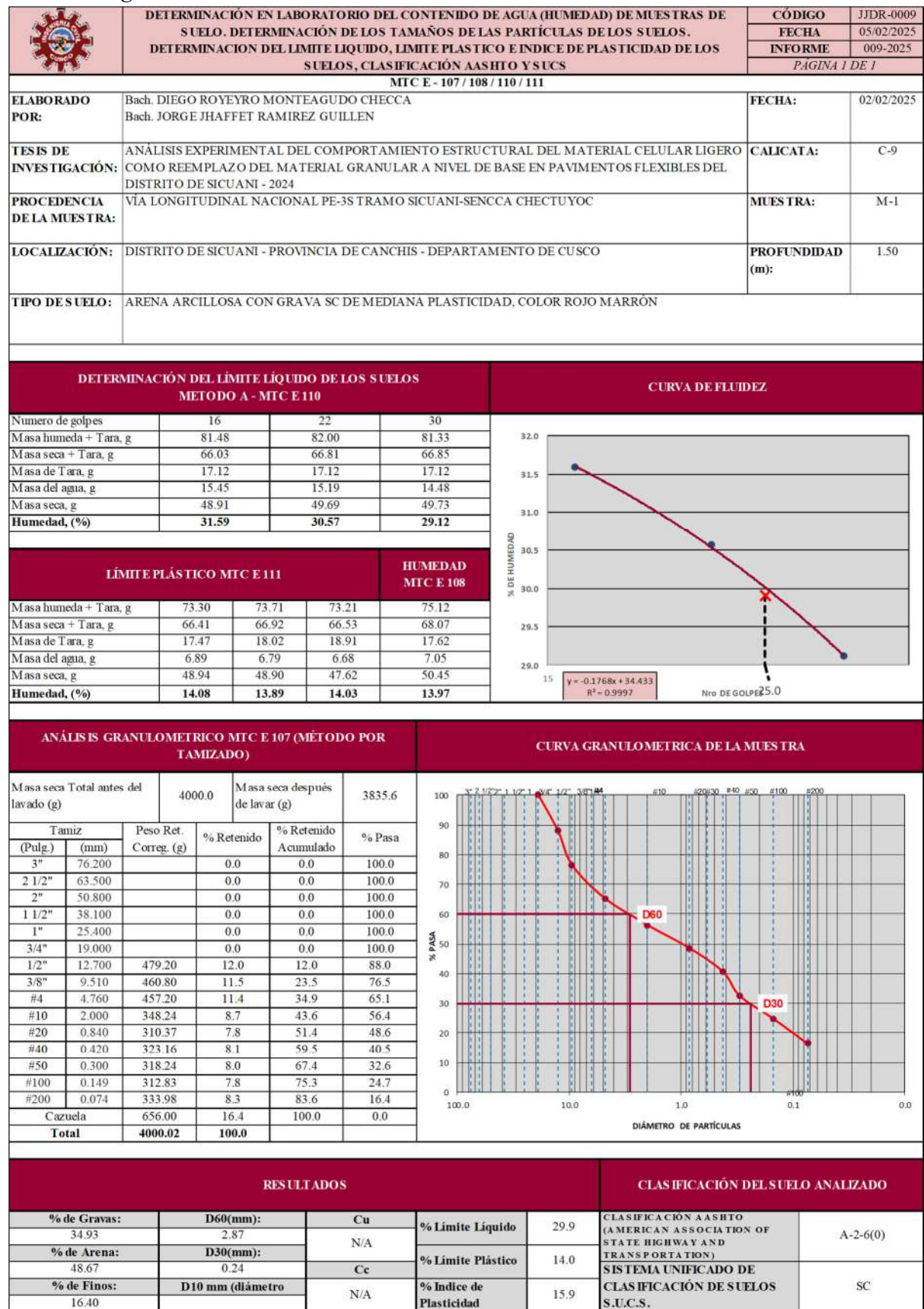
Análisis de granulometría en la Calicata C-8



Nota: Elaboración propia

Figura 178.


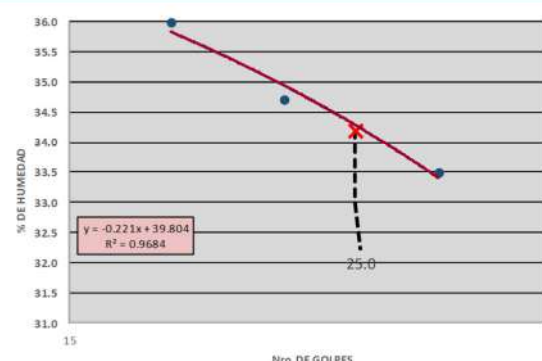
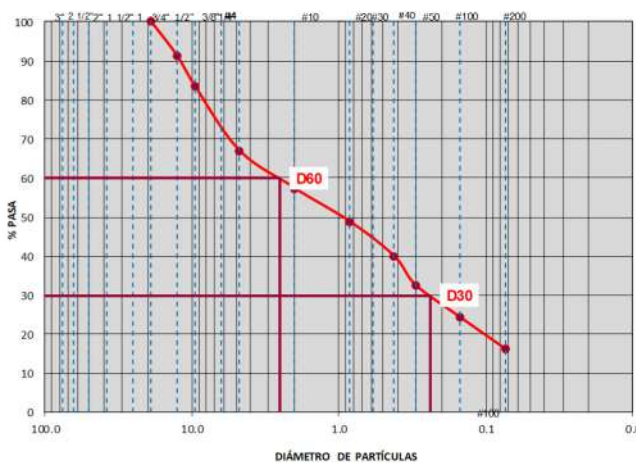
Análisis de granulometría en la Calicata C-9



Nota: Elaboración propia

Figura 179.

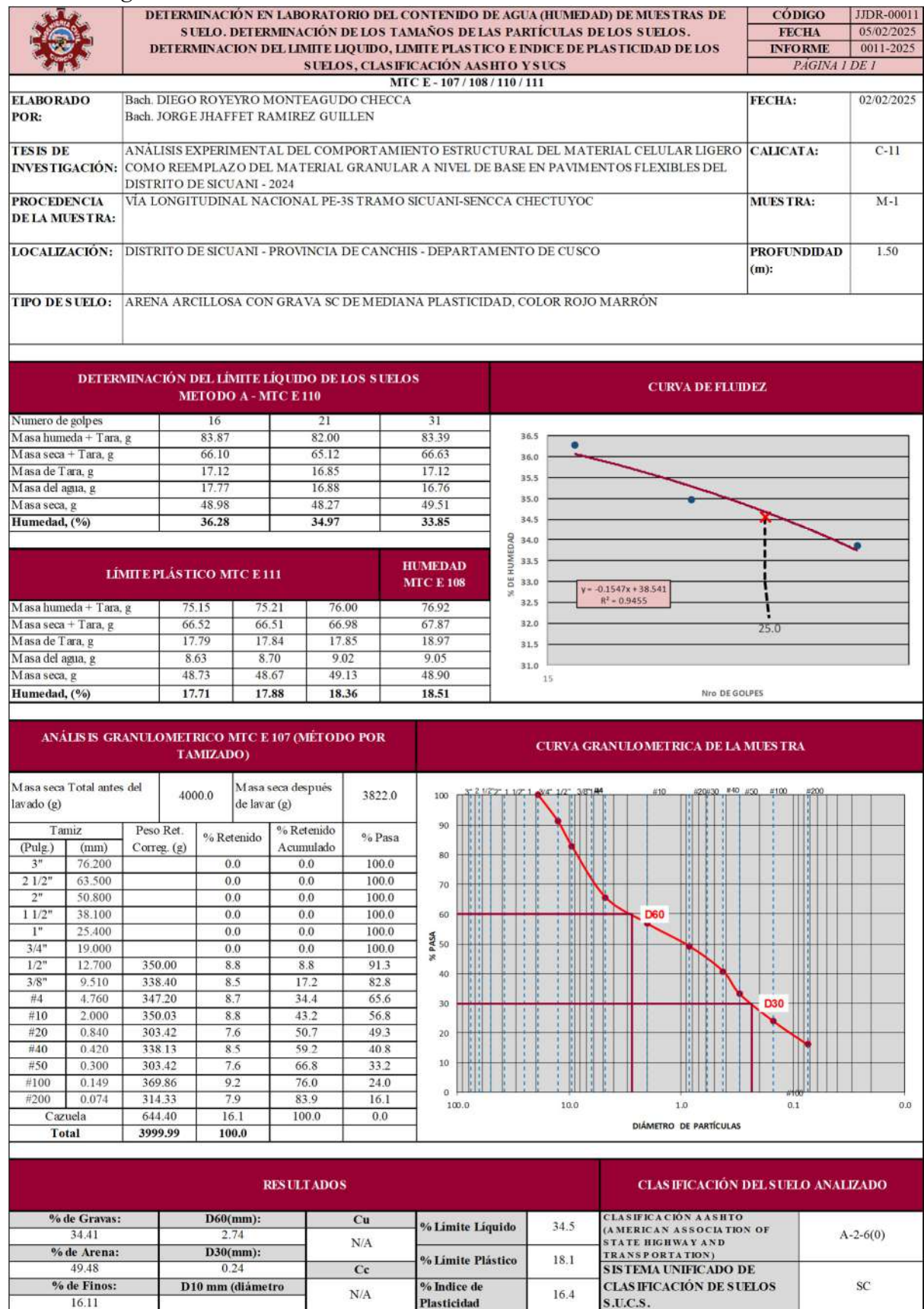
Análisis de granulometría en la Calicata C-10

	DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE MUESTRAS DE SUELO. DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS. DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS, CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS			CÓDIGO	JJDR-00010		
				FECHA	05/02/2025		
				INFORME	0010-2025		
				PÁGINA 1 DE 1			
MTC E - 107 / 108 / 110 / 111							
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN			FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024			CALICATA:	C-10		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC			MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO			PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN						
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS METODO A - MTC E 110				CURVA DE FLUIDEZ			
Numero de golpes	18	22	29				
Masa humeda + Tara, g	83.70	83.32	82.63				
Masa seca + Tara, g	66.08	66.27	66.12				
Masa de Tara, g	17.12	17.12	16.82				
Masa del agua, g	17.62	17.05	16.51				
Masa seca, g	48.96	49.15	49.30				
Humedad, (%)	35.99	34.69	33.49				
LÍMITE PLÁSTICO MTC E 111				HUMEDAD MTC E 108			
Masa humeda + Tara, g	75.32	75.49	76.00	76.50			
Masa seca + Tara, g	66.40	66.19	67.26	67.42			
Masa de Tara, g	18.18	17.09	17.59	17.44			
Masa del agua, g	8.92	9.30	8.74	9.08			
Masa seca, g	48.22	49.10	49.67	49.98			
Humedad, (%)	18.50	18.94	17.60	18.17			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MTC E 107 (MÉTODO POR TAMIZADO)				CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA			
Masa seca Total antes del lavado (g)	4000.0	Masa seca después de lavar (g)	3819.6				
Tamiz (Pulg.)	(mm)	Peso Ret. Correg. (g)	% Retenido			% Retenido Acumulado	% Pasa
3"	76.200		0.0			0.0	100.0
2 1/2"	63.500		0.0			0.0	100.0
2"	50.800		0.0			0.0	100.0
1 1/2"	38.100		0.0			0.0	100.0
1"	25.400		0.0			0.0	100.0
3/4"	19.000		0.0			0.0	100.0
1/2"	12.700	345.20	8.6			8.6	91.4
3/8"	9.510	321.60	8.0			16.7	83.3
#4	4.760	326.40	8.2			33.0	67.0
#10	2.000	381.09	9.5			42.6	57.4
#20	0.840	341.05	8.5			51.1	48.9
#40	0.420	355.00	8.9			60.0	40.0
#50	0.300	296.96	7.4			67.4	32.6
#100	0.149	331.60	8.3	75.7	24.3		
#200	0.074	319.90	8.0	83.7	16.3		
Cazuela	653.20	16.3	100.0	0.0			
Total	4000.00	100.0					
RESULTADOS				CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO			
% de Gravas:	D60(mm):	Cu	% Límite Líquido	34.2	CLASIFICACIÓN AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION)		
33.03	2.52	N/A	% Límite Plástico	18.3			
% de Arena:	D30(mm):	Cc	% Índice de Plasticidad	15.9	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.		
50.64	0.24	N/A			A-2-6(0)		
% de Finos:	D10 mm (diámetro)				SC		
16.33							

Nota: Elaboración propia

Figura 180.

Análisis de granulometría en la Calicata C-11




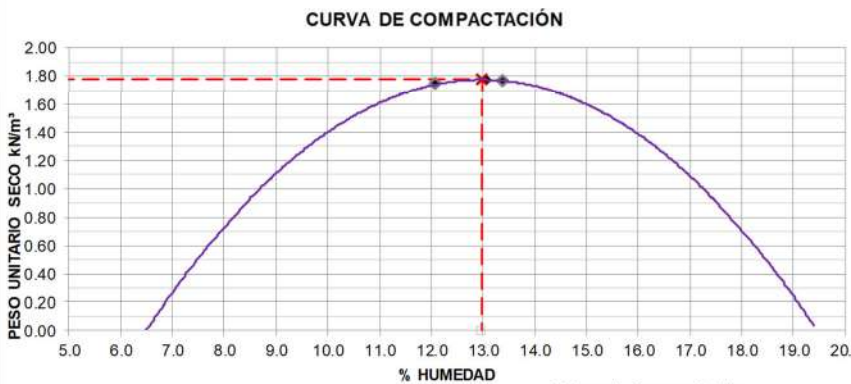
Nota: Elaboración propia

Anexo 11.

Cálculo de la Máxima Densidad Seca y Contenido Óptimo de humedad de Subrasante

Figura 181.


Máxima Densidad seca de la Calicata C-1

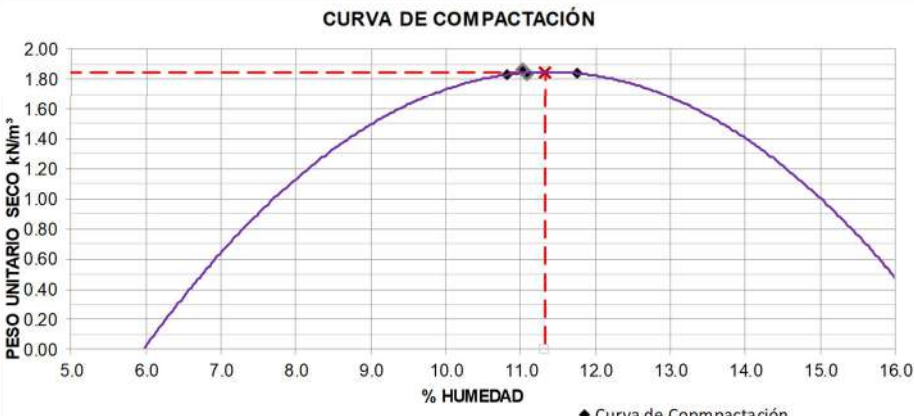
 RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-0001			
		FECHA	05/02/2025			
		INFORME	001-2025			
		PÁGINA 1 DE 1				
NTP 339.141 / MTC E- 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN	FECHA:	02.02/2025			
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024	CALICATA:	C-1			
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC	MUESTRA:	M-1			
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO	PROFUNDIDAD (m):	1.50			
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	
PRUEBA	Und	1	2	3	C	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6395	6385	6340	6392	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1895	1885	1840	1892	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-11	E-4	E-20	E-21	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	317.21	334.36	360.91	342.98	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	288.35	303.50	330.08	312.58	
MASA DEL MOLDE	g	72.74	72.92	74.85	80.08	
MASA DEL AGUA	g	28.86	30.86	30.83	30.40	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	215.61	230.58	255.23	232.50	
% de HUMEDAD	%	13.4	13.4	12.1	13.1	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.01	2.00	1.95	2.00	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.77	1.76	1.74	1.77	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.36	17.27	17.05	17.38	
	lbf/ft ³	110.52	109.94	108.57	110.65	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	19.9	20.2	20.9	19.8	
CURVA DE COMPACTACIÓN					PESO UNITARIO SECO MÁXIMO 17.70 kN/m ³ 1805 kg/m ³	
					HUMEDAD ÓPTIMA (%) 13.0	
					PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO NO REQUIERE kN/m ³ NO REQUIERE kg/m ³	
♦ Curva de Copcompactación						

Nota: Elaboración propia

Figura 182.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-2

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JDR-0002		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	002-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-2		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6413	6422	6444	6440	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1913	1922	1944	1940	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-8	E-26	E-15	E-35	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	409.02	409.39	392.01	415.62	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	376.41	376.17	360.70	379.88	
MASA DEL MOLDE	g	75.18	76.45	76.82	75.85	
MASA DEL AGUA	g	32.61	33.22	31.31	35.74	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	301.23	299.72	283.88	304.03	
% de HUMEDAD	%	10.8	11.1	11.0	11.8	
DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.03	2.04	2.06	2.06	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.83	1.83	1.85	1.84	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.93	17.97	18.19	18.03	
	lb/ft ³	114.15	114.42	115.79	114.80	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	18.1	18.0	17.3	17.8	



CURVA DE COMPACTACIÓN


♦ Curva de Compacción

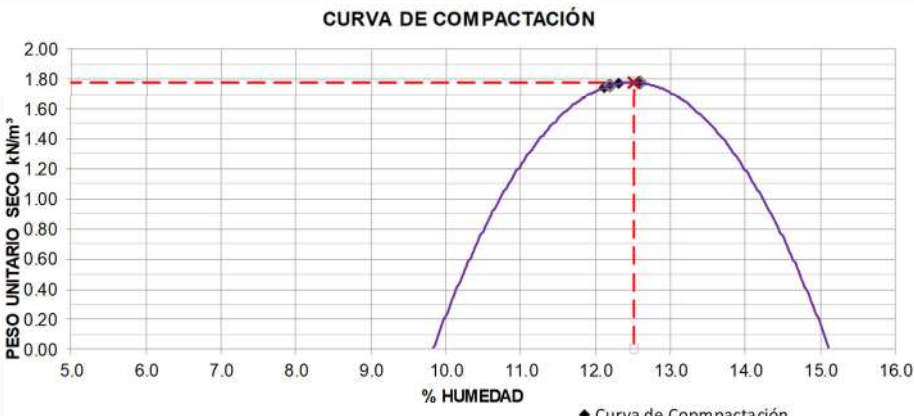
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
18.50	kN/m ³
1886	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
11.3	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 183.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-3

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JDR-0003		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	003-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-3		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6348	6359	6386	6380	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1848	1859	1886	1880	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-13	E-8	E-2	E-12	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	387.33	412.68	437.39	417.14	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	353.47	375.82	396.56	379.74	
MASA DEL MOLDE	g	74.04	73.74	72.39	76.12	
MASA DEL AGUA	g	33.86	36.86	40.83	37.40	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	279.43	302.08	324.17	303.62	
% de HUMEDAD	%	12.1	12.2	12.6	12.3	
DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.96	1.97	2.00	1.99	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.75	1.76	1.77	1.77	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.12	17.21	17.40	17.39	
	lb/ft ³	109.00	109.57	110.77	110.69	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	20.7	20.4	19.8	19.8	




♦ Curva de Compacción

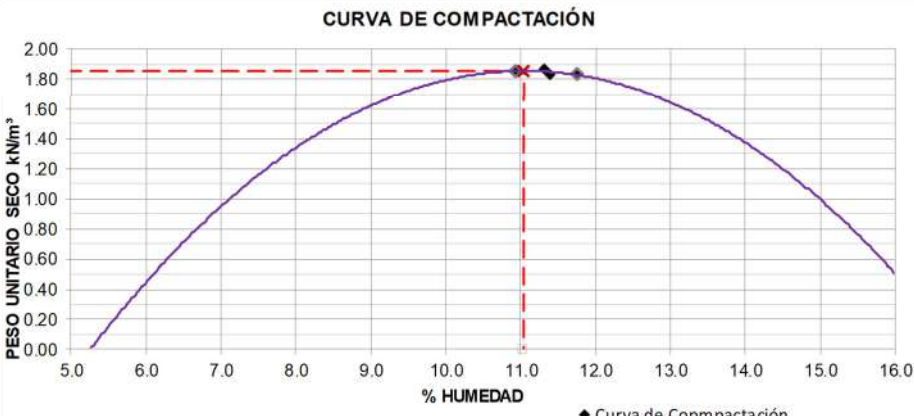
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
17.80	kN/m ³
1815	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
12.5	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 184.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-4

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JDR-0004		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	004-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-4		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6459	6440	6429	6428	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1959	1940	1929	1928	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-9	E-27	E-16	E-36	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	384.51	389.64	404.38	387.88	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	353.54	358.97	370.11	355.84	
MASA DEL MOLDE	g	80.15	78.74	78.62	74.92	
MASA DEL AGUA	g	30.97	30.67	34.27	32.04	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	273.39	280.23	291.49	280.92	
% de HUMEDAD	%	11.3	10.9	11.8	11.4	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.08	2.06	2.04	2.04	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.86	1.85	1.83	1.83	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	18.28	18.17	17.93	17.98	
	lb/ft ³	116.37	115.64	114.15	114.45	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	17.1	17.4	18.1	18.0	



CURVA DE COMPACTACIÓN


◆ Curva de Compacción

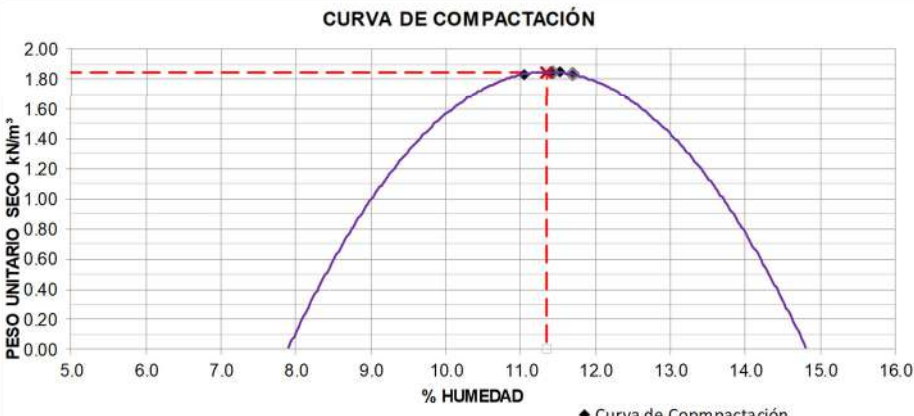
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
18.50	kN/m ³
1886	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
11.0	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 185.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-5

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JDR-0005		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	005-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-5		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6422	6428	6437	6447	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1922	1928	1937	1947	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-11	E-29	E-19	E-39	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	396.53	413.57	414.73	382.39	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	364.94	377.85	379.75	351.00	
MASA DEL MOLDE	g	79.12	72.41	74.08	78.61	
MASA DEL AGUA	g	31.59	35.72	34.98	31.39	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	285.82	305.44	305.67	272.39	
% de HUMEDAD	%	11.1	11.7	11.4	11.5	
DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.04	2.04	2.05	2.06	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.83	1.83	1.84	1.85	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.98	17.93	18.06	18.14	
	lb/ft ³	114.45	114.15	114.94	115.45	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	17.9	18.1	17.7	17.5	



CURVA DE COMPACTACIÓN


♦ Curva de Compacción

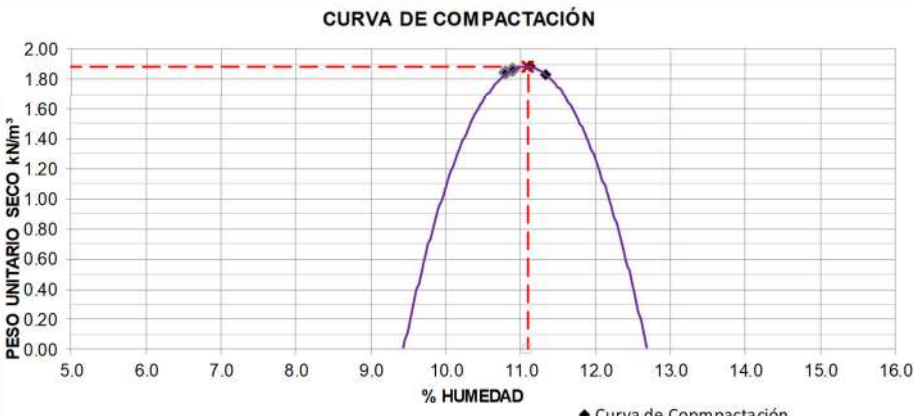
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
18.50	kN/m ³
1886	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
11.4	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 186.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-6

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-0006		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	006-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-6		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6475	6422	6442	6424	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1975	1922	1942	1924	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-10	E-32	E-28	E-56	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	397.98	408.51	381.41	389.96	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	365.38	376.55	351.47	358.47	
MASA DEL MOLDE	g	72.61	80.74	76.68	80.55	
MASA DEL AGUA	g	32.60	31.96	29.94	31.49	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	292.77	295.81	274.79	277.92	
% de HUMEDAD	%	11.1	10.8	10.9	11.3	
DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.09	2.04	2.06	2.04	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.88	1.84	1.86	1.83	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	18.46	18.02	18.19	17.95	
	lb/ft ³	117.52	114.71	115.81	114.29	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	16.5	17.8	17.3	18.0	



CURVA DE COMPACTACIÓN


♦ Curva de Compacción

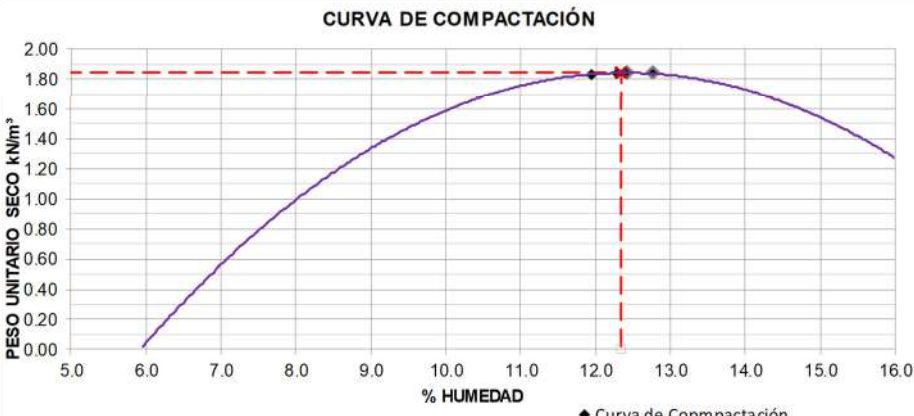
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
18.80	kN/m ³
1917	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
11.1	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE kN/m ³	
NO REQUIERE kg/m ³	

Nota: Elaboración propia

Figura 187.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-7

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-0007		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	007-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-7		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6437	6457	6453	6448	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1937	1957	1953	1948	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-5	E-23	E-4	E-32	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	389.93	401.15	413.17	408.70	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	356.16	364.78	375.11	372.56	
MASA DEL MOLDE	g	73.60	72.25	76.94	78.43	
MASA DEL AGUA	g	33.77	36.37	38.06	36.14	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	282.56	292.53	298.17	294.13	
% de HUMEDAD	%	12.0	12.4	12.8	12.3	
DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.05	2.07	2.07	2.06	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.83	1.84	1.83	1.84	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.97	18.08	17.99	18.02	
	lb/ft ³	114.42	115.11	114.53	114.73	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	18.0	17.6	17.9	17.8	



CURVA DE COMPACTACIÓN


♦ Curva de Compacción

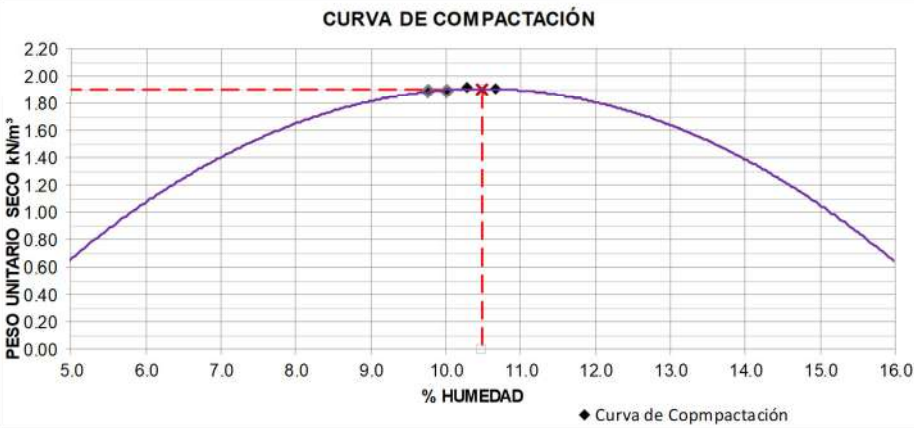
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
18.40	kN/m ³
1876	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
12.4	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 188.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-8

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JDR-0008		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	008-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-8		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6492	6459	6463	6489	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1992	1959	1963	1989	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-10	E-32	E-28	E-56	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	394.57	401.24	401.06	410.40	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	365.03	372.43	371.61	378.18	
MASA DEL MOLDE	g	77.80	77.77	77.99	76.02	
MASA DEL AGUA	g	29.54	28.81	29.45	32.22	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	287.23	294.66	293.62	302.16	
% de HUMEDAD	%	10.3	9.8	10.0	10.7	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.11	2.08	2.08	2.11	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.91	1.89	1.89	1.90	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	18.76	18.54	18.53	18.67	
	lb/ft ³	119.45	118.01	117.98	118.86	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	15.7	16.3	16.3	15.9	



CURVA DE COMPACTACIÓN


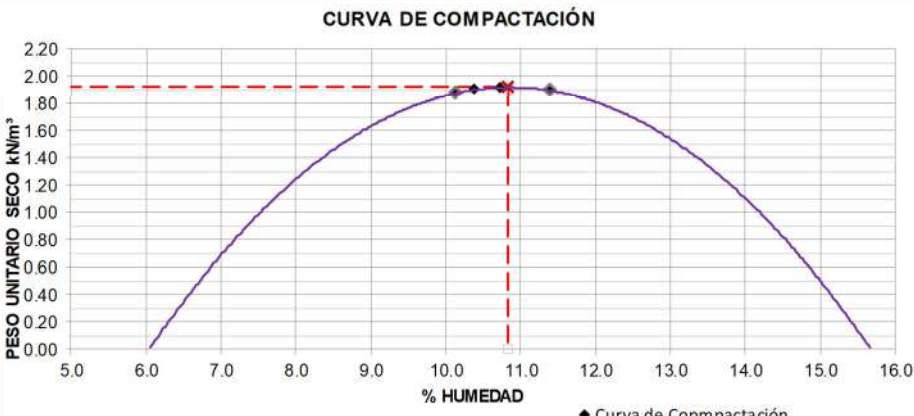
◆ Curva de Compacción

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
19.10	kN/m ³
1948	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
10.5	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE kN/m ³	
NO REQUIERE kg/m ³	

Nota: Elaboración propia

Figura 189.


Máxima Densidad seca de la Calicata C-9

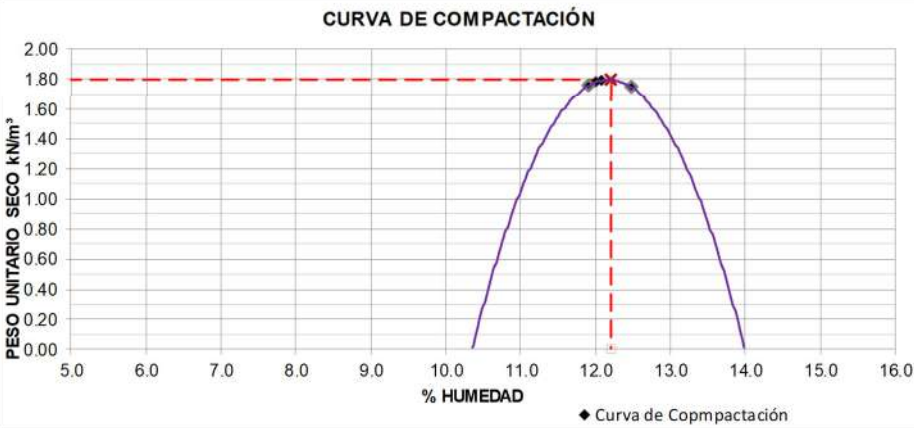
	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-0009		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	009-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-9		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO: C	
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6500	6447	6493	6485	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	2000	1947	1993	1985	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-10	E-32	E-28	E-56	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	403.46	401.48	403.61	399.24	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	371.37	371.93	369.77	369.29	
MASA DEL MOLDE	g	72.27	80.47	72.73	80.99	
MASA DEL AGUA	g	32.09	29.55	33.84	29.95	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	299.10	291.46	297.04	288.30	
% de HUMEDAD	%	10.7	10.1	11.4	10.4	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.12	2.06	2.11	2.10	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.91	1.87	1.90	1.90	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	18.76	18.36	18.59	18.68	
	lb/ft ³	119.45	116.91	118.32	118.92	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	15.7	16.8	16.2	15.9	
					PESO UNITARIO SECO MÁXIMO 19.20 kN/m ³ 1958 kg/m ³	
					HUMEDAD ÓPTIMA (%) 10.8	
					PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO NO REQUIERE kN/m ³ NO REQUIERE kg/m ³	

Nota: Elaboración propia

Figura 190.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-10

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-00010		
			FECHA	05/02/2025		
			INFORME	0010-2025		
			PÁGINA 1 DE 1			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-10		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6393	6353	6353	6384	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1893	1853	1853	1884	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-7	E-25	E-14	E-34	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	398.93	398.09	407.57	396.53	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	363.91	364.24	371.11	362.07	
MASA DEL MOLDE	g	74.34	79.92	78.90	75.10	
MASA DEL AGUA	g	35.02	33.85	36.46	34.46	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	289.57	284.32	292.21	286.97	
% de HUMEDAD	%	12.1	11.9	12.5	12.0	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.01	1.96	1.96	2.00	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.79	1.75	1.75	1.78	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.54	17.20	17.11	17.47	
	lb/ft ³	111.68	109.50	108.95	111.23	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	19.3	20.4	20.7	19.5	



CURVA DE COMPACTACIÓN


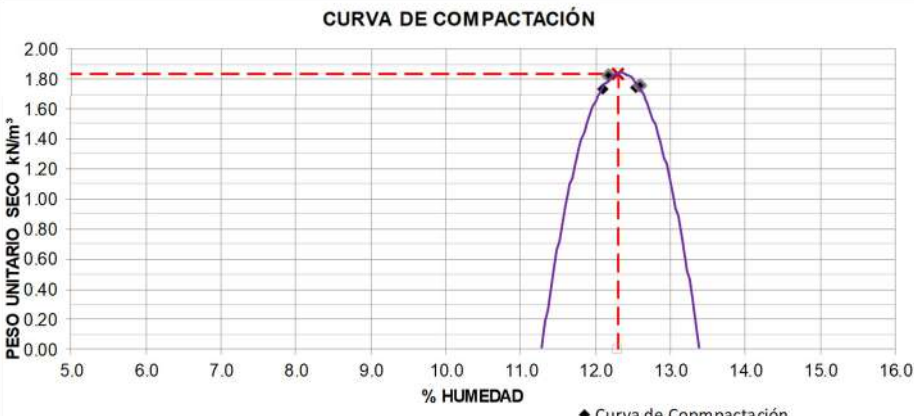
♦ Curva de Compacción

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
17.90	kN/m ³
1825	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
12.2	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 191.

Máxima Densidad seca de la Calicata C-11

	RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-00011																		
			FECHA	05/02/2025																		
			INFORME	0011-2025																		
			PÁGINA 1 DE 1																			
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557																						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN		FECHA:	02/02/2025																		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024		CALICATA:	C-11																		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC		MUESTRA:	M-1																		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO		PROFUNDIDAD (m):	1.50																		
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN																					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA																
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74																
	FINA P _{FE} (%)																					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO: C																	
PRUEBA	Und	1	2	3	4																	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000																	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25																	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4																	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944																	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6357	6427	6359	6335																	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500																	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1857	1927	1859	1835																	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN																						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-7	E-25	E-14	E-34																	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	406.20	387.39	408.53	387.27																	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	369.68	353.39	371.72	353.50																	
MASA DEL MOLDE	g	78.42	74.21	79.52	74.43																	
MASA DEL AGUA	g	36.52	34.00	36.81	33.77																	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	291.26	279.18	292.20	279.07																	
% de HUMEDAD	%	12.5	12.2	12.6	12.1																	
DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES																						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.97	2.04	1.97	1.94																	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.75	1.82	1.75	1.73																	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.14	17.85	17.15	17.00																	
	lb/ft ³	109.12	113.60	109.18	108.25																	
HUMEDAD DE SATURACIÓN																						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	20.6	18.4	20.6	21.1																	
					<table border="1"> <tr> <th colspan="2">PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</th> </tr> <tr> <td>18.40</td> <td>kN/m³</td> </tr> <tr> <td>1876</td> <td>kg/m³</td> </tr> <tr> <th colspan="2">HUMEDAD ÓPTIMA (%)</th> </tr> <tr> <td>12.3</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="2">PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO</th> </tr> <tr> <td>NO REQUIERE</td> <td>kN/m³</td> </tr> <tr> <td>NO REQUIERE</td> <td>kg/m³</td> </tr> </table>		PESO UNITARIO SECO MÁXIMO		18.40	kN/m ³	1876	kg/m ³	HUMEDAD ÓPTIMA (%)		12.3		PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO		NO REQUIERE	kN/m ³	NO REQUIERE	kg/m ³
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO																						
18.40	kN/m ³																					
1876	kg/m ³																					
HUMEDAD ÓPTIMA (%)																						
12.3																						
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO																						
NO REQUIERE	kN/m ³																					
NO REQUIERE	kg/m ³																					

Nota: Elaboración propia

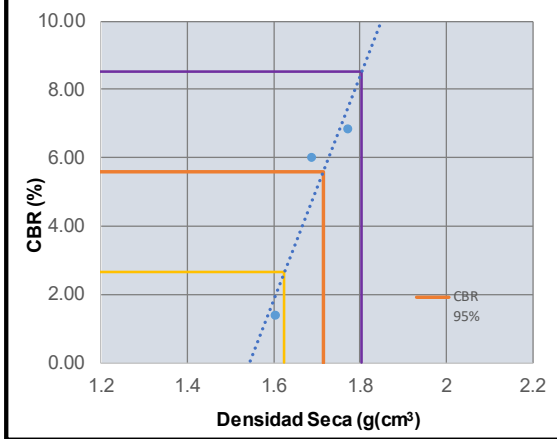
Anexo 12.

Cálculo de CBR de Subrasante

Figura 192.

CBR de la Calicata C-1

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JJDR-0001							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	001-2025							
						PÁGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MTC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-1							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12153.00	12410.00	11902.00	12086.00	11833.00	12057.00								
Peso de molde (g)	7980.00	7980.00	7920.00	7920.00	8090.00	8090.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4173.00	4430.00	3982.00	4166.00	3743.00	3967.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.961	2.08	1.871	1.96	1.759	1.86								
Tara (N°)	R-2	M-1	R-8	M-2	R-1	M-3								
Peso suelo húmedo + tara (g)	242	312	249.20	382.2	237.70	351.7								
Peso suelo seco + tara (g)	222	222	228.70	228.70	219.60	219.60								
Peso tara (g)	35	35	38.30	38.30	32.30	32.30								
Peso de agua (g)	20.00	90	20.50	153.5	18.10	132.1								
Peso de suelo seco (g)	187.00	187	190.40	190.4	187.30	187.3								
Contenido de humedad (%)	10.70	48.13	10.77	80.62	9.66	70.53								
Densidad seca (g/cm ³)	1.77	1.41	1.69	1.08	1.60	1.09								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		EXPANSION		DIAL	EXPANSION					
				mm	%	mm	%		mm	%				
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	8	0.080	0.1			
08/02/25	15:30	48.00	8	0.080	0.1	14	0.140	0.1	14	0.140	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	12	0.120	0.1	16	0.160	0.1	16	0.160	0.1			
10/02/25	15:30	96.00	16	0.160	0.1	20	0.200	0.2	24	0.240	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand. kg/cm ²	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19
mm	pulg.		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		21	7.0	7.0		18	6.0	6.0		23	7.7	7.7	
1.270	0.050		66	22.0	22.0		62	20.7	20.7		32	10.7	10.7	
1.905	0.075		129	43.0	43.0		147	49.0	49.0		37	12.3	12.3	
2.540	0.100	70.455	205	68.3	68.3	6.8	180	60.0	60.0	6.0	42	14.0	14.0	1.4
3.175	0.125		269	89.7	89.7		219	73.0	73.0		48	16.0	16.0	
3.810	0.150		324	108.0	108.0		293	97.7	97.7		51	17.0	17.0	
4.445	0.175		372	124.0	124.0		323	107.7	107.7		55	18.3	18.3	
5.080	0.200	105.680	415	138.3	138.3	9.2	394	131.3	131.3	8.8	69	23.0	23.0	1.5
7.620	0.300		558	186.0	186.0		496	165.3	165.3		83	27.7	27.7	
10.160	0.400		650	216.7	216.7		580	193.3	193.3		96	32.0	32.0	
12.700	0.500		727	242.3	242.3		597	199.0	199.0		203	67.7	67.7	



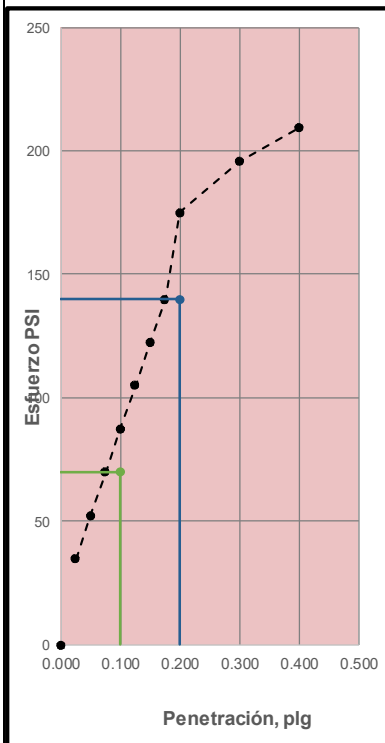
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.805
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 12.98
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.715

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.54
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	5.60

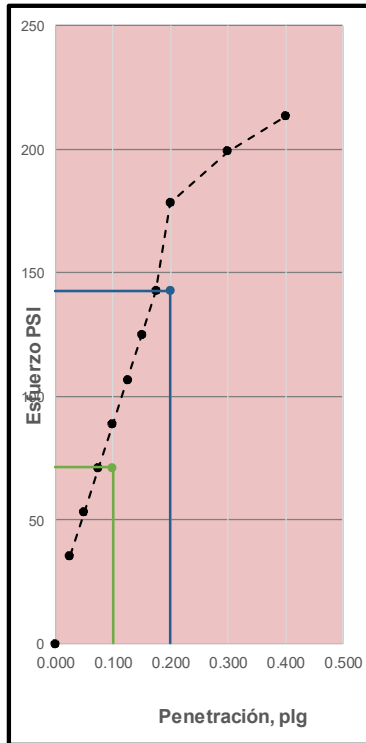
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	8.54 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	5.60 %

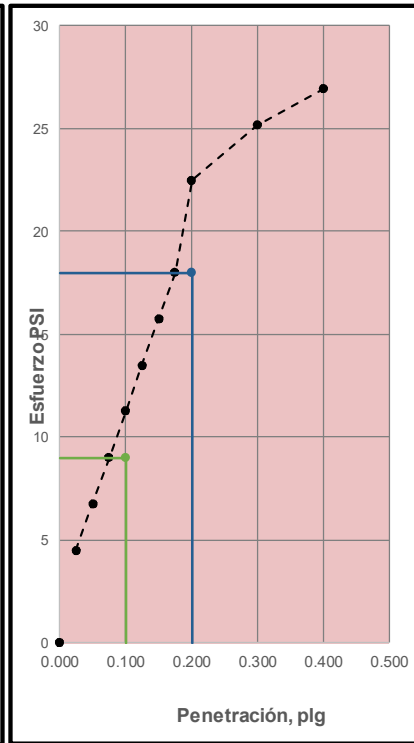
56 GOLPES



25 GOLPES



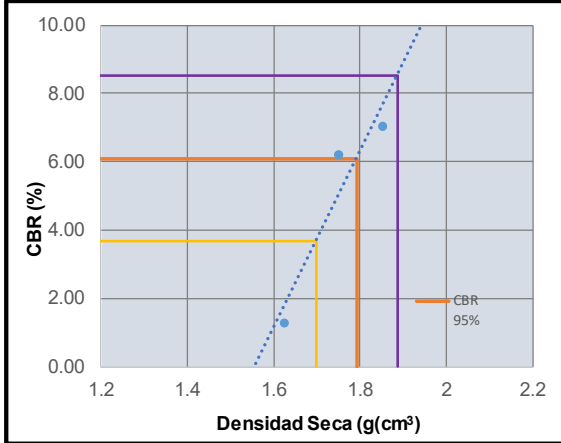
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 193.
CBR de la Calicata C-2

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0002							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	002-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-2							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12303.00	12570.00	12444.00	12731.00	12345.00	12617.00								
Peso de molde (g)	7937.00	7937.00	8078.00	8078.00	8058.00	8058.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4366.00	4633.00	4366.00	4653.00	4287.00	4559.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.052	2.18	2.052	2.19	2.015	2.14								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	235	336	253.00	366	272.00	379								
Peso suelo seco + tara (g)	216	216	222.00	222.00	227.00	227.00								
Peso tara (g)	39.14	39.14	40.41	40.41	39.62	39.62								
Peso de agua (g)	19.00	120	31.00	144	45.00	152								
Peso de suelo seco (g)	176.86	176.86	181.59	181.59	187.38	187.38								
Contenido de humedad (%)	10.74	67.85	17.07	79.30	24.02	81.12								
Densidad seca (g/cm³)	1.85	1.30	1.75	1.22	1.62	1.18								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1			
08/02/25	15:30	48.00	6	0.060	0.1	6	0.060	0.1	10	0.100	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	8	0.080	0.1	14	0.140	0.1	18	0.180	0.2			
10/02/25	15:30	96.00	12	0.120	0.1	16	0.160	0.1	20	0.200	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand. kg/cm ²	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19
			lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
mm	pulg.				Correg.				Correg.				Correg.	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		16	5.3	5.3		14	4.7	4.7		18	6.0	6.0	
1.270	0.050		64	21.3	21.3		61	20.3	20.3		27	9.0	9.0	
1.905	0.075		131	43.7	43.7		151	50.3	50.3		33	11.0	11.0	
2.540	0.100	70.455	211	70.3	70.3	7.0	186	62.0	62.0	6.2	38	12.7	12.7	1.3
3.175	0.125		280	93.3	93.3		227	75.7	75.7		45	15.0	15.0	
3.810	0.150		337	112.3	112.3		305	101.7	101.7		48	16.0	16.0	
4.445	0.175		388	129.3	129.3		336	112.0	112.0		52	17.3	17.3	
5.080	0.200	105.680	433	144.3	144.3	9.6	411	137.0	137.0	9.1	67	22.3	22.3	1.5
7.620	0.300		584	194.7	194.7		518	172.7	172.7		83	27.7	27.7	
10.160	0.400		681	227.0	227.0		608	202.7	202.7		94	31.3	31.3	
12.700	0.500		762	254.0	254.0		625	208.3	208.3		208	69.3	69.3	



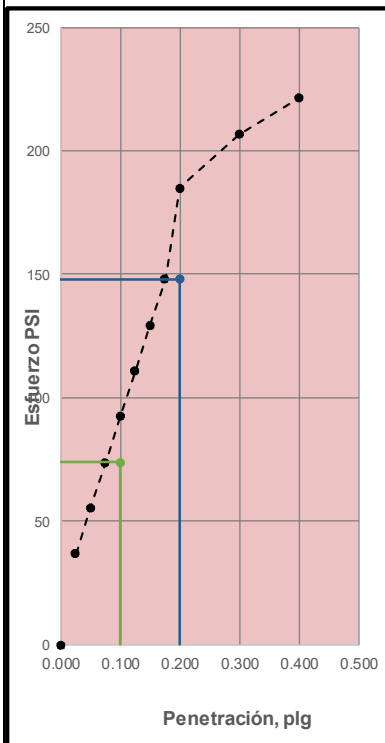
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.886
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 11.33
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.792

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.54
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	6.10

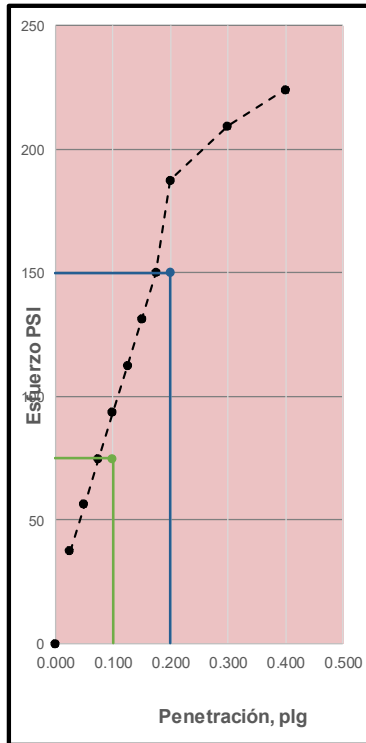
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 8.54 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 6.10 %

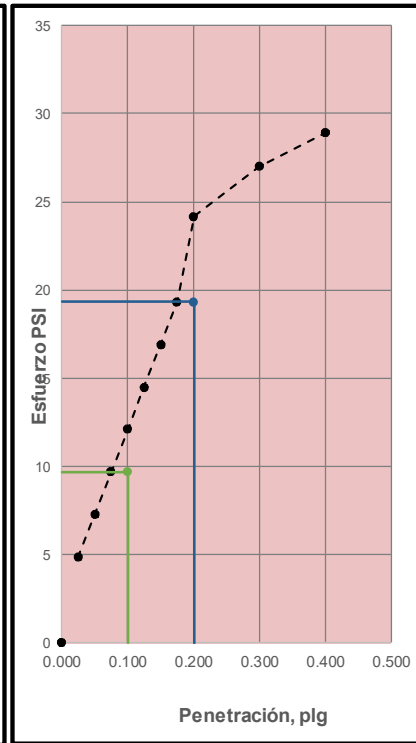
56 GOLPES



25 GOLPES



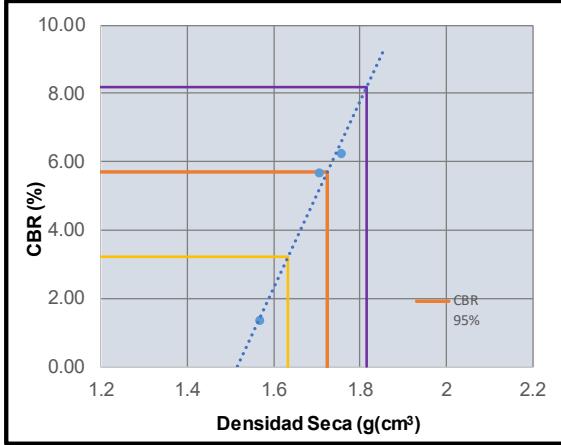
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 194.
CBR de la Calicata C-3

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0003										
						FECHA	05/02/2025										
						INFORME	003-2025										
						PAGINA 1 DE 1											
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883																	
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025										
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-3										
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1										
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50										
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN																
COMPACTACIÓN																	
Molde N°	21		20		19												
Capas N°	5		5		5												
Golpes por Capa N°	56		25		12												
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO											
Peso de molde + Suelo húmedo	11782.00	11967.00	11824.00	12111.00	11799.00	12059.00											
Peso de molde (g)	7865.00	7865.00	7882.00	7882.00	8100.00	8100.00											
Peso del Suelo húmedo (g)	3917.00	4102.00	3942.00	4229.00	3699.00	3959.00											
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00											
Densidad húmeda (g/cm³)	1.841	1.93	1.852	1.99	1.738	1.86											
Tara (N°)	R-2	M-1	R-8	M-2	R-1	M-3											
Peso suelo húmedo + tara (g)	235	340	239.00	358	246.00	355											
Peso suelo seco + tara (g)	226	226	223.00	223.00	226.00	226.00											
Peso tara (g)	38.12	38.12	36.52	36.52	39.71	39.71											
Peso de agua (g)	9.00	114	16.00	135	20.00	129											
Peso de suelo seco (g)	187.88	187.88	186.48	186.48	186.29	186.29											
Contenido de humedad (%)	4.79	60.68	8.58	72.39	10.74	69.25											
Densidad seca (g/cm³)	1.76	1.20	1.71	1.15	1.57	1.10											
EXPANSIÓN																	
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION							
				mm	%		mm	%		mm	%						
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0						
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0						
08/02/25	15:30	48.00	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1						
09/02/25	15:30	72.00	10	0.100	0.1	12	0.120	0.1	14	0.140	0.1						
10/02/25	15:30	96.00	12	0.120	0.1	16	0.160	0.1	18	0.180	0.2						
PENETRACIÓN																	
PENETRACIÓN	Carga Estand.	MOLDE N°			MOLDE N°				MOLDE N°								
		mm	pulg.	kg/cm ²	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	
0.000	0.000			1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3			
0.635	0.025			19	6.3	6.3		17	5.7	5.7		22	7.3	7.3			
1.270	0.050			61	20.3	20.3		59	19.7	19.7		30	10.0	10.0			
1.905	0.075			118	39.3	39.3		139	46.3	46.3		35	11.7	11.7			
2.540	0.100	70.455		187	62.3	62.3	6.2	170	56.7	56.7	5.7	40	13.3	13.3	1.3		
3.175	0.125			247	82.3	82.3		207	69.0	69.0		46	15.3	15.3			
3.810	0.150			297	99.0	99.0		276	92.0	92.0		48	16.0	16.0			
4.445	0.175			341	113.7	113.7		305	101.7	101.7		52	17.3	17.3			
5.080	0.200	105.680		381	127.0	127.0	8.5	372	124.0	124.0	8.3	66	22.0	22.0	1.5		
7.620	0.300			512	170.7	170.7		468	156.0	156.0		79	26.3	26.3			
10.160	0.400			595	198.3	198.3		548	182.7	182.7		90	30.0	30.0			
12.700	0.500			666	222.0	222.0		564	188.0	188.0		192	64.0	64.0			



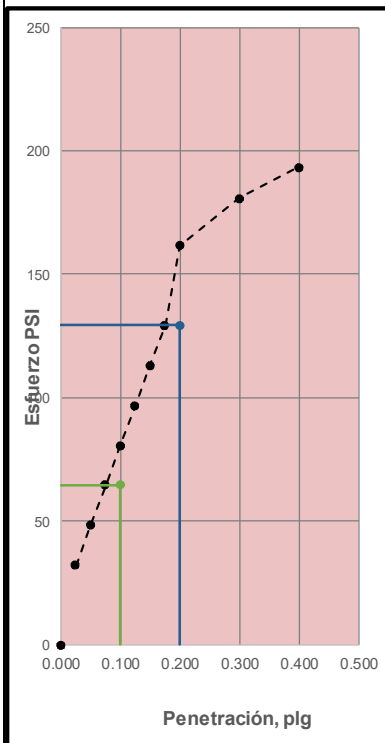
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3) 1.815
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 12.52
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3) 1.724

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.18
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	5.70

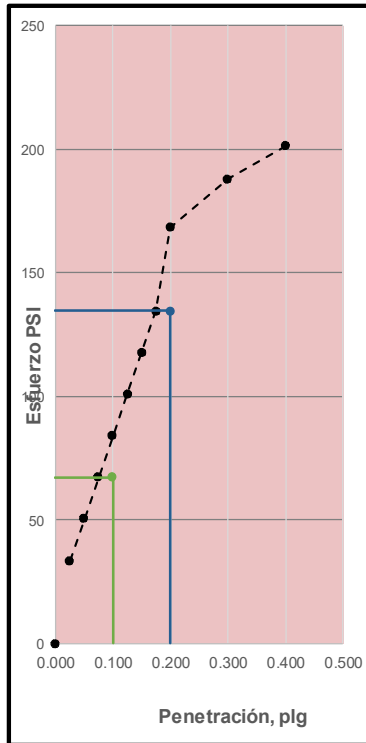
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	8.18 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	5.70 %

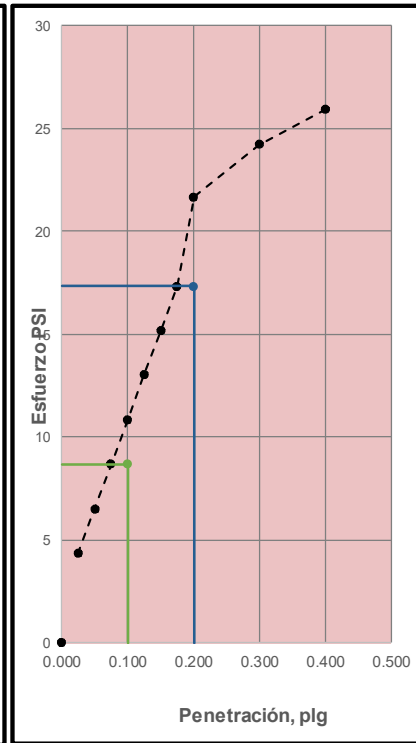
56 GOLPES



25 GOLPES



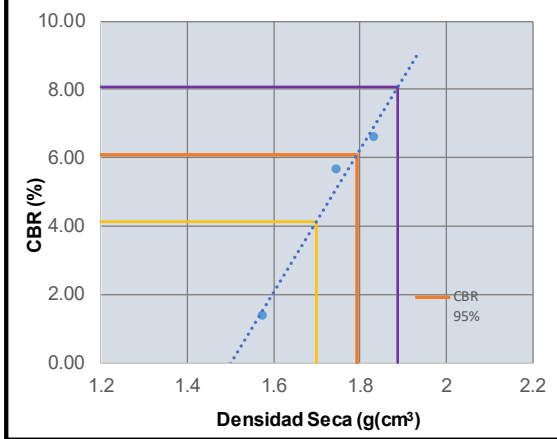
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 195.
CBR de la Calicata C-4

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0004							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	004-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E – 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-4							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12457.00	12679.00	11928.00	12194.00	11973.00	12316.00								
Peso de molde (g)	7981.00	7981.00	7872.00	7872.00	7945.00	7945.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4476.00	4698.00	4056.00	4322.00	4028.00	4371.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.103	2.21	1.906	2.03	1.893	2.05								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	249	305	241.00	320	235.00	331								
Peso suelo seco + tara (g)	222	222	224.00	228.00	202.00	224.00								
Peso tara (g)	38.77	38.77	38.43	38.43	38.95	38.95								
Peso de agua (g)	27.00	83	17.00	92	33.00	107								
Peso de suelo seco (g)	183.23	183.23	185.57	189.57	163.05	185.05								
Contenido de humedad (%)	14.74	45.30	9.16	48.53	20.24	57.82								
Densidad seca (g/cm³)	1.83	1.52	1.75	1.37	1.57	1.30								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
08/02/25	15:30	48.00	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1	10	0.100	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	8	0.080	0.1	14	0.140	0.1	18	0.180	0.2			
10/02/25	15:30	96.00	10	0.100	0.1	16	0.160	0.1	20	0.200	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand.	MOLDE N°				MOLDE N°				MOLDE N°			
			lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
mm	pulg.	kg/cm2			Correg.				Correg.				Correg.	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		19	6.3	6.3		16	5.3	5.3		21	7.0	7.0	
1.270	0.050		61	20.3	20.3		58	19.3	19.3		29	9.7	9.7	
1.905	0.075		120	40.0	40.0		137	45.7	45.7		34	11.3	11.3	
2.540	0.100	70.455	198	66.0	66.0	6.6	170	56.7	56.7	5.7	41	13.7	13.7	1.4
3.175	0.125		251	83.7	83.7		204	68.0	68.0		45	15.0	15.0	
3.810	0.150		301	100.3	100.3		272	90.7	90.7		47	15.7	15.7	
4.445	0.175		345	115.0	115.0		300	100.0	100.0		51	17.0	17.0	
5.080	0.200	105.680	385	128.3	128.3	8.6	366	122.0	122.0	8.1	64	21.3	21.3	1.4
7.620	0.300		517	172.3	172.3		460	153.3	153.3		78	26.0	26.0	
10.160	0.400		603	201.0	201.0		539	179.7	179.7		88	29.3	29.3	
12.700	0.500		674	224.7	224.7		554	184.7	184.7		188	62.7	62.7	



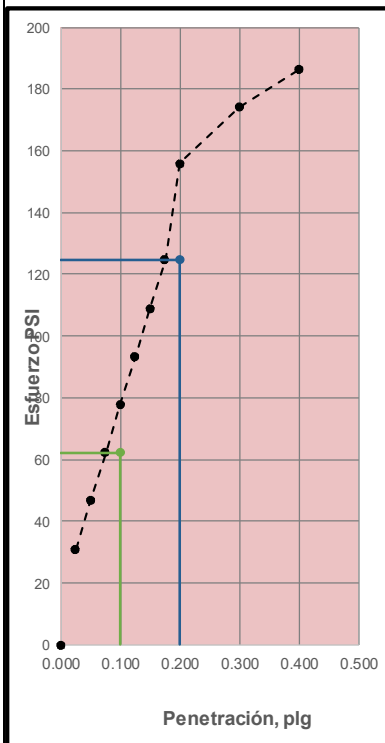
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.886
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD 11.04
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.792

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.07
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	6.10

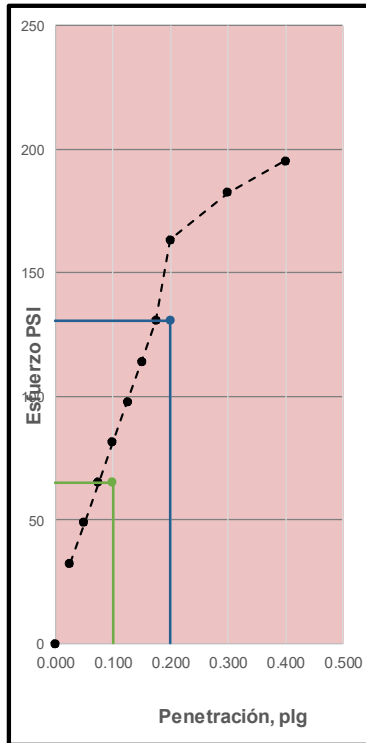
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 8.07 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 6.10 %

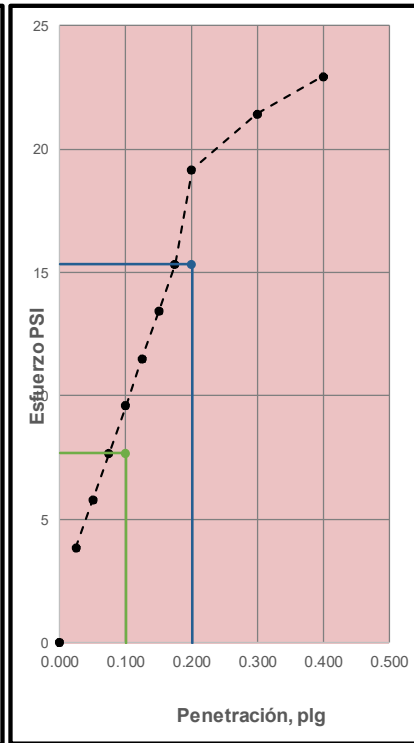
56 GOLPES



25 GOLPES




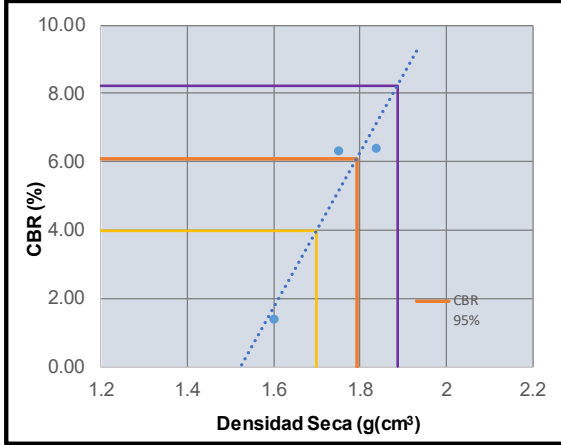
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 196.
CBR de la Calicata C-5

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0005							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	005-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-5							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12436.00	12769.00	12230.00	12523.00	11894.00	12221.00								
Peso de molde (g)	8048.00	8048.00	8006.00	8006.00	7975.00	7975.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4388.00	4721.00	4224.00	4517.00	3919.00	4246.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.062	2.22	1.985	2.12	1.842	2.00								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	247	369	233.00	301	230.00	339								
Peso suelo seco + tara (g)	224	215	210.00	213.00	205.00	218.00								
Peso tara (g)	36.31	36.31	37.33	37.33	37.71	37.71								
Peso de agua (g)	23.00	154	23.00	88	25.00	121								
Peso de suelo seco (g)	187.69	178.69	172.67	175.67	167.29	180.29								
Contenido de humedad (%)	12.25	86.18	13.32	50.09	14.94	67.11								
Densidad seca (g/cm³)	1.84	1.19	1.75	1.41	1.60	1.19								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	8	0.080	0.1			
08/02/25	15:30	48.00	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	10	0.100	0.1	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2			
10/02/25	15:30	96.00	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2	22	0.220	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand. kg/cm ²	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19
mm	pulg.		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		19	6.3	6.3		13	4.3	4.3		22	7.3	7.3	
1.270	0.050		61	20.3	20.3		60	20.0	20.0		29	9.7	9.7	
1.905	0.075		118	39.3	39.3		147	49.0	49.0		34	11.3	11.3	
2.540	0.100	70.455	192	64.0	64.0	6.4	189	63.0	63.0	6.3	42	14.0	14.0	1.4
3.175	0.125		249	83.0	83.0		221	73.7	73.7		45	15.0	15.0	
3.810	0.150		298	99.3	99.3		297	99.0	99.0		47	15.7	15.7	
4.445	0.175		343	114.3	114.3		327	109.0	109.0		51	17.0	17.0	
5.080	0.200	105.680	383	127.7	127.7	8.5	400	133.3	133.3	8.9	64	21.3	21.3	1.4
7.620	0.300		513	171.0	171.0		504	168.0	168.0		78	26.0	26.0	
10.160	0.400		598	199.3	199.3		591	197.0	197.0		87	29.0	29.0	
12.700	0.500		669	223.0	223.0		608	202.7	202.7		188	62.7	62.7	



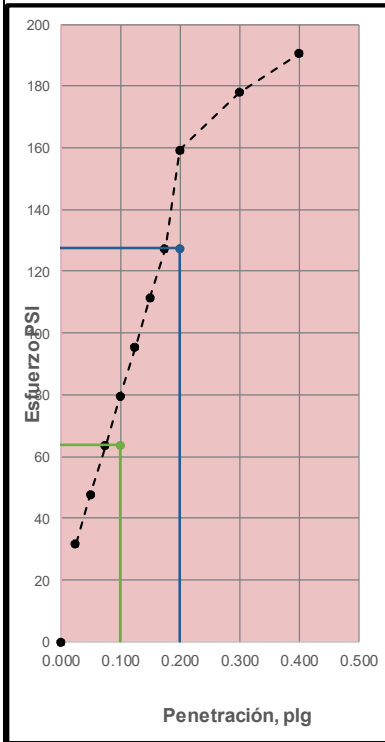
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.886
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD 11.35
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.792

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.23
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	6.10

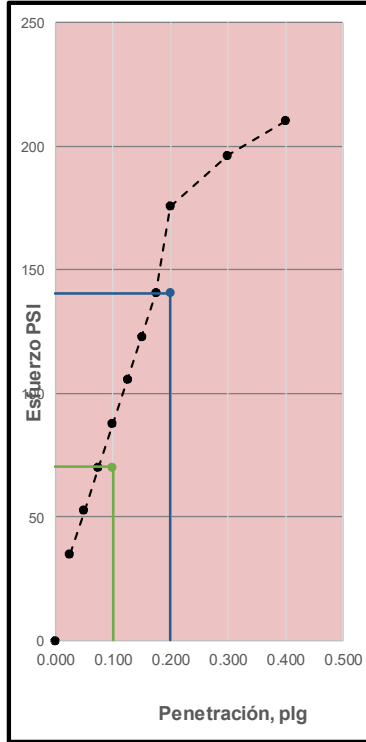
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	8.23 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	6.10 %

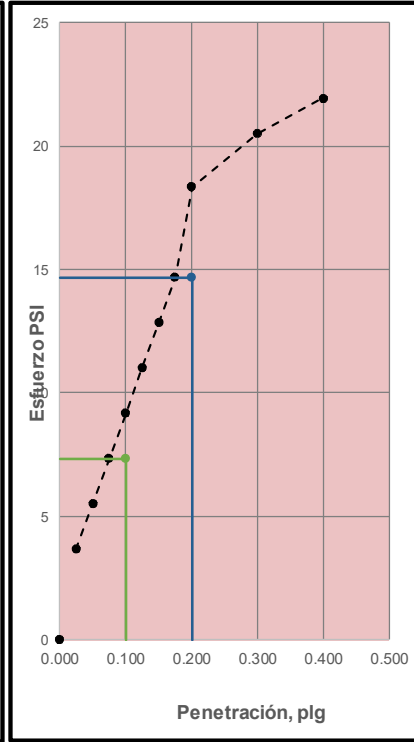
56 GOLPES



25 GOLPES



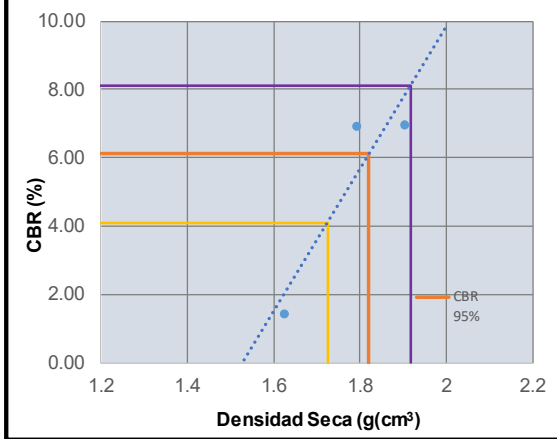
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 197.
CBR de la Calicata C-6

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0006							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	006-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-6							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12377.00	12608.00	12483.00	12665.00	11512.00	11727.00								
Peso de molde (g)	7856.00	7856.00	8070.00	8070.00	7851.00	7851.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4521.00	4752.00	4413.00	4595.00	3661.00	3876.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.125	2.23	2.074	2.16	1.720	1.82								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	242	336	253.00	351	236.00	351								
Peso suelo seco + tara (g)	221	221	224.00	229.00	225.00	229.00								
Peso tara (g)	39.87	39.87	39.05	39.05	38.73	38.73								
Peso de agua (g)	21.00	115	29.00	122	11.00	122								
Peso de suelo seco (g)	181.13	181.13	184.95	189.95	186.27	190.27								
Contenido de humedad (%)	11.59	63.49	15.68	64.23	5.91	64.12								
Densidad seca (g/cm³)	1.90	1.37	1.79	1.31	1.62	1.11								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
08/02/25	15:30	48.00	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2			
10/02/25	15:30	96.00	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2	20	0.200	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand.	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19
			lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
mm	pulg.	kg/cm2			Correg.				Correg.				Correg.	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		21	7.0	7.0		13	4.3	4.3		24	8.0	8.0	
1.270	0.050		67	22.3	22.3		66	22.0	22.0		32	10.7	10.7	
1.905	0.075		131	43.7	43.7		130	43.3	43.3		38	12.7	12.7	
2.540	0.100	70.455	209	69.7	69.7	7.0	208	69.3	69.3	6.9	43	14.3	14.3	1.4
3.175	0.125		275	91.7	91.7		274	91.3	91.3		49	16.3	16.3	
3.810	0.150		329	109.7	109.7		328	109.3	109.3		52	17.3	17.3	
4.445	0.175		378	126.0	126.0		377	125.7	125.7		56	18.7	18.7	
5.080	0.200	105.680	422	140.7	140.7	9.4	421	140.3	140.3	9.4	71	23.7	23.7	1.6
7.620	0.300		567	189.0	189.0		565	188.3	188.3		86	28.7	28.7	
10.160	0.400		660	220.0	220.0		658	219.3	219.3		96	32.0	32.0	
12.700	0.500		738	246.0	246.0		737	245.7	245.7		207	69.0	69.0	



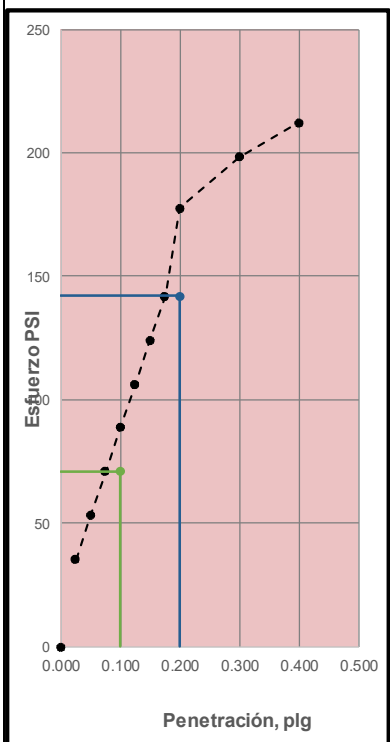
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.917
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD 11.10
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.821

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.10
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	6.10

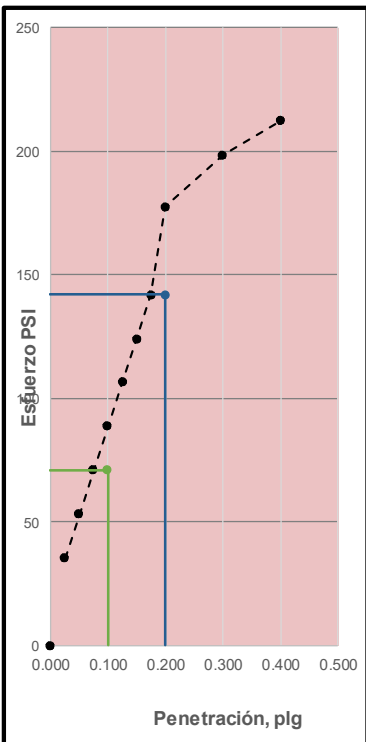
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 8.10 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 6.10 %

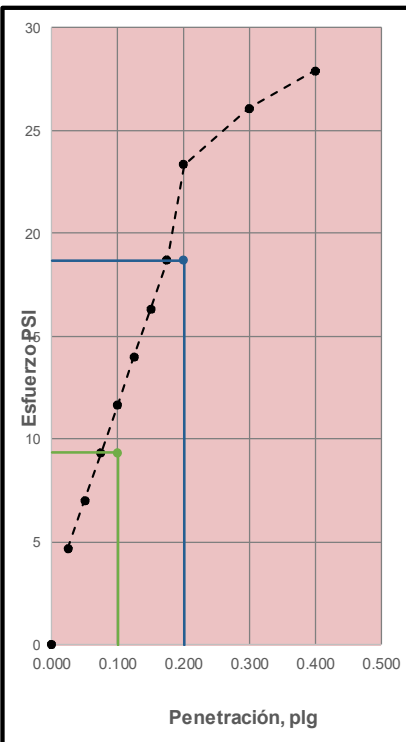
56 GOLPES



25 GOLPES




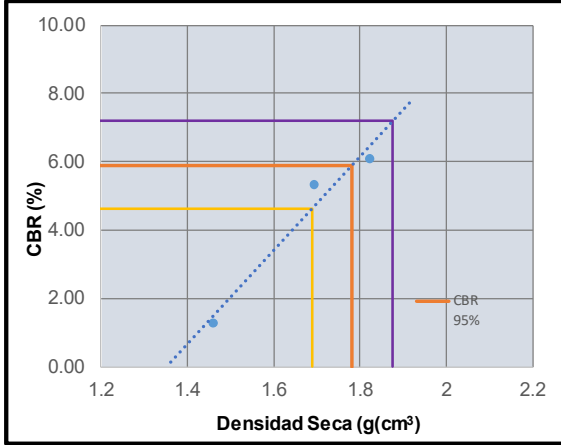
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 198.
CBR de la Calicata C-7

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0007							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	007-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-7							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12054.00	12294.00	11889.00	12127.00	11642.00	11842.00								
Peso de molde (g)	7945.00	7945.00	7983.00	7983.00	8073.00	8073.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4109.00	4349.00	3906.00	4144.00	3569.00	3769.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	1.931	2.04	1.836	1.95	1.677	1.77								
Tara (N°)	R-4	M-4	R-5	M-5	R-6	M-6								
Peso suelo húmedo + tara (g)	236	352	231.00	331	248.00	372								
Peso suelo seco + tara (g)	225	225	216.00	216.00	221.00	221.00								
Peso tara (g)	36.99	36.99	36.14	36.14	38.53	38.53								
Peso de agua (g)	11.00	127	15.00	115	27.00	151								
Peso de suelo seco (g)	188.01	188.01	179.86	179.86	182.47	182.47								
Contenido de humedad (%)	5.85	67.55	8.34	63.94	14.80	82.75								
Densidad seca (g/cm³)	1.82	1.22	1.69	1.19	1.46	0.97								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
08/02/25	15:30	48.00	4	0.040	0.0	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	10	0.100	0.1	10	0.100	0.1	12	0.120	0.1			
10/02/25	15:30	96.00	16	0.160	0.1	18	0.180	0.2	18	0.180	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand. kg/cm ²	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19
mm	pulg.		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		19	6.3	6.3		16	5.3	5.3		21	7.0	7.0	
1.270	0.050		59	19.7	19.7		55	18.3	18.3		29	9.7	9.7	
1.905	0.075		114	38.0	38.0		131	43.7	43.7		33	11.0	11.0	
2.540	0.100	70.455	182	60.7	60.7	6.1	160	53.3	53.3	5.3	38	12.7	12.7	1.3
3.175	0.125		240	80.0	80.0		195	65.0	65.0		43	14.3	14.3	
3.810	0.150		288	96.0	96.0		260	86.7	86.7		46	15.3	15.3	
4.445	0.175		331	110.3	110.3		287	95.7	95.7		49	16.3	16.3	
5.080	0.200	105.680	369	123.0	123.0	8.2	350	116.7	116.7	7.8	62	20.7	20.7	1.4
7.620	0.300		496	165.3	165.3		441	147.0	147.0		74	24.7	24.7	
10.160	0.400		577	192.3	192.3		516	172.0	172.0		85	28.3	28.3	
12.700	0.500		646	215.3	215.3		531	177.0	177.0		181	60.3	60.3	



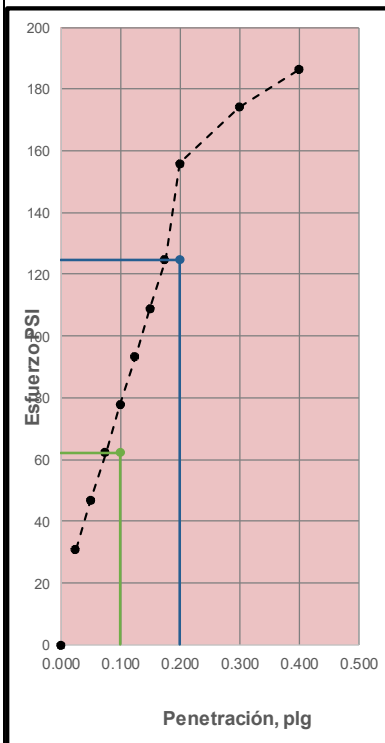
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.876
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD 12.35
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.782

B.R. al 100% de M.D.S (0,1") 7.19
 B.R. al 95% de M.D.S (0,1") 5.90

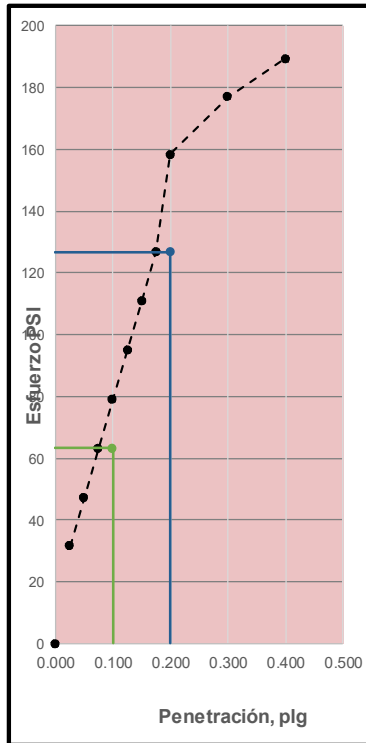
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 7.19 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 5.90 %

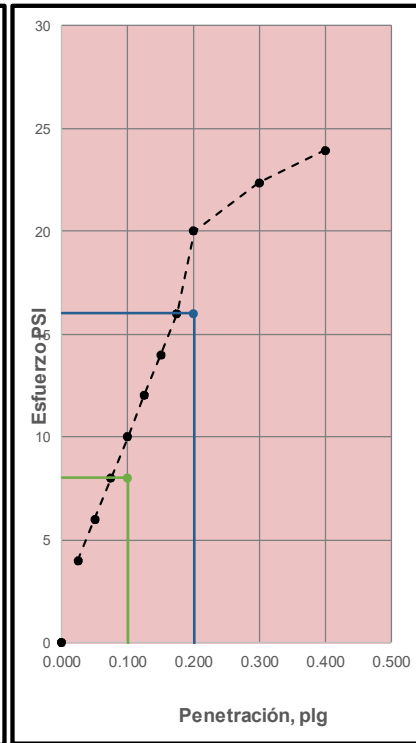
56 GOLPES



25 GOLPES




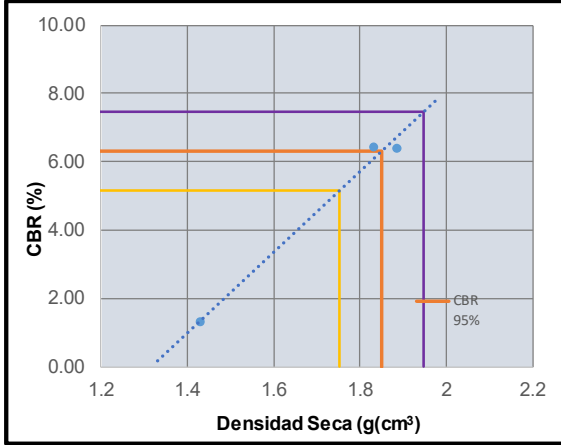
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 199.
CBR de la Calicata C-8

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0008							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	008-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-8							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12144.00	12334.00	12450.00	12649.00	11643.00	11832.00								
Peso de molde (g)	7962.00	7962.00	7970.00	7970.00	8025.00	8025.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4182.00	4372.00	4480.00	4679.00	3618.00	3807.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	1.965	2.05	2.105	2.20	1.700	1.79								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	235	290	248.00	379	250.00	322								
Peso suelo seco + tara (g)	227	215	221.00	220.00	216.00	216.00								
Peso tara (g)	39.88	39.88	39.91	39.91	35.77	35.77								
Peso de agua (g)	8.00	75	27.00	159	34.00	106								
Peso de suelo seco (g)	187.12	175.12	181.09	180.09	180.23	180.23								
Contenido de humedad (%)	4.28	42.83	14.91	88.29	18.86	58.81								
Densidad seca (g/cm³)	1.88	1.44	1.83	1.17	1.43	1.13								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1			
08/02/25	15:30	48.00	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1	10	0.100	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	8	0.080	0.1	10	0.100	0.1	16	0.160	0.1			
10/02/25	15:30	96.00	10	0.100	0.1	16	0.160	0.1	20	0.200	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand.	MOLDE N°				MOLDE N°				MOLDE N°			
			lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
mm	pulg.	kg/cm ²	lb/		Correg.	lb/		Correg.	Correg.	lb/		Correg.	Correg.	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		19	6.3	6.3		12	4.0	4.0		22	7.3	7.3	
1.270	0.050		62	20.7	20.7		61	20.3	20.3		29	9.7	9.7	
1.905	0.075		119	39.7	39.7		119	39.7	39.7		34	11.3	11.3	
2.540	0.100	70.455	192	64.0	64.0	6.4	193	64.3	64.3	6.4	39	13.0	13.0	1.3
3.175	0.125		252	84.0	84.0		251	83.7	83.7		44	14.7	14.7	
3.810	0.150		300	100.0	100.0		299	99.7	99.7		48	16.0	16.0	
4.445	0.175		346	115.3	115.3		345	115.0	115.0		52	17.3	17.3	
5.080	0.200	105.680	385	128.3	128.3	8.6	385	128.3	128.3	8.6	65	21.7	21.7	1.4
7.620	0.300		518	172.7	172.7		516	172.0	172.0		79	26.3	26.3	
10.160	0.400		603	201.0	201.0		601	200.3	200.3		88	29.3	29.3	
12.700	0.500		674	224.7	224.7		673	224.3	224.3		189	63.0	63.0	



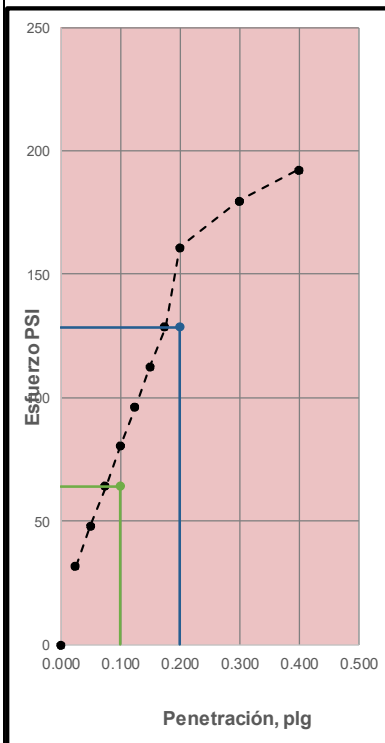
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.948
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 10.48
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.850

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	7.45
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	6.30

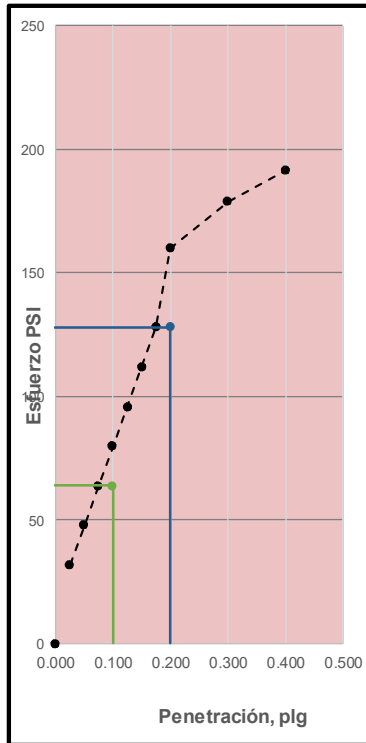
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	7.45 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	6.30 %

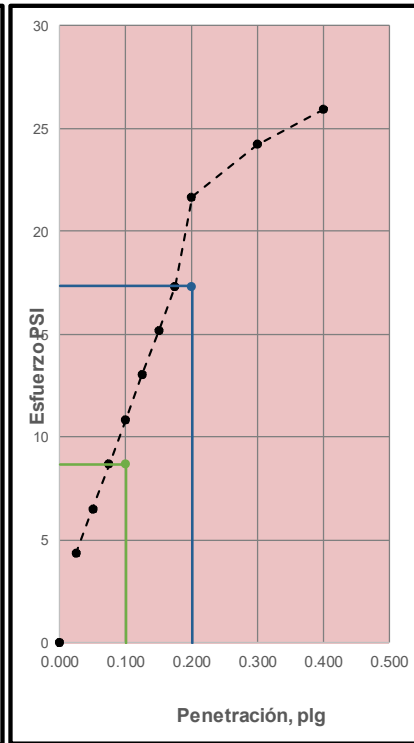
56 GOLPES



25 GOLPES



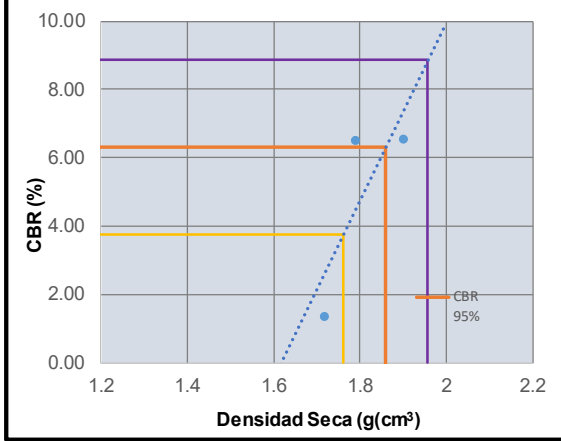
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 200.
CBR de la Calicata C-9

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JDR-0009							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	009-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E – 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-9							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12173.00	12385.00	12130.00	12392.00	12447.00	12647.00								
Peso de molde (g)	7880.00	7880.00	8053.00	8053.00	8096.00	8096.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4293.00	4505.00	4077.00	4339.00	4351.00	4551.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.017	2.12	1.916	2.04	2.045	2.14								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	225	394	236.00	368	242.00	331								
Peso suelo seco + tara (g)	214	212	223.00	213.00	209.00	219.00								
Peso tara (g)	36.17	36.17	38.39	38.39	36.13	36.13								
Peso de agua (g)	11.00	182	13.00	155	33.00	112								
Peso de suelo seco (g)	177.83	175.83	184.61	174.61	172.87	182.87								
Contenido de humedad (%)	6.19	103.51	7.04	88.77	19.09	61.25								
Densidad seca (g/cm³)	1.90	1.04	1.79	1.08	1.72	1.33								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1			
08/02/25	15:30	48.00	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	8	0.080	0.1	10	0.100	0.1	16	0.160	0.1			
10/02/25	15:30	96.00	10	0.100	0.1	14	0.140	0.1	18	0.180	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand.	MOLDE N°				MOLDE N°				MOLDE N°			
			lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
mm	pulg.	kg/cm2			Correg.				Correg.				Correg.	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		19	6.3	6.3		12	4.0	4.0		22	7.3	7.3	
1.270	0.050		62	20.7	20.7		62	20.7	20.7		30	10.0	10.0	
1.905	0.075		120	40.0	40.0		120	40.0	40.0		35	11.7	11.7	
2.540	0.100	70.455	196	65.3	65.3	6.5	195	65.0	65.0	6.5	40	13.3	13.3	1.3
3.175	0.125		256	85.3	85.3		256	85.3	85.3		45	15.0	15.0	
3.810	0.150		306	102.0	102.0		306	102.0	102.0		49	16.3	16.3	
4.445	0.175		353	117.7	117.7		352	117.3	117.3		54	18.0	18.0	
5.080	0.200	105.680	392	130.7	130.7	8.7	392	130.7	130.7	8.7	66	22.0	22.0	1.5
7.620	0.300		528	176.0	176.0		527	175.7	175.7		81	27.0	27.0	
10.160	0.400		617	205.7	205.7		614	204.7	204.7		90	30.0	30.0	
12.700	0.500		688	229.3	229.3		687	229.0	229.0		193	64.3	64.3	



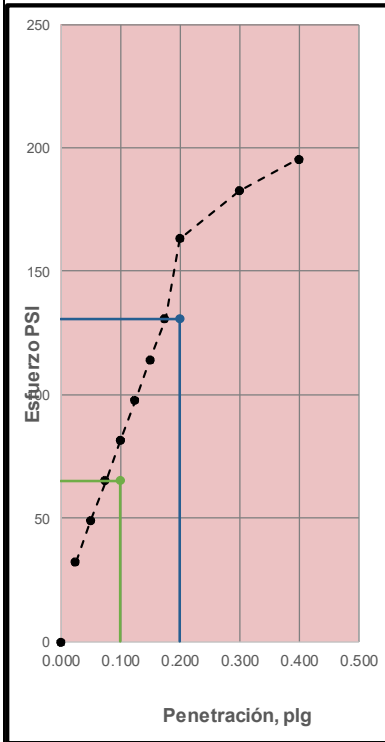
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.958
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 10.84
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.860

.B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.86
.B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	6.30

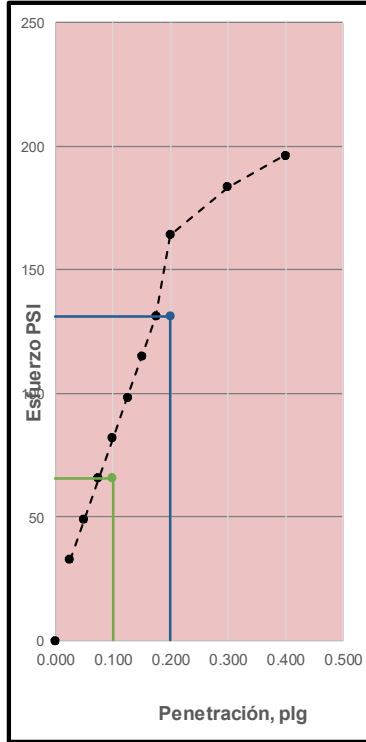
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	8.86 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	6.30 %

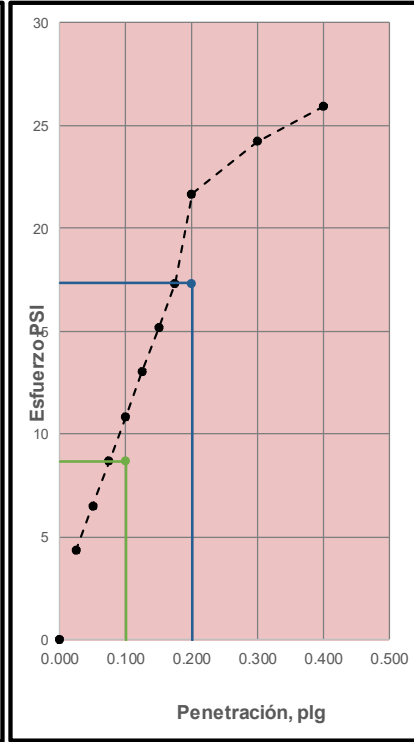
56 GOLPES



25 GOLPES



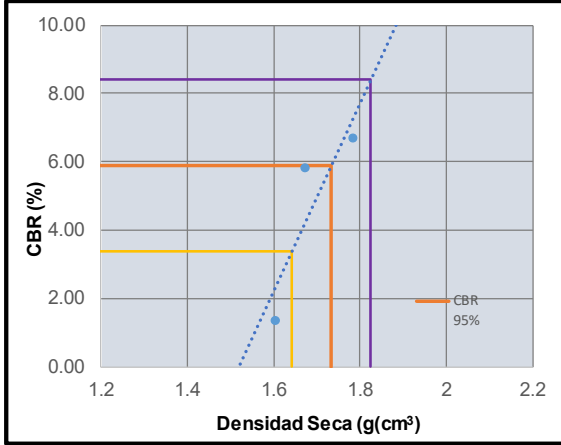
12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Figura 201.
CBR de la Calicata C-10

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JJDR-00010										
						FECHA	05/02/2025										
						INFORME	0010-2025										
						PAGINA 1 DE 1											
NTP 339.145 / MITC E – 132 / AS TMD-1883																	
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025										
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-10										
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1										
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50										
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN																
COMPACTACIÓN																	
Molde N°	21		20		19												
Capas N°	5		5		5												
Golpes por Capa N°	56		25		12												
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO											
Peso de molde + Suelo húmedo	12455.00	12059.00	12296.00	12622.00	12219.00	12413.00											
Peso de molde (g)	8007.00	7962.00	7934.00	8007.00	7916.00	7916.00											
Peso del Suelo húmedo (g)	4448.00	4097.00	4362.00	4615.00	4303.00	4497.00											
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00											
Densidad húmeda (g/cm³)	2.090	1.93	2.050	2.17	2.022	2.11											
Tara (N°)	R-7	M-7	R-8	M-8	R-9	M-9											
Peso suelo húmedo + tara (g)	256	348	266.00	309	263.00	373											
Peso suelo seco + tara (g)	224	222	224.00	224.00	217.00	217.00											
Peso tara (g)	36.68	37.3	36.68	36.68	40.92	40.92											
Peso de agua (g)	32.00	126	42.00	85	46.00	156											
Peso de suelo seco (g)	187.32	184.7	187.32	187.32	176.08	176.08											
Contenido de humedad (%)	17.08	68.22	22.42	45.38	26.12	88.60											
Densidad seca (g/cm³)	1.79	1.14	1.67	1.49	1.60	1.12											
EXPANSIÓN																	
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION							
				mm	%		mm	%		mm	%						
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0						
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	8	0.080	0.1						
08/02/25	15:30	48.00	8	0.080	0.1	8	0.080	0.1	10	0.100	0.1						
09/02/25	15:30	72.00	12	0.120	0.1	16	0.160	0.1	16	0.160	0.1						
10/02/25	15:30	96.00	14	0.140	0.1	18	0.180	0.2	18	0.180	0.2						
PENETRACIÓN																	
PENETRACIÓN	Carga Estand.	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19				
		mm	pulg.	kg/cm ²	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	
0.000	0.000			1	0.3	0.3											
0.635	0.025			20	6.7	6.7											
1.270	0.050			64	21.3	21.3											
1.905	0.075			126	42.0	42.0											
2.540	0.100	70.455		201	67.0	67.0	6.7	175	58.3	58.3	5.8	40	13.3	13.3		1.3	
3.175	0.125			264	88.0	88.0		215	71.7	71.7		47	15.7	15.7			
3.810	0.150			317	105.7	105.7		287	95.7	95.7		50	16.7	16.7			
4.445	0.175			364	121.3	121.3		316	105.3	105.3		54	18.0	18.0			
5.080	0.200	105.680		406	135.3	135.3	9.0	385	128.3	128.3	8.6	68	22.7	22.7		1.5	
7.620	0.300			545	181.7	181.7		485	161.7	161.7		82	27.3	27.3			
10.160	0.400			635	211.7	211.7		568	189.3	189.3		93	31.0	31.0			
12.700	0.500			710	236.7	236.7		584	194.7	194.7		199	66.3	66.3			



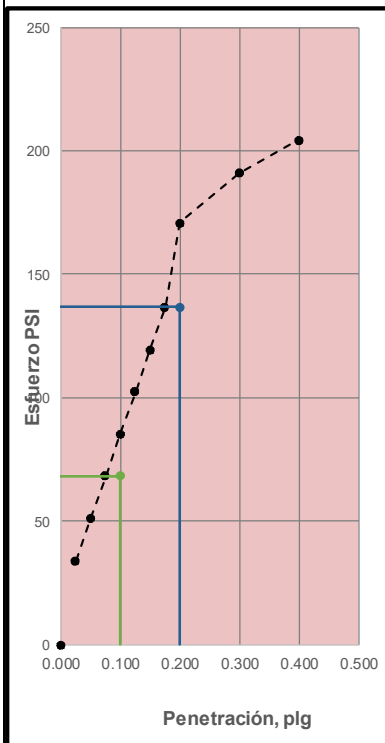
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.825
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 12.21
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.734

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.42
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	5.90

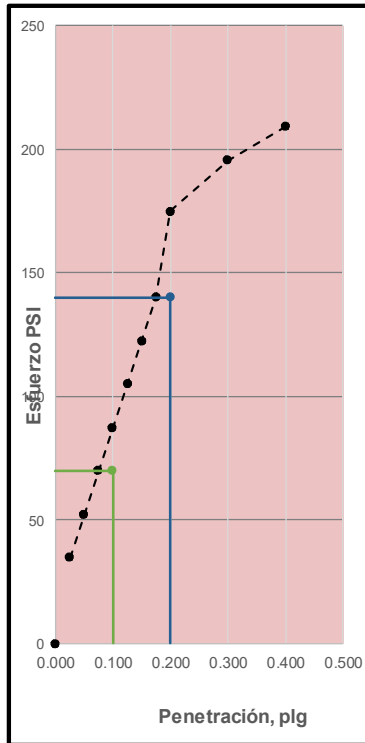
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	8.42 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	5.90 %

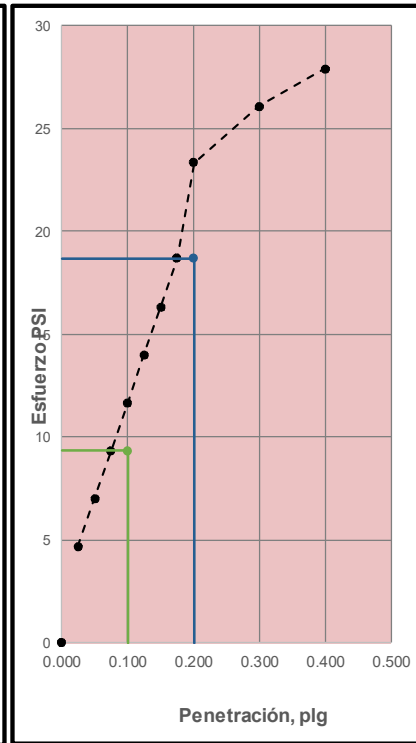
56 GOLPES



25 GOLPES




12 GOLPES

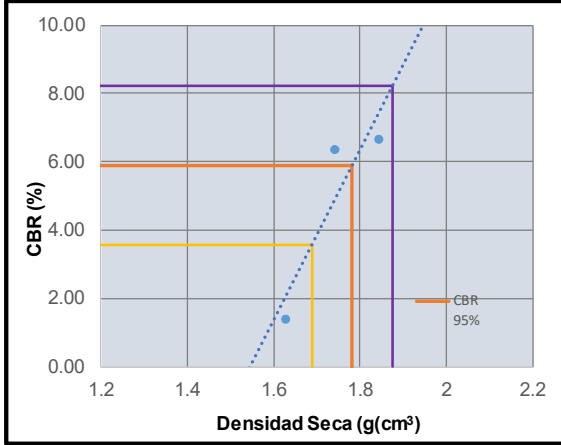


Nota: Elaboración propia

Figura 202.

CBR de la Calicata C-11

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JJDR-00011							
						FECHA	05/02/2025							
						INFORME	0011-2025							
						PAGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MITC E - 132 / AS TMD-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	02/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					CALICATA:	C-11							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	VÍA LONGITUDINAL NACIONAL PE-3S TRAMO SICUANI-SENCCA CHECTUYOC					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):	1.50							
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	21		20		19									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo	12024.00	12294.00	12154.00	12331.00	11951.00	12192.00								
Peso de molde (g)	7935.00	7935.00	7850.00	7850.00	7908.00	7908.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4089.00	4359.00	4304.00	4481.00	4043.00	4284.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	1.922	2.05	2.023	2.11	1.900	2.01								
Tara (N°)	R-10	M-10	R-11	M-11	R-12	M-12								
Peso suelo húmedo + tara (g)	235	322	238.00	307	232.00	349								
Peso suelo seco + tara (g)	227	221	210.00	224.00	204.00	224.00								
Peso tara (g)	35.64	35.64	36.91	36.91	36.25	36.25								
Peso de agua (g)	8.00	101	28.00	83	28.00	125								
Peso de suelo seco (g)	191.36	185.36	173.09	187.09	167.75	187.75								
Contenido de humedad (%)	4.18	54.49	16.18	44.36	16.69	66.58								
Densidad seca (g/cm³)	1.84	1.33	1.74	1.46	1.63	1.21								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION		DIAL	EXPANSION				
				mm	%		mm	%		mm	%			
06/02/25	15:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
07/02/25	15:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
08/02/25	15:30	48.00	4	0.040	0.0	6	0.060	0.1	8	0.080	0.1			
09/02/25	15:30	72.00	6	0.060	0.1	12	0.120	0.1	14	0.140	0.1			
10/02/25	15:30	96.00	10	0.100	0.1	16	0.160	0.1	16	0.160	0.1			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand. kg/cm ²	MOLDE N°			21	MOLDE N°			20	MOLDE N°			19
mm	pulg.		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		20	6.7	6.7		14	4.7	4.7		23	7.7	7.7	
1.270	0.050		64	21.3	21.3		63	21.0	21.0		31	10.3	10.3	
1.905	0.075		125	41.7	41.7		155	51.7	51.7		36	12.0	12.0	
2.540	0.100	70.455	200	66.7	66.7	6.7	190	63.3	63.3	6.3	41	13.7	13.7	1.4
3.175	0.125		263	87.7	87.7		233	77.7	77.7		47	15.7	15.7	
3.810	0.150		315	105.0	105.0		313	104.3	104.3		50	16.7	16.7	
4.445	0.175		362	120.7	120.7		345	115.0	115.0		54	18.0	18.0	
5.080	0.200	105.680	404	134.7	134.7	9.0	422	140.7	140.7	9.4	68	22.7	22.7	1.5
7.620	0.300		542	180.7	180.7		532	177.3	177.3		82	27.3	27.3	
10.160	0.400		631	210.3	210.3		624	208.0	208.0		92	30.7	30.7	
12.700	0.500		706	235.3	235.3		642	214.0	214.0		198	66.0	66.0	



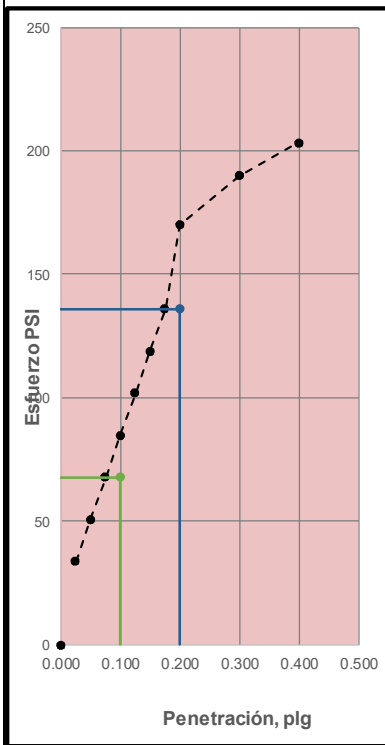
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.876
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDA 12.30
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) 1.782

B.R. al 100% de M.D.S (0,1")	8.22
B.R. al 95% de M.D.S (0,1")	5.90

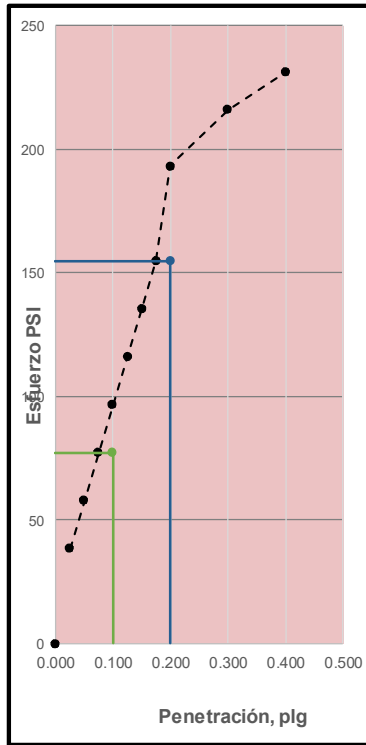
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	8.22 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	5.90 %

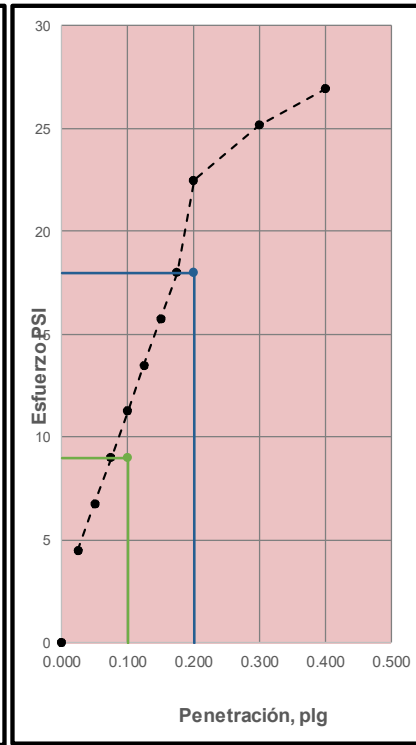
56 GOLPES



25 GOLPES



12 GOLPES



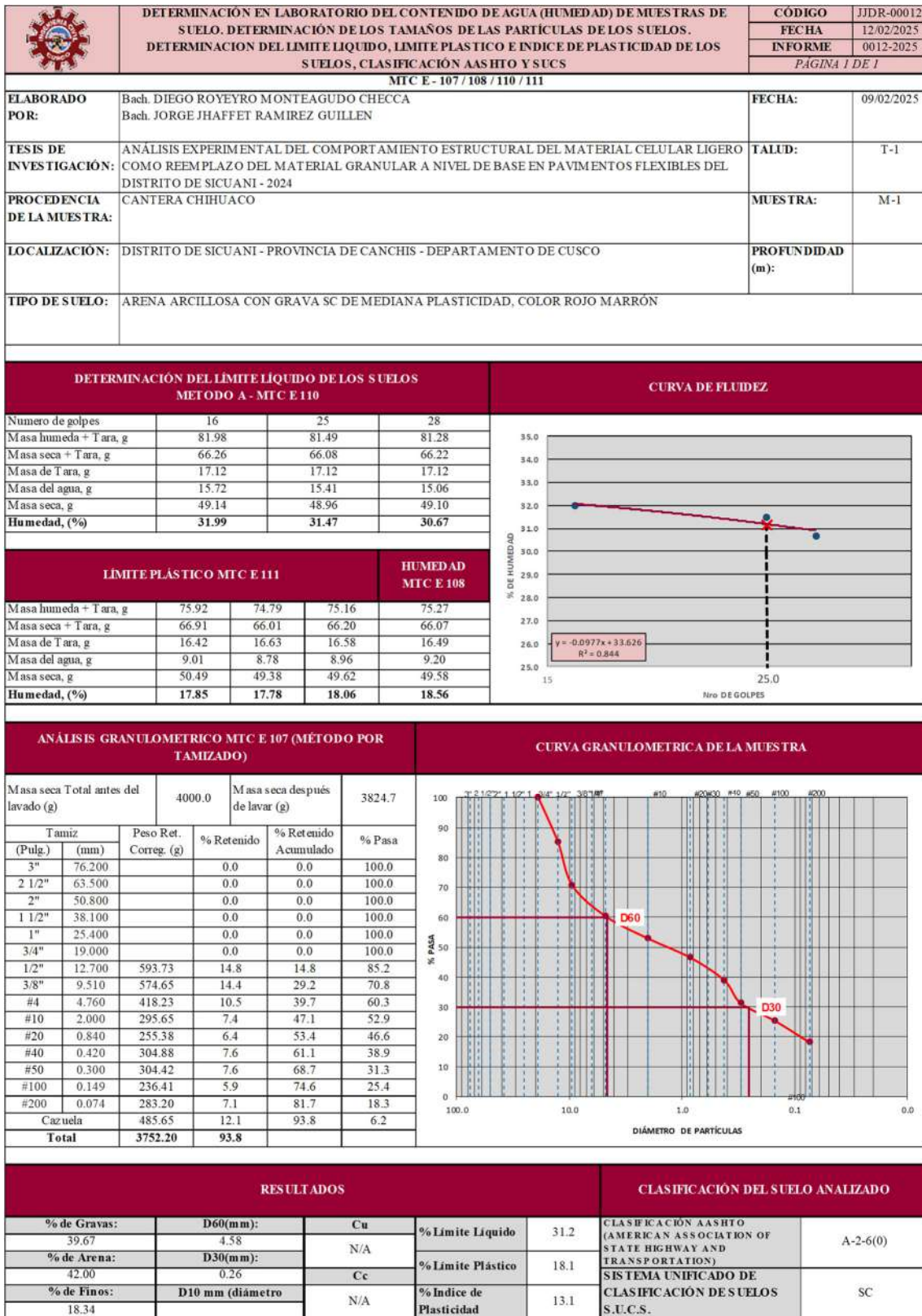
Nota: Elaboración propia

Anexo 13.

Análisis Granulométrico y límites de consistencia de material granular de cantera

Figura 203.

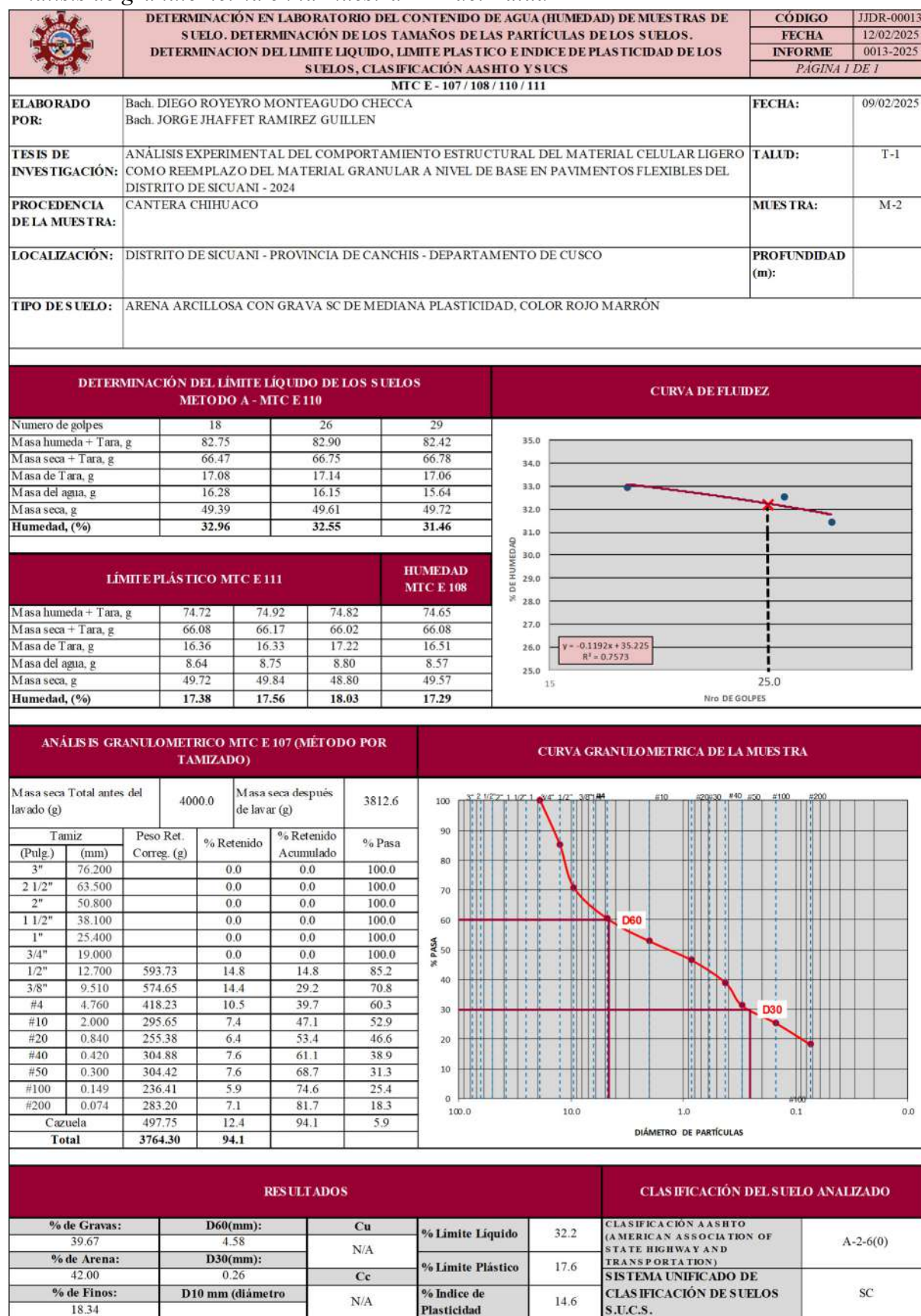
Análisis de granulometría en la muestra M-1 del Talud T-1



Nota: Elaboración propia

Figura 204.


Análisis de granulometría en la muestra M-2 del Talud T-1



Nota: Elaboración propia

Figura 205.

Análisis de granulometría en la muestra M-3 del Talud T-1

 DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (HUMEDAD) DE MUESTRAS DE SUELO. DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS. DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS, CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS		CÓDIGO	JJDR-00014		
		FECHA	12/02/2025		
		INFORME	0014-2025		
		PÁGINA 1 DE 1			
MTC E - 107 / 108 / 110 / 111					
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN	FECHA:	09/02/2025		
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024	TALUD:	T-1		
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	CANTERA CHIHUACO	MUESTRA:	M-3		
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO	PROFUNDIDAD (m):			
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN				
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS METODO A - MTC E 110		CURVA DE FLUIDEZ			
Numero de golpes	16	24	28		
Masa húmeda + Tara, g	82.48	82.23	82.15		
Masa seca + Tara, g	66.87	66.98	66.98		
Masa de Tara, g	17.10	17.08	17.12		
Masa del agua, g	15.61	15.25	15.17		
Masa seca, g	49.77	49.90	49.86		
Humedad, (%)	31.36	30.56	30.43		
LÍMITE PLÁSTICO MTC E 111			HUMEDAD MTC E 108		
Masa húmeda + Tara, g	74.97	75.26	75.42	75.51	
Masa seca + Tara, g	66.08	66.42	66.22	66.38	
Masa de Tara, g	16.58	16.95	16.70	16.81	
Masa del agua, g	8.89	8.84	9.20	9.13	
Masa seca, g	49.50	49.47	49.52	49.57	
Humedad, (%)	17.96	17.87	18.58	18.42	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MTC E 107 (MÉTODO POR TAMIZADO)		CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA			
Masa seca Total antes del lavado (g)	4000.0	Masa seca después de lavar (g)	3760.5		
Tamiz (Pulg.)	Peso Ret. Correg. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	
3"	76.200	0.0	0.0	100.0	
2 1/2"	63.500	0.0	0.0	100.0	
2"	50.800	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	38.100	0.0	0.0	100.0	
1"	25.400	0.0	0.0	100.0	
3/4"	19.000	0.0	0.0	100.0	
1/2"	12.700	647.17	16.2	83.8	
3/8"	9.510	528.68	13.2	70.6	
#4	4.760	414.05	10.4	60.3	
#10	2.000	277.91	6.9	53.3	
#20	0.840	268.15	6.7	46.6	
#40	0.420	329.27	8.2	38.4	
#50	0.300	295.29	7.4	31.0	
#100	0.149	252.96	6.3	24.7	
#200	0.074	254.88	6.4	18.3	
Cazuela	450.06	11.3	93.0	7.0	
Total	3718.42	93.0			
RESULTADOS			CLASIFICACIÓN DEL SUELO ANALIZADO		
% de Gravas:	D60(mm):	Cu	% Límite Líquido	30.6	CLASIFICACIÓN AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION)
% de Arena:	D30(mm):	N/A	% Límite Plástico	18.2	
% de Finos:	D10 mm (diámetro)	N/A	% Índice de Plasticidad	12.4	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.


Nota: Elaboración propia

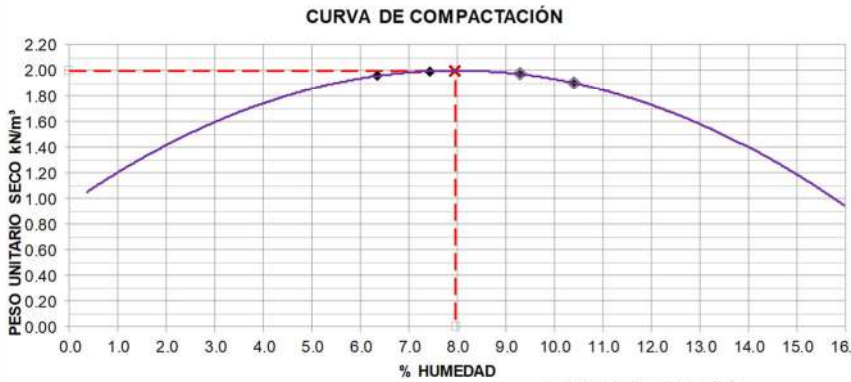
Anexo 14.

Cálculo de la Máxima Densidad Seca y Contenido Óptimo de humedad de material granular de cantera

Figura 206.

Máxima Densidad seca de la muestra M-1 del Talud T-1


 RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-00012			
		FECHA	12/02/2025			
		INFORME	0012-2025			
PÁGINA 1 DE 1						
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLÉN	FECHA:	09/02/2025			
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024	TALUD:	T-1			
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	CANTERA CHIHUACO	MUESTRA:	M-1			
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO	PROFUNDIDAD (m):				
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FO} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO: C	
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6522	6535	6481	6467	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	2022	2035	1981	1967	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-63	E-86	E-84	E-72	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	397.98	398.51	405.41	379.96	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	375.90	370.77	374.81	361.79	
MASA DEL MOLDE	g	79.40	72.74	80.68	76.03	
MASA DEL AGUA	g	22.08	27.74	30.60	18.17	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	296.50	298.03	294.13	285.76	
% de HUMEDAD	%	7.4	9.3	10.4	6.4	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.14	2.16	2.10	2.08	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.99	1.97	1.90	1.96	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.55	19.34	18.64	19.21	
	lb/ft ³	124.45	123.12	118.66	122.30	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	13.6	14.1	16.0	14.5	

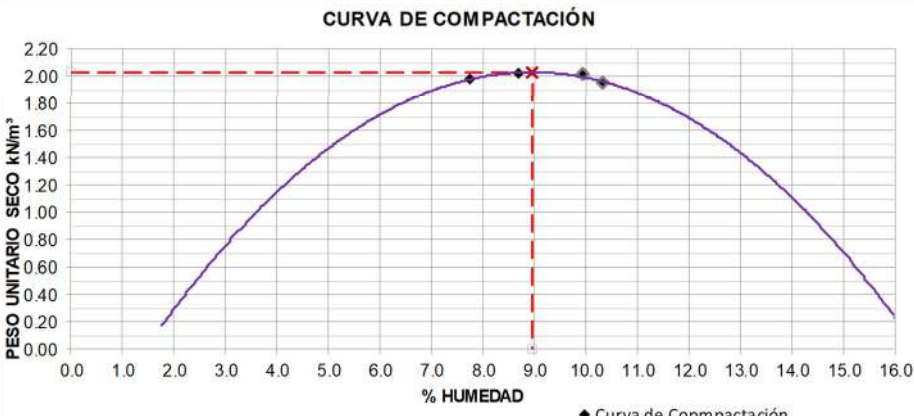
CURVA DE COMPACTACIÓN																	
	<table border="1"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">20.00</td> <td style="text-align: center;">kN/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2039</td> <td style="text-align: center;">kg/m³</td> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">HUMEDAD ÓPTIMA (%)</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8.0</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NO REQUIERE</td> <td style="text-align: center;">kN/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NO REQUIERE</td> <td style="text-align: center;">kg/m³</td> </tr> </table>	PESO UNITARIO SECO MÁXIMO		20.00	kN/m ³	2039	kg/m ³	HUMEDAD ÓPTIMA (%)		8.0		PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO		NO REQUIERE	kN/m ³	NO REQUIERE	kg/m ³
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO																	
20.00	kN/m ³																
2039	kg/m ³																
HUMEDAD ÓPTIMA (%)																	
8.0																	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO																	
NO REQUIERE	kN/m ³																
NO REQUIERE	kg/m ³																

Nota: Elaboración propia

Figura 207.

Máxima Densidad seca de la muestra M-2 del Talud T-1

 RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-00013			
		FECHA	12/02/2025			
		INFORME	0013-2025			
		PÁGINA 1 DE 1				
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN	FECHA:	09/02/2025			
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024	TALUD:	T-1			
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	CANTERA CHIHUACO	MUESTRA:	M-2			
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO	PROFUNDIDAD (m):				
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74
	FINA P _{FE} (%)					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	1	2	3	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6572	6585	6531	6517	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	2072	2085	2031	2017	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	E-65	E-88	E-96	E-74	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	377.98	409.52	388.23	399.96	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	353.60	379.83	359.07	376.58	
MASA DEL MOLDE	g	73.42	81.48	76.85	75.36	
MASA DEL AGUA	g	24.38	29.69	29.16	23.38	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	280.18	298.35	282.22	301.22	
% de HUMEDAD	%	8.7	10.0	10.3	7.8	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.19	2.21	2.15	2.14	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	2.02	2.01	1.95	1.98	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.80	19.70	19.12	19.44	
	lb/ft ³	126.06	125.40	121.73	123.78	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	12.9	13.2	14.7	13.8	



CURVA DE COMPACTACIÓN


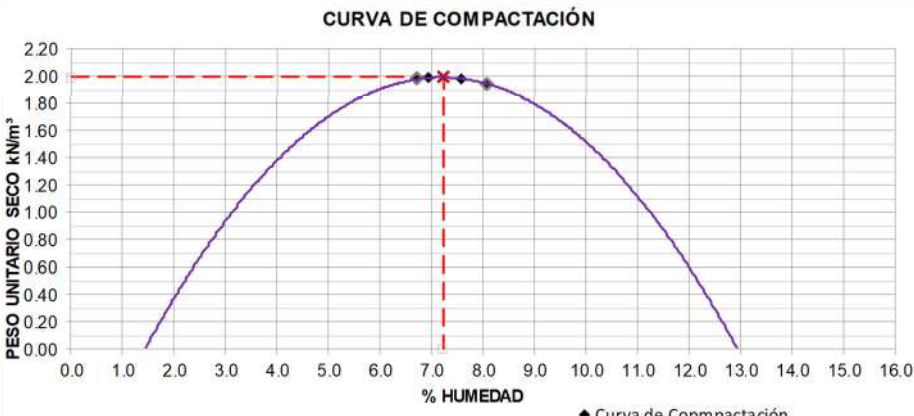
♦ Curva de Compacción

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
20.30	kN/m ³
2070	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
9.0	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Nota: Elaboración propia

Figura 208.

Máxima Densidad seca de la muestra M-3 del Talud T-1

 RELACIONES DE HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)		CÓDIGO	JJDR-00014																			
		FECHA	12/02/2025																			
		INFORME	0014-2025																			
		PÁGINA 1 DE 1																				
NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557																						
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN	FECHA:	09/02/2025																			
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024	TALUD:	T-1																			
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	CANTERA CHIHUACO	MUESTRA:	M-3																			
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO	PROFUNDIDAD (m):																				
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN																					
REQUIERE CORRECCIÓN SOBRETAMAÑOS	FRACCIÓN	PORCENTAJE DE FRACCIÓN	HUMEDAD (%)	HUMEDAD CORREGIDA	GRAVEDAD ESPECÍFICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA																
NO	GRUESA P _{FG} (%)				2.74	2.74																
	FINA P _{FE} (%)																					
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS					MÉTODO DE ENSAYO:	C																
PRUEBA	Und	1	2	3	4																	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	6000	6000	6000	6000																	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	Nº	25	25	25	25																	
NUMERO DE MOLDE	Nº	1	2	3	4																	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	944	944	944	944																	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6515	6496	6483	6506																	
MASA DEL MOLDE	g	4500	4500	4500	4500																	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	2015	1996	1983	2006																	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN																						
NUMERO DE RECIPIENTE	Nº	E-66	E-88	E-96	E-74																	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	382.24	394.42	387.59	375.53																	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	360.74	374.12	364.43	356.03																	
MASA DEL MOLDE	g	77.25	72.60	78.27	74.61																	
MASA DEL AGUA	g	21.50	20.30	23.16	19.50																	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	283.49	301.52	286.16	281.42																	
% de HUMEDAD	%	7.6	6.7	8.1	6.9																	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPÉCIMENES																						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.13	2.11	2.10	2.13																	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.98	1.98	1.94	1.99																	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.46	19.43	19.06	19.49																	
	lb/ft ³	123.86	123.67	121.32	124.06																	
HUMEDAD DE SATURACIÓN																						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	13.8	13.9	14.9	13.7																	
						<table border="1"> <tr> <th colspan="2">PESO UNITARIO SECO MÁXIMO</th> </tr> <tr> <td>19.90</td> <td>kN/m³</td> </tr> <tr> <td>2029</td> <td>kg/m³</td> </tr> <tr> <th colspan="2">HUMEDAD ÓPTIMA (%)</th> </tr> <tr> <td>7.2</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="2">PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO</th> </tr> <tr> <td>NO REQUIERE</td> <td>kN/m³</td> </tr> <tr> <td>NO REQUIERE</td> <td>kg/m³</td> </tr> </table>	PESO UNITARIO SECO MÁXIMO		19.90	kN/m ³	2029	kg/m ³	HUMEDAD ÓPTIMA (%)		7.2		PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO		NO REQUIERE	kN/m ³	NO REQUIERE	kg/m ³
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO																						
19.90	kN/m ³																					
2029	kg/m ³																					
HUMEDAD ÓPTIMA (%)																						
7.2																						
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO																						
NO REQUIERE	kN/m ³																					
NO REQUIERE	kg/m ³																					

Nota: Elaboración propia

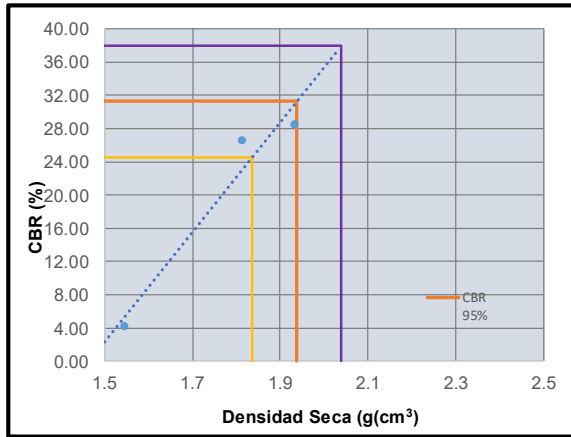
Anexo 15.

Cálculo de CBR de material granular de cantera

Figura 209.

CBR de la muestra M-1 del Talud T-1

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JJDR-00012							
						FECHA	12/02/2025							
						INFORME	0012-2025							
						PÁGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MTC E – 132 / ASTM D-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYERO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	9/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					TALUD:	T-1							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	CANTERA CHIHUACO					MUESTRA:	M-1							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):								
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	32		31		40									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO								
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12483.00	12713.00	12377.00	12607.00	11812.00	12042.00								
Peso de molde (g)	7934.00	7934.00	8044.00	8044.00	7926.00	7926.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4549.00	4779.00	4333.00	4563.00	3886.00	4116.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.138	2.25	2.036	2.14	1.826	1.93								
Tara (N°)	R-13	M-13	R-14	M-14	R-15	M-15								
Peso suelo húmedo + tara (g)	251.00	345.00	251.00	345.00	248.00	342.00								
Peso suelo seco + tara (g)	231.00	316.00	228.00	313.00	216.00	301.00								
Peso tara (g)	42.10	42.10	41.12	41.12	40.37	40.37								
Peso de agua (g)	20.00	29.00	23.00	32.00	32.00	41.00								
Peso de suelo seco (g)	188.90	273.90	186.88	271.88	175.63	260.63								
Contenido de humedad (%)	10.59	10.59	12.31	11.77	18.22	15.73								
Densidad seca (g/cm³)	1.93	2.03	1.81	1.92	1.54	1.67								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN				
				mm	%		mm	%		mm	%			
13/02/25	16:30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
14/02/25	16:30	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
15/02/25	16:30	48.00	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1			
16/02/25	16:30	72.00	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2			
17/02/25	16:30	96.00	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2	20	0.200	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand.	MOLDE N° 32				MOLDE N° 31				MOLDE N° 40			
			lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %
mm	pnlg.	kg/cm ²				Correg.				Correg.				Correg.
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		61	20.3	20.3		34	11.3	11.3		69	23.0	23.0	
1.270	0.050		193	64.3	64.3		171	57.0	57.0		92	30.7	30.7	
1.905	0.075		378	126.0	126.0		338	112.7	112.7		110	36.7	36.7	
2.540	0.100	70.455	855	285.0	285.0	28.5	798	266.0	266.0	26.6	125	41.7	41.7	4.2
3.175	0.125		925	308.3	308.3		821	273.7	273.7		141	47.0	47.0	
3.810	0.150		949	316.3	316.3		852	284.0	284.0		150	50.0	50.0	
4.445	0.175		1091	363.7	363.7		979	326.3	326.3		162	54.0	54.0	
5.080	0.200	105.680	1218	406.0	406.0	27.1	1093	364.3	364.3	24.3	205	68.3	68.3	4.6
7.620	0.300		1636	545.3	545.3		1467	489.0	489.0		248	82.7	82.7	
10.160	0.400		1904	634.7	634.7		1709	569.7	569.7		277	92.3	92.3	
12.700	0.500		2129	709.7	709.7		1914	638.0	638.0		597	199.0	199.0	



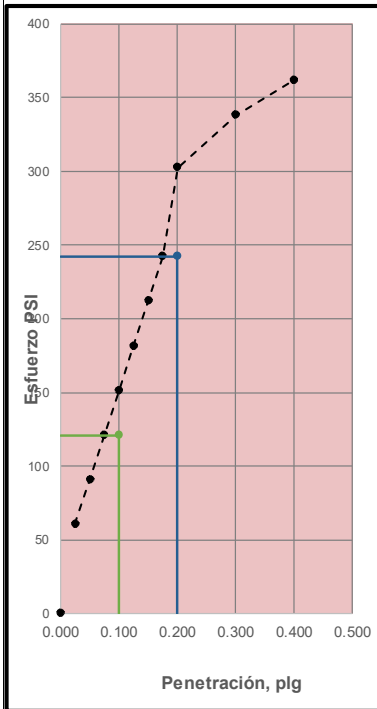
MÉTODO DE COMPACTACIÓN NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) : 2.04
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 7.96
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) : 1.94

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	38.01
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	31.26

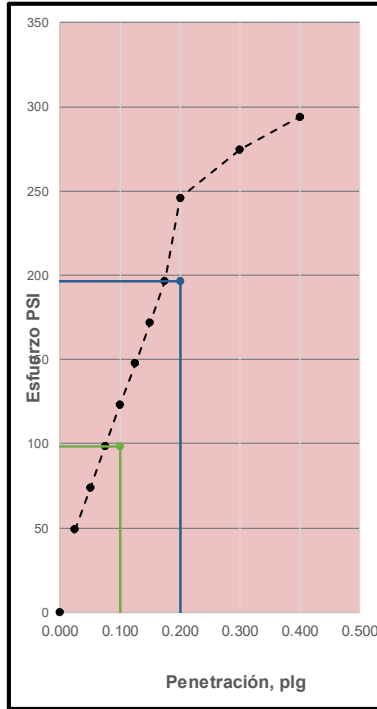
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	38.01 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	31.26 %

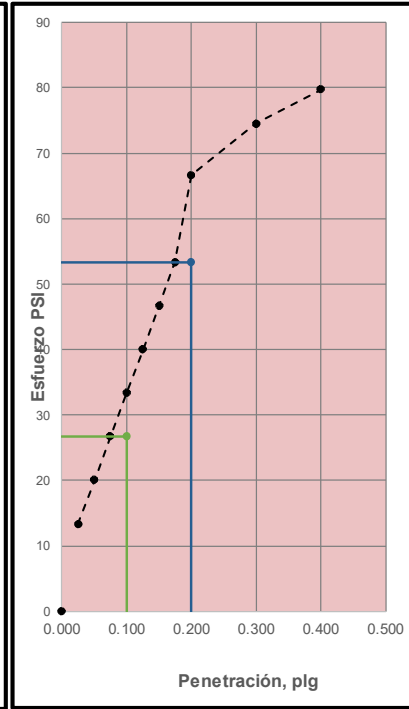
56 GOLPES



25 GOLPES



12 GOLPES

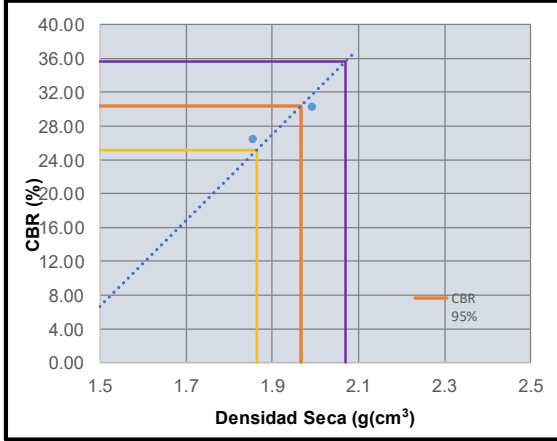


Nota: Elaboración propia

Figura 210.

CBR de la muestra M-2 del Talud T-1

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO										CÓDIGO	JJDR-00013	
												FECHA	12/02/2025	
												INFORME	0013-2025	
												PÁGINA 1 DE 1		
NTP 339.145 / MTC E – 132 / ASTM D-1883														
ELABORADO POR:		Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN										FECHA:		9/02/2025
TESIS DE INVESTIGACIÓN:		ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024										TALUD:		T-1
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:		CANTERA CHIHUACO										MUESTRA:		M-2
LOCALIZACIÓN:		DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO										PROFUNDIDAD (m):		
TIPO DE SUELO:		ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN												
COMPACTACIÓN														
Molde N°		36			42			58						
Capas N°		5			5			5						
Golpes por Capa N°		56			25			12						
Condición de la muestra		NO SATURADO			SATURADO			NO SATURADO			SATURADO			
Peso de molde + Suelo húmedo (g)		12484.00			12714.00			12336.00			12566.00			
Peso de molde (g)		7901.00			7901.00			7875.00			7875.00			
Peso del Suelo húmedo (g)		4583.00			4813.00			4461.00			4691.00			
Volumen del molde (cm ³)		2128.00			2128.00			2128.00			2128.00			
Densidad húmeda (g/cm³)		2.154			2.26			2.096			2.20			
Tara (N°)		R-16			M-16			R-17			M-17			
Peso suelo húmedo + tara (g)		243.00			337.00			257.00			351.00			
Peso suelo seco + tara (g)		228.00			313.00			232.00			317.00			
Peso tara (g)		42.10			42.10			41.12			41.12			
Peso de agua (g)		15.00			24.00			25.00			34.00			
Peso de suelo seco (g)		185.90			270.90			190.88			275.88			
Contenido de humedad (%)		8.07			8.86			13.10			12.32			
Densidad seca (g/cm³)		1.99			2.08			1.85			1.96			
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL		EXPANSIÓN		DIAL		EXPANSIÓN		DIAL		EXPANSIÓN	
			mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%		
13/02/25	16:35	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0	0	0.000	0	
14/02/25	16:35	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0	0.040	0.0	
15/02/25	16:35	48.00	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	0.120	0.1	
16/02/25	16:35	72.00	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2	0.180	0.2	
17/02/25	16:35	96.00	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2	20	0.200	0.2	0.200	0.2	
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		Carga Estand. kg/cm ²	MOLDE N° 36				MOLDE N° 42				MOLDE N° 58			
mm	pulg.		lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Correg.	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Correg.	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Correg.
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		66	22.0	22.0		37	12.3	12.3		75	25.0	25.0	
1.270	0.050		495	165.0	165.0		186	62.0	62.0		100	33.3	33.3	
1.905	0.075		624	208.0	208.0		367	122.3	122.3		119	39.7	39.7	
2.540	0.100	70.455	909	303.0	303.0	30.3	795	265.0	265.0	26.5	134	44.7	44.7	4.5
3.175	0.125		994	331.3	331.3		849	283.0	283.0		154	51.3	51.3	
3.810	0.150		1033	344.3	344.3		927	309.0	309.0		163	54.3	54.3	
4.445	0.175		1186	395.3	395.3		1065	355.0	355.0		176	58.7	58.7	
5.080	0.200	105.680	1325	441.7	441.7	29.4	1189	396.3	396.3	26.4	223	74.3	74.3	5.0
7.620	0.300		1780	593.3	593.3		1596	532.0	532.0		270	90.0	90.0	
10.160	0.400		2072	690.7	690.7		1859	619.7	619.7		301	100.3	100.3	
12.700	0.500		2316	772.0	772.0		2082	694.0	694.0		350	116.7	116.7	



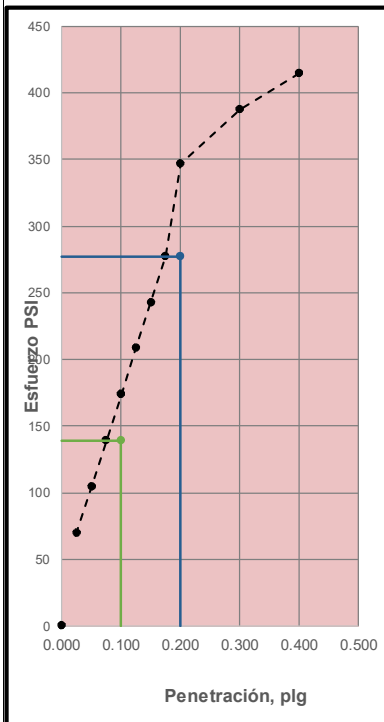
MÉTODO DE COMPACTACIÓN : NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557
 MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) : 2.07
 ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 8.96
 95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) : 1.97

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	35.62
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	30.35

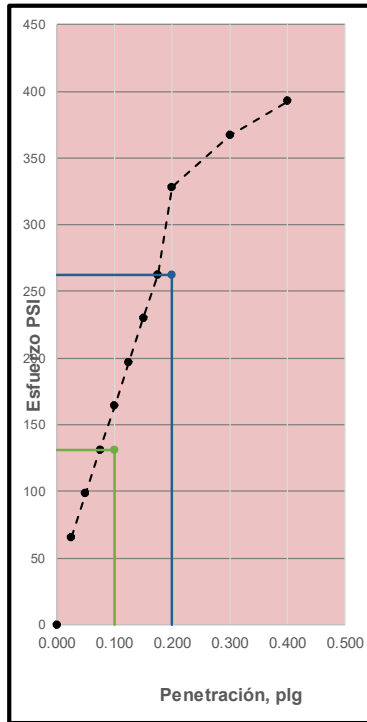
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	35.62 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	30.35 %

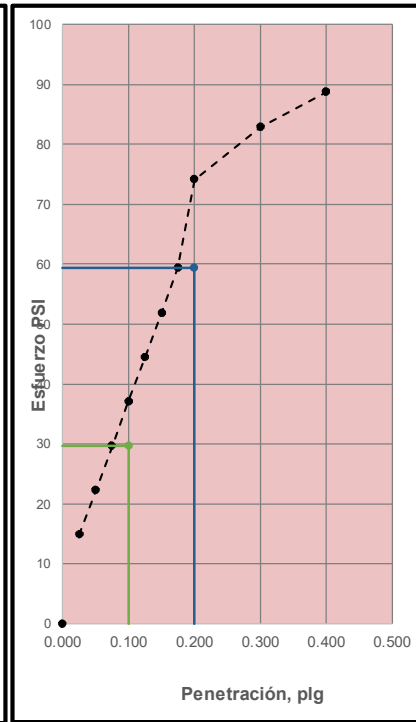
56 GOLPES



25 GOLPES




12 GOLPES

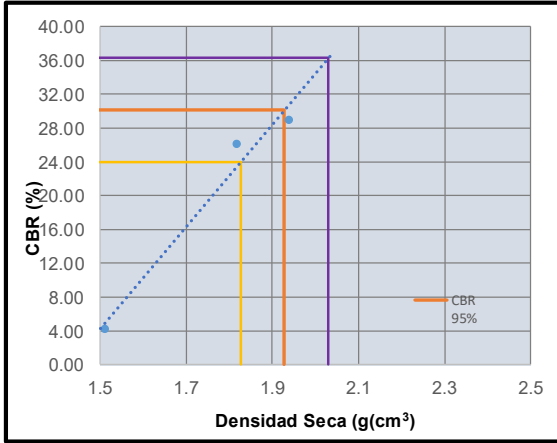


Nota: Elaboración propia

Figura 211.

CBR de la muestra M-3 del Talud T-1

		MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO				CÓDIGO	JJDR-00014							
						FECHA	12/02/2025							
						INFORME	0014-2025							
						PÁGINA 1 DE 1								
NTP 339.145 / MTC E – 132 / ASTM D-1883														
ELABORADO POR:	Bach. DIEGO ROYEYRO MONTEAGUDO CHECCA Bach. JORGE JHAFFET RAMIREZ GUILLEN					FECHA:	9/02/2025							
TESIS DE INVESTIGACIÓN:	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL CELULAR LIGERO COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR A NIVEL DE BASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL DISTRITO DE SICUANI - 2024					TALUD:	T-1							
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	CANTERA CHIHUACO					MUESTRA:	M-3							
LOCALIZACIÓN:	DISTRITO DE SICUANI - PROVINCIA DE CANCHIS - DEPARTAMENTO DE CUSCO					PROFUNDIDAD (m):								
TIPO DE SUELO:	ARENA ARCILLOSA CON GRAVA SC DE MEDIANA PLASTICIDAD, COLOR ROJO MARRÓN													
COMPACTACIÓN														
Molde N°	36		42		58									
Capas N°	5		5		5									
Golpes por Capa N°	56		25		12									
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	SATURADO							
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12453.00	12683.00	12399.00	12629.00	11774.00	12004.00								
Peso de molde (g)	7928.00	7928.00	7936.00	7936.00	7869.00	7869.00								
Peso del Suelo húmedo (g)	4525.00	4755.00	4463.00	4693.00	3905.00	4135.00								
Volumen del molde (cm ³)	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00	2128.00								
Densidad húmeda (g/cm³)	2.126	2.23	2.097	2.21	1.835	1.94								
Tara (N°)	R-16	M-16	R-17	M-17	R-18	M-18								
Peso suelo húmedo + tara (g)	244.00	338.00	250.00	344.00	252.00	346.00								
Peso suelo seco + tara (g)	226.00	311.00	222.00	307.00	215.00	300.00								
Peso tara (g)	40.76	40.76	40.57	40.57	42.45	42.45								
Peso de agua (g)	18.00	27.00	28.00	37.00	37.00	46.00								
Peso de suelo seco (g)	185.24	270.24	181.43	266.43	172.55	257.55								
Contenido de humedad (%)	9.72	9.99	15.43	13.89	21.44	17.86								
Densidad seca (g/cm³)	1.94	2.03	1.82	1.94	1.51	1.65								
EXPANSIÓN														
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN				
				mm	%		mm	%		mm	%			
13/02/25	16:35	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0			
14/02/25	16:35	24.00	2	0.020	0.0	2	0.020	0.0	4	0.040	0.0			
15/02/25	16:35	48.00	4	0.040	0.0	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1			
16/02/25	16:35	72.00	8	0.080	0.1	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2			
17/02/25	16:35	96.00	12	0.120	0.1	18	0.180	0.2	20	0.200	0.2			
PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN	Carga Estánd.	MOLDE N°												
		36				42				58				
		mm	pulg.	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR %	lecturas lbf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)
	kg/cm ²				Correg.				Correg.				Correg.	
0.000	0.000		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3		1	0.3	0.3	
0.635	0.025		60	20.0	20.0		33	11.0	11.0		68	22.7	22.7	
1.270	0.050		191	63.7	63.7		169	56.3	56.3		91	30.3	30.3	
1.905	0.075		465	155.0	155.0		334	111.3	111.3		108	36.0	36.0	
2.540	0.100	70.455	867	289.0	289.0	28.9	781	260.3	260.3	26.0	125	41.7	41.7	4.2
3.175	0.125		925	308.3	308.3		805	268.3	268.3		140	46.7	46.7	
3.810	0.150		959	319.7	319.7		842	280.7	280.7		148	49.3	49.3	
4.445	0.175		1078	359.3	359.3		968	322.7	322.7		160	53.3	53.3	
5.080	0.200	105.680	1203	401.0	401.0	26.7	1080	360.0	360.0	24.0	202	67.3	67.3	4.5
7.620	0.300		1617	539.0	539.0		1450	483.3	483.3		245	81.7	81.7	
10.160	0.400		1882	627.3	627.3		1689	563.0	563.0		274	91.3	91.3	
12.700	0.500		2105	701.7	701.7		1892	630.7	630.7		290	96.7	96.7	



MÉTODO DE COMPACTACIÓN : NTP 339.141 / MTC E - 115 / ASTM D-1557

MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) : 2.03

ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 7.23

95% MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³) : 1.93

95%

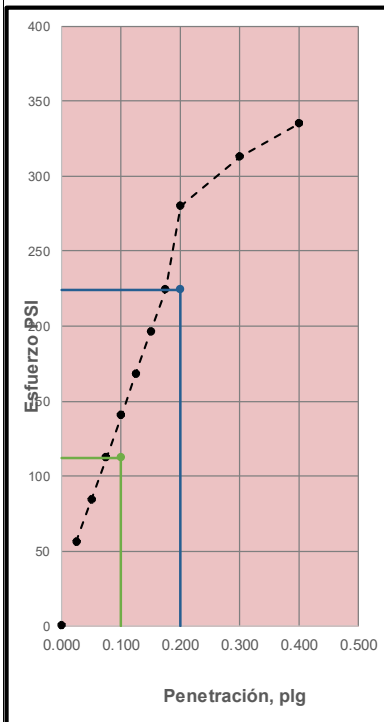
C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") : 36.29

C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") : 30.14

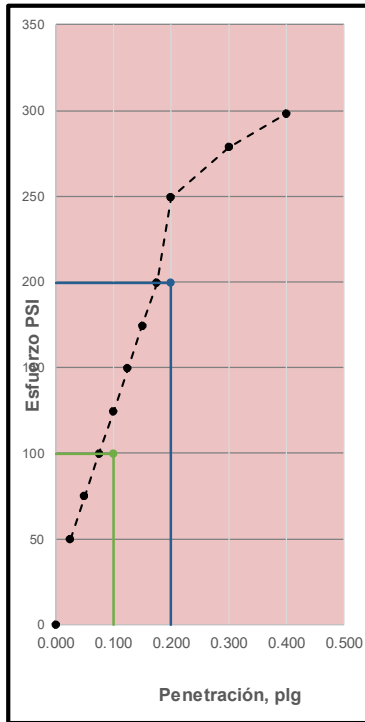
RESULTADOS:

Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 36.29 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 30.14 %

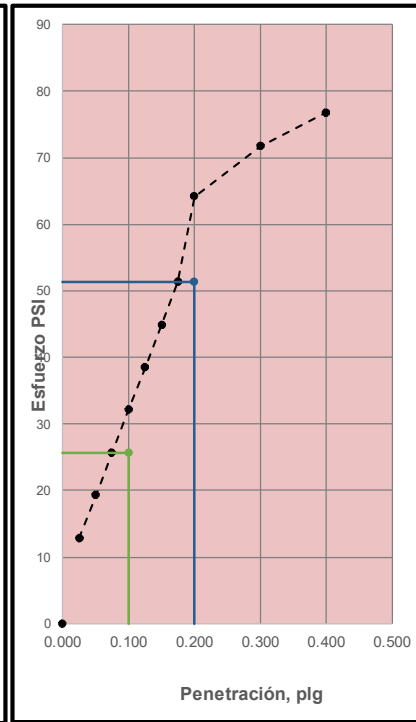
56 GOLPES



25 GOLPES



12 GOLPES



Nota: Elaboración propia

Anexo 16.

Ficha Técnica de Agente Espumante para Hormigón Celulosa



INCOL

ADDITIVE-CELULOSA

Agente espumante para hormigón celulosa

DESCRIPCIÓN

INCOL® Additive-Celulosa, es un agente espumante diseñado para la producción de hormigón celular. Permite alcanzar densidades del hormigón de hasta 1500 kg/m³, ofreciendo una solución efectiva para diversas aplicaciones constructivas que requieren materiales ligeros y de alta resistencia.

MODO DE EMPLEO

Guía de hormigonado:
Cuando se utiliza Incol Additive-Celulosa, es esencial seguir las normas y reglas generales para la preparación del hormigón de calidad. El uso de aditivos no exime de la necesidad de un adecuado curado del hormigón. De hecho, los mejores resultados con el aditivo se logran al cumplir con todas las medidas de curado necesarias.

Compatibilidad:
Aunque la mayoría de los aditivos de Incol Additive-Celulosa son compatibles entre sí, se recomienda realizar pruebas preliminares con los materiales y condiciones específicas de cada obra para confirmar la compatibilidad y asegurar resultados óptimos.

Instrucciones de aplicación:
Para aplicar correctamente, mezcle el cemento y la arena de manera homogénea. A continuación, añada la cantidad deseada de Incol Additive-Celulosa al agua de amasado dentro del rango recomendado. Introduzca esta solución y mezcle a alta velocidad durante aproximadamente 1 minuto por metro cúbico de hormigón, hasta alcanzar la densidad deseada.

Limitaciones:
Incol Additive-Celulosa no está recomendado para su uso en hormigones estructurales. Es crucial asegurar una alta estabilidad del hormigón celular con espumante para mantener sus propiedades durante el transporte, colocación y compactación. Se deben establecer dosificaciones adecuadas para cada densidad, garantizando así la calidad y homogeneidad del hormigón. Incol Additive-Celulosa, un aditivo espumante altamente efectivo, juega un papel fundamental en este proceso.

USOS

Incol Additive-Celulosa se utiliza ampliamente para la fabricación de hormigones celulares en diversas aplicaciones, como:

- Rellenos y nivelaciones de pisos.
- Zanjas para tendido de conductos y renovación de tuberías.
- Rellenos en minas y excavaciones alrededor de edificios y piscinas.
- Construcción de capas aislantes térmicas sobre y bajo edificios.
- Elementos prefabricados donde no se requieran altas resistencias mecánicas.

Este producto proporciona una solución versátil y eficaz para proyectos que necesitan materiales ligeros con propiedades aislantes.

FICHA TÉCNICA

Ficha Técnica
INCOL
Additive-Celulosa
Julio, 2024

FABRICADO POR:
INDUSTRI
CONSTRUCTION
INCOL S.A.C.

R.U.C. N° 20612003611

📍 Av. Lima Mz. A Lt. 1. Av. Parcela 2
San Lorenzo (Fdo. Cuadros)
Carabaylo - Lima

☎ +51 955 151 901

✉ incolperusac@gmail.com
ventas@incol.com.pe

📱 Incol Perú

INCOL.COM.PE



INCOL ADDITIVE-CELULOSA

Agente espumante para hormigón celulosa

FICHA TÉCNICA

VENTAJAS

- Bombeabilidad: El hormigón celular es apto para ser bombeado. Las bombas de rotación para hormigón son particularmente adecuadas, aunque pueden surgir dificultades con bombas de pistón en distancias largas.
- Aislamiento térmico: Posee una excelente capacidad de aislamiento térmico, superando ampliamente a la mayoría de los materiales y mamposterías utilizadas en la construcción tradicional.
- Aislamiento acústico: Es notable por su capacidad para amortiguar la intensidad de las ondas sonoras, gracias a las paredes de las celdas y las capas de aire encapsuladas en su estructura.
- Absorción de agua: Debido a que las burbujas de aire incorporadas en el concreto no se comunican entre sí, presenta una baja absorción de agua. Además, Incol Additive-Celulosa está libre de cloruros.
- Transporte y colocación: El hormigón con espumante tiene una consistencia casi líquida, lo que facilita su transporte en contenedores y camiones de manera similar al hormigón convencional. Esto permite una colocación más rápida y sencilla, con menor presión en los moldes dependiendo de la densidad del material.

DATOS TÉCNICOS

- Apariencia : Líquido ligeramente viscoso
- Color : Marrón
- Densidad : 1,02 kg/l

RENDIMIENTO

La dosis recomendada de Incol Additive-Celulosa varía entre el 0.02% y el 0.50% del peso total del cemento utilizado en la mezcla

PRESENTACIÓN

Se presenta en volúmenes x Litro.
Envases : 1 gln., 5 gln., 55 gln.

TIEMPO DE ALMACENAMIENTO

Almacenar en un lugar fresco y seco, a temperaturas que oscilen entre 5°C y 30°C. Es importante proteger el envase para evitar la corrosión. El producto tiene una duración de 24 meses a partir de la fecha de fabricación.

PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES

Antes de utilizar cualquier producto, el usuario debe leer las Fichas de Datos de Seguridad más recientes. Para información y asesoramiento sobre la manipulación, almacenamiento y eliminación segura de productos químicos, consulte la Hoja de Datos de Seguridad (SDS) actualizada, que incluye datos físicos, ecológicos, toxicológicos y otros aspectos de seguridad.

Ficha Técnica
INCOL
Additive-Celulosa
Julio, 2024

INCOL.COM.PE

Nota: Tomado de INCOL, (2024)



Laboratorio PP

Punto de Precisión SAC
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LC - 033



Registro N° LC - 033

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LM-1232-2024

Página: 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de Emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : **J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.**

Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1
NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de Medición : **BALANZA**

Marca : **OHAUS**

Modelo : **SPX622ZH**

Número de Serie : **C215937122**

Alcance de Indicación : **620 g**

División de Escala de Verificación (e) : **0,1 g**

División de Escala Real (d) : **0,01 g**

Procedencia : **NO INDICA**

Identificación : **NO INDICA**

Tipo : **ELECTRÓNICA**

Ubicación : **LABORATORIO**

Fecha de Calibración : **2024-09-03**

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

3. Método de Calibración

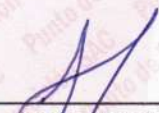
La calibración se realizó mediante el método de comparación según el PC-001 1ra Edición, 2019; Procedimiento para la calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático clase III y IIII del INACAL-DM.

4. Lugar de Calibración

LABORATORIO de J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO



PT-06.F06 / Diciembre 2016 / Rev 02



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106

www.puntodeprecision.com E-mail: info@puntodeprecision.com / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



Laboratorio PP

Punto de Precisión SAC

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 033



Registro N° LC - 033

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LM-1232-2024

Página: 2 de 3

5. Condiciones Ambientales

	Mínima	Máxima
Temperatura	16,5	16,5
Humedad Relativa	51,3	51,3

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL - DM	Juego de pesas (exactitud F1)	0885-MPES-C-2024

7. Observaciones

No se realizó ajuste a la balanza antes de su calibración.

Los errores máximos permitidos (e.m.p.) para esta balanza corresponden a los e.m.p. para balanzas en uso de funcionamiento no automático de clase de exactitud III, según la Norma Metrológica Peruana 003 - 2009. Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento no Automático.

Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".

Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

De acuerdo con lo indicado por el cliente, la temperatura local varía de 14 °C a 23 °C.

El laboratorio no se hace responsable por la información suministrada por el cliente.

La incertidumbre reportada en el presente certificado de calibración no incluye la contribución a la incertidumbre por deriva de la balanza.

8. Resultados de Medición

INSPECCIÓN VISUAL			
AJUSTE DE CERO	TIENE	ESCALA	NO TIENE
OSCILACIÓN LIBRE	TIENE	CURSOR	NO TIENE
PLATAFORMA	TIENE	SIST. DE TRABA	TIENE
NIVELACIÓN	TIENE		

ENSAYO DE REPETIBILIDAD

Medición N°	Carga L1= 300,001 g		Carga L2= 600,002 g	
	I (g)	ΔL (g)	I (g)	ΔL (g)
1	300,01	0,006	600,00	0,005
2	300,01	0,008	600,00	0,007
3	300,01	0,005	600,00	0,006
4	300,01	0,009	600,00	0,008
5	300,01	0,005	600,01	0,009
6	300,01	0,007	600,00	0,005
7	300,01	0,006	600,00	0,007
8	300,01	0,005	600,00	0,005
9	300,01	0,008	599,99	0,004
10	300,01	0,007	600,00	0,006
Diferencia Máxima		0,004	0,015	
Error máximo permitido ±		0,3 g	± 0,3 g	



PT-06.F06 / Diciembre 2016 / Rev 02

Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106

www.puntodeprecision.com E-mail: info@puntodeprecision.com / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



Laboratorio PP

Punto de Precisión SAC

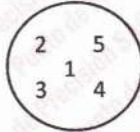
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC - 033



Registro N° LC - 033

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LM-1232-2024

Página: 3 de 3



ENSAYO DE EXCENTRICIDAD

Temp. (°C) Inicial Final
16,5 16,5

Posición de la Carga	Determinación de E ₀				Determinación del Error corregido				
	Carga mínima (g)	I (g)	ΔL (g)	E ₀ (g)	Carga L (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E _c (g)
1	1,000	1,00	0,005	0,000	200,001	200,01	0,008	0,007	0,007
2		1,00	0,008	-0,003		200,00	0,005	0,000	0,003
3		1,00	0,007	-0,002		200,01	0,007	0,008	0,010
4		1,00	0,006	-0,001		200,02	0,006	0,019	0,020
5		1,00	0,005	0,000		200,01	0,005	0,010	0,010

(*) valor entre 0 y 10 e

Error máximo permitido : ± 0,3 g

ENSAYO DE PESAJE

Temp. (°C) Inicial Final
16,5 16,5

Carga L (g)	CRECIENTES				DECRECIENTES				± emp (g)
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E _c (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E _c (g)	
1,000	1,00	0,007	-0,002						
2,000	2,00	0,005	0,000	0,002	2,00	0,005	0,000	0,002	0,1
5,000	5,00	0,008	-0,003	-0,001	5,00	0,007	-0,002	0,000	0,1
50,000	50,00	0,006	-0,001	0,001	50,01	0,008	0,007	0,009	0,1
70,000	70,00	0,009	-0,004	-0,002	70,00	0,006	-0,001	0,001	0,2
100,000	100,00	0,007	-0,002	0,000	100,01	0,005	0,010	0,012	0,2
150,000	150,00	0,005	0,000	0,002	150,01	0,007	0,008	0,010	0,2
200,001	200,01	0,006	0,009	0,011	200,01	0,006	0,009	0,011	0,2
500,001	500,00	0,008	-0,004	-0,002	500,01	0,008	0,006	0,008	0,3
600,002	600,00	0,007	-0,004	-0,002	600,00	0,009	-0,006	-0,004	0,3
620,002	620,00	0,006	-0,003	-0,001	620,00	0,006	-0,003	-0,001	0,3

e.m.p. : error máximo permitido

Lectura corregida e incertidumbre expandida del resultado de una pesada

$$R_{\text{corregida}} = R - 1,08 \times 10^{-5} \times R$$

Incertidumbre

$$U_R = 2 \sqrt{4,22 \times 10^{-5} \text{ g}^2 + 1,11 \times 10^{-9} \times R^2}$$

R: Lectura de la balanza ΔL: Carga Incrementada E: Error encontrado E₀: Error en cero E_c: Error corregido

R: en g

FIN DEL DOCUMENTO



PT-06.F06 / Diciembre 2016 / Rev 02

Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106

www.puntodeprecision.com E-mail: info@puntodeprecision.com / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LFP-862-2024

Página : 1 de 2

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-02

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Descripción del Equipo : MÁQUINA DE ENSAYO UNIAXIAL

Marca de Prensa : ARSOU GROUP
Modelo de Prensa : STYE-2000
Serie de Prensa : 2005752
Capacidad de Prensa : 2000 kN

Marca de indicador : NO INDICA
Modelo de Indicador : CL-03E
Serie de Indicador : NO INDICA

Bomba Hidráulica : ELÉCTRICA

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo. Indicados ha sido calibrado probado y verificado usando patrones certificados con trazabilidad a la Dirección de Metrología del INACAL y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

Punto de Precisión S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

3. Lugar y fecha de Calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO
29 - AGOSTO - 2024

4. Método de Calibración

La Calibración se realizó de acuerdo a la norma ASTM E4 .

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
CELDA DE CARGA	AEP TRANSDUCERS	INF-LE 217	SISTEMA INTERNACIONAL
INDICADOR	AEP TRANSDUCERS		

6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	17,5	17,7
Humedad %	47	48

7. Resultados de la Medición

Los errores de la prensa se encuentran en la página siguiente.

8. Observaciones

Con fines de identificación se ha colocado una etiqueta autoadhesiva de color verde con el número de certificado y fecha de calibración de la empresa PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106 698-9620

www.puntodeprecision.com E-mail: ventas@puntodeprecision.com.pe / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LFP-862-2024

Página : 2 de 2

TABLA N° 1

SISTEMA DIGITAL "A" kN	SERIES DE VERIFICACIÓN (kN)				PROMEDIO "B" kN	ERROR Ep %	RPTBLD Rp %
	SERIE 1	SERIE 2	ERROR (1) %	ERROR (2) %			
100	100,469	100,170	-0,47	-0,17	100,3	-0,32	0,30
200	200,349	200,425	-0,17	-0,21	200,4	-0,19	-0,04
300	300,573	300,472	-0,19	-0,16	300,5	-0,17	0,03
400	400,601	400,579	-0,15	-0,14	400,6	-0,15	0,01
500	501,119	501,288	-0,22	-0,26	501,2	-0,24	-0,03
600	602,030	601,893	-0,34	-0,32	602,0	-0,33	0,02
700	701,714	702,032	-0,24	-0,29	701,9	-0,27	-0,05
800	801,987	802,137	-0,25	-0,27	802,1	-0,26	-0,02

NOTAS SOBRE LA CALIBRACIÓN

1.- Ep y Rp son el Error Porcentual y la Repetibilidad definidos en la citada Norma:

$$Ep = ((A-B) / B) * 100 \quad Rp = \text{Error}(2) - \text{Error}(1)$$

2.- La norma exige que Ep y Rp no excedan el 1,0 %

3.- Coeficiente Correlación : $R^2 = 1$

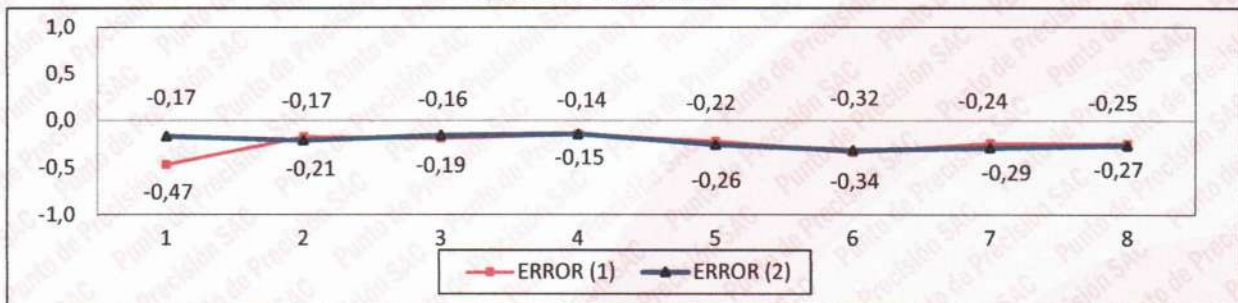
Ecuación de ajuste : $y = 0,9971x + 0,2006$

Donde: x : Lectura de la pantalla
y : Fuerza promedio (kN)

GRÁFICO N° 1



GRÁFICO DE ERRORES



FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106 698-9620

www.puntodeprecision.com E-mail: ventas@puntodeprecision.com.pe / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
MT - LL - 017 - 2025*Área de Metrología*
Laboratorio de Longitud

Página 1 de 3

1. Orden de trabajo	OT 0047-25
2. Solicitante	J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
3. Dirección	AV. Collasuyo/ Las Palmeras A-1 s/n Asoc. Prolongación (Las Palmeras S-1) San Sebastian-Cusco - Cusco - CUSCO
4. Instrumento de Medición	COMPARADOR DE CUADRANTE (DIAL)
Alcance de indicación	0 mm a 10 mm
División de Escala / Resolución	0,01 mm
Marca	ACCUD
Modelo	CNV352
Número de Serie	22033782
Procedencia	NO INDICA
Identificación	NO INDICA
Tipo de indicación	ANALÓGICO
5. Fecha de Calibración	2025-01-27

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de la medición de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Los resultados son validos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamento vigente.

METROLOGÍA & TÉCNICAS S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aqui declarados.

Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.

El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.

Fecha de Emisión**2025-01-28****Jefe del Laboratorio de Metrología**Firmado
digitalmente por
Ing. Williams
Pérez
Fecha: 2025.01.28
16:17:52 -05'00'**Sello**

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
MT - LL - 017 - 2025

Área de Metrología
Laboratorio de Longitud

Página 2 de 3

6. Método de Calibración

La calibración se realizó según el método descrito en el PC-014: "Procedimiento de Calibración de Comparadores de Cuadrante (Usando Bloques)" del DM - INACAL. Tercera Edición, 2019.

7. Lugar de calibración

Laboratorio de METROLOGÍA & TÉCNICAS S.A.C.
Av. San Diego de Alcalá Mz. F1 lote 24 Urb. San Diego - San Martín de Porres - LIMA

8. Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura	24,4 °C	24,5 °C
Humedad Relativa	59 %	60 %

9. Patrones de Referencia

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado/Informe de calibración
Patrones de la DM-INACAL Bloques patrón (Grado K)	BLOQUES PATRÓN (Grado 0) Modelo 4100-47	<u>DM / INACAL</u> <u>LLA-C-084-2023</u>
Patrones de la DM-INACAL Comparador de bloques patrón		

10. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación **CALIBRADO**.
- (*) Serie grabado en el instrumento.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
MT - LL - 017 - 2025

Área de Metrología
Laboratorio de Longitud

Página 3 de 3

11. Resultados de MediciónALCANCE DEL ERROR DE INDICACIÓN (f_e)

VALOR PATRÓN (mm)	INDICACIÓN DEL COMPARADOR (mm)	ERROR DE INDICACIÓN (μm)
2,0	2,005	5
5,0	5,005	5
7,0	7,005	5
10,0	10,005	5

Alcance del error de indicación (f_e) : 0 μm
Incertidumbre del error de indicación : $\pm 91 \mu\text{m}$ para ($k=2$)

ALCANCE DEL ERROR DE REPETIBILIDAD (f_w)

VALOR PATRÓN (mm)	INDICACIÓN DEL COMPARADOR (mm)	ERROR DE INDICACIÓN (μm)
7,0	7,005	5
	7,005	5
	7,005	5
	7,005	5
	7,005	5

Error de Repetibilidad (f_w) : 0 μm
Incertidumbre del error de indicación : $\pm 91 \mu\text{m}$ para ($k=2$)

12. Incertidumbre

La incertidumbre expandida de medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura $k=2$, el cual corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95%.

La incertidumbre expandida de medición fue calculada a partir de los componentes de incertidumbre de los factores de influencia en la calibración. La incertidumbre indicada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4448-2024

Página : 1 de 2

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de Medición : MOLDE CBR
Marca : NO INDICA
Serie : 25619
Material : HIERRO
Color : PLATEADO
Código de Identificación : M-05

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo. Indicados ha sido calibrado probado y verificado usando patrones certificados con trazabilidad a la Dirección de Metrología del INACAL y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

Punto de Precision S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

3. Lugar y fecha de Calibración
AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO
03 - SETIEMBRE - 2024

4. Método de Calibración
Por Comparación, tomando como referencia la Norma ASTM D-1883.

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
PIE DE REY	MITUTOYO	TC-16333-2024	INACAL - DM

6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	17,5	17,5
Humedad %	44	44

7. Observaciones

Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran en la página 02 del presente documento.



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



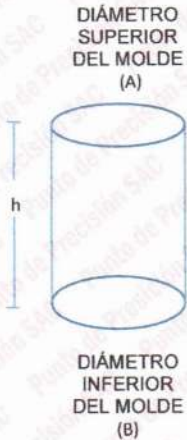
PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4448-2024

Página : 2 de 2

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN POR EL MÉTODO DE MEDIDAS LINEALES



N° DE MEDICIONES	DIÁMETRO INTERIOR SUPERIOR	DIÁMETRO INTERIOR INFERIOR	ALTURA
	A mm	B mm	h mm
1	152,19	152,30	177,87
2	152,12	152,28	177,81
3	152,15	152,23	177,83
4	152,21	152,30	177,84
5	152,16	152,25	177,71
6	152,18	152,26	177,73
PROMEDIO	152,17	152,27	177,80
ESTÁNDAR	152,40	152,40	177,80
TOLERANCIAS (±)	0,66	0,66	0,46
ERROR	-0,23	-0,13	0,00
VOLUMEN DETERMINADO POR MEDIDAS LINEALES	3236 cm ³		

N° DE MEDICIONES	MEDIDAS DEL DISCO ESPACIADOR		N° DE MEDICIONES	PESA	
	DIÁMETRO mm	ALTURA mm		ANULAR kg	RANURADA kg
1	150,83	61,25	1	2,275	2,270
2	150,89	61,36	ESTÁNDAR	2,270	2,270
3	150,88	61,26	TOLERANCIAS (±)	0,02	0,02
4	150,81	61,28	ERROR	0,005	0,000
5	150,83	61,30			
6	150,86	61,31			
PROMEDIO	150,85	61,29	MASA TOTAL	kg	
ESTÁNDAR	150,80	61,37	ESTÁNDAR	4,540	
TOLERANCIAS (±)		0,127	TOLERANCIAS (±)	0,02	
ERROR	0,05	-0,08	ERROR	0,005	

FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631





CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4450-2024

Página : 1 de 2

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de Medición : MOLDE PROCTOR 4"
Marca : NO INDICA
Serie : NO INDICA
Material : HIERRO
Color : PLATEADO

3. Lugar y fecha de Calibración
AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO
03 - SETIEMBRE - 2024

4. Método de Calibración
Por Comparación, tomando como referencia la Norma ASTM D 698 - ASTM D 1557.

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
PIE DE REY	MITUTOYO	TC-16333-2024	INACAL - DM


6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	17,5	17,5
Humedad %	44	44

7. Observaciones

Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran en la página 02 del presente documento.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo. Indicados ha sido calibrado probado y verificado usando patrones certificados con trazabilidad a la Dirección de Metrología del INACAL y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

Punto de Precision S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.



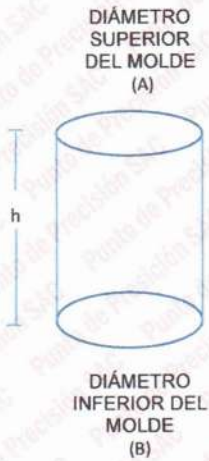
PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4450-2024

Página : 2 de 2

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN POR EL MÉTODO DE MEDIDAS LINEALES



N° DE MEDICIONES	DIÁMETRO INTERIOR SUPERIOR	DIÁMETRO INTERIOR INFERIOR	ALTURA
	A mm	B mm	h mm
1	101,22	101,23	116,94
2	101,42	101,25	116,89
3	101,31	101,36	116,91
4	101,23	101,40	116,93
5	101,28	101,41	116,53
6	101,53	101,27	116,90
PROMEDIO	101,33	101,32	116,85
ESTÁNDAR	101,60	101,60	116,40
TOLERANCIAS (±)	0,40	0,40	0,50
ERROR	-0,27	-0,28	0,45
VOLUMEN DETERMINADO POR MEDIDAS LINEALES	942 cm ³		

FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4453-2024

Página : 1 de 2

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de Medición : MARTILLO PROCTOR

Capacidad : 10 lb
Marca : NO INDICA
Serie : NO INDICA
Material : HIERRO
Color : PLATEADO

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo. Indicados ha sido calibrado probado y verificado usando patrones certificados con trazabilidad a la Dirección de Metrología del INACAL y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

Punto de Precisión S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

3. Lugar y fecha de Calibración
AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO
03 - SETIEMBRE - 2024

4. Método de Calibración
Por Comparación, tomando como referencia la Norma ASTM D 698 - ASTM D 1557.

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
PIE DE REY	MITUTOYO	TC-16333-2024	INACAL-DM
REGLA	MITUTOYO	1AD-1432-2023	INACAL-DM
BALANZA	KERN	LM-002-2024	PUNTO DE PRECISION


6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	17,5	17,5
Humedad%	44	44

7. Observaciones

Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran en la página 02 del presente documento.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4453-2024


Página : 2 de 2

Resultados de Verificación

MEDICIONES	ALTURA DE CAIDA	PESO	DIÁMETRO DE CARA DE IMPACTO
	mm	g	mm
1	456	4536,01	50,10
2	456	4536,01	50,13
3	456	4536,01	50,08
4	456	4536,01	50,13
5	456	4536,01	50,09
6	456	4536,01	50,11
PROMEDIO	456,0	4536,01	50,11
ESTANDAR	457,2	4536,4	50,19
TOLERANCIA ±	1,3 mm	9 g	0,13 mm
ERROR	-1,2 mm	0,39 g	-0,08 mm

FIN DEL DOCUMENTO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4454-2024

Página : 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de Medición : COPA CASAGRANDE
Marca de Copa : PINZUAR
Modelo de Copa : S020604
Serie de Copa : 2336
Contómetro : ANALÓGICO
Marca de Contómetro : KEIHOKU KEIKI KOGYO
Modelo de Contómetro : RS-204-51
Serie de Contómetro : NO INDICA

3. Lugar y fecha de Calibración
AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO
03 - SETIEMBRE - 2024

4. Método de Calibración
Por Comparación con instrumentos Certificados por el INACAL - DM.
Tomando como referencia la Norma ASTM D 4318.

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
PIE DE REY	MITUTOYO	TC-16333-2024	INACAL - DM
MICROMETRO	INSIZE	DM23-C-0278-2023	INACAL - DM
BALANZA	KERN	LM-002-2024	INACAL - DM

6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	17,3	17,3
Humedad %	46	46

7. Observaciones

Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran en la página 02 del presente documento.



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo. Indicados ha sido calibrado usando patrones certificados con trazabilidad a la Dirección de Metrología del INACAL y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

Punto de Precisión S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4454-2024

Página : 2 de 3

Tabla de Medidas

COPA CASAGRANDE									
DIMENSIONES	A	B	C	E	J	K	L	M	U
DESCRIPCIÓN	RADIO DE LA COPA	ESPESOR DE LA COPA	PROFUNDIDA DE LA COPA	DISTANCIA	ALTURA	ESPESOR	LARGO	ANCHO	Copa desde la guía del espesor a base
MEDIDA TOMADA	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	54,35	1,921	26,95	54,42	59,33	50,24	125,82	125,82	47,68
	54,04	1,943	26,95	54,42	59,33	50,31	150,81	125,74	47,68
	54,14	1,952	26,95	54,42	59,33	50,13	150,91	125,78	47,68
	54,23	1,931	26,95	54,42	59,33	50,16	150,46	125,61	47,68
	54,28	1,951	26,95	54,42	59,33	50,15	180,41	125,73	47,68
	54,11	1,923	26,95	54,42	59,33	50,14	150,39	125,72	47,68
PROMEDIO	54,19	1,94	26,95	54,42	59,33	50,19	151,47	125,73	47,68
MEDIDAS STANDARD	54,00	2,00	27,00	56,00	60,00	50,00	150,00	125,00	47,00
TOLERANCIA ±	0,5	0,1	0,5	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0
ERROR	0,19	-0,06	-0,05	-1,58	-0,67	0,19	1,47	0,73	0,68

	Rango según norma	Medida encontrada
Resiliencia	77 % a 90 %	85 %

	Rango según norma	Masa encontrada
Masa de Copa	185 g a 215 g	208,61 g

Inspección del desgaste

Desgaste de Base: El punto de la base donde la copa hace contacto no debera presentar desgaste mayor de 10 mm de diámetro.

DESCRIPCIÓN	DESGASTE DE BASE
MEDIDA TOMADA	mm
	6,82
	6,82
	6,82
	6,82
	6,82
	6,82
PROMEDIO	6,82
MEDIDAS STANDARD	<10

Desgaste de Copa: Reemplace la copa cuando la herramienta de ranurado haya originado en la copa una depresión de 0,1 mm de profundidad o cuando el reborde de la copa haya sido reducido a la mitad de su espesor original.

DESCRIPCIÓN	DESGASTE DE COPA		
	LATERALES DE LA COPA	EL CENTRO DE LA COPA	
MEDIDA TOMADA	mm	mm	
	1	1,922	1,918
	2	1,944	1,938
	3	1,953	1,945
	4	1,932	1,925
	5	1,953	1,947
	6	1,924	1,921
PROMEDIO	1,938	1,932	
MEDIDAS STANDARD	2,000	2,000	
ERROR	-0,062	-0,068	
ERROR DE DEPRESIÓN	0,006 mm		



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4454-2024

Página : 3 de 3

Desgaste del sujetador de Copa: Verificar que el pivote del sujetador de copa no se trabe y que no este desgastado hasta el punto que permita más de 3 mm de movimiento lado a lado del punto más bajo de la copa

DESCRIPCIÓN	DESGASTE DEL SUJETADOR DE LA COPA	
	LADO IZQUIERDO	LADO DERECHO
MEDIDA TOMADA	mm	mm
	0,69	1,19

Desgaste de Leva: La leva no se desgastará a un punto tal que la copa descienda antes que el sujetador de la copa (manubrio de leva) pierda contacto con la leva.

DESGASTE DE LEVA

SI CUMPLE

Pie de Goma: El pie previene los rebotes en la base o deslizamiento en la superficie de trabajo. Reemplazar el pie de Goma cuando este rígido, agrietado o quebradizo por el tiempo.

PIE DE GOMA

SI CUMPLE

FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4424-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ
Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 011A19
Valor de abertura : 75 mm
N° de Tamiz : 3 in.
Diametro del alambre : 6,3 mm
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4424-2024

Página 2 de 3

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	19,5	19,5
Humedad relativa (%hr)	46	46

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
KOSSODO METROLOGIA S.A.C.	Pie de rey con una incertidumbre máxima de 11,0 μm .	DM24-C-0059-2024

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 2 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)	Error máximo permitido (mm)
Horizontal	75,00	76,24	1,24	0,02	2,00
Vertical		76,36	1,36	0,02	2,00

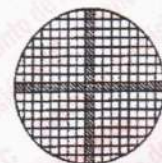
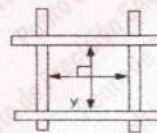
	Abertura máxima permitida (mm)	Abertura máxima encontrada (mm)	Máxima desviación permitida (mm)	Desviación estandar encontrada (mm)
Horizontal	77,780	76,314	—	0,106
Vertical		76,434		0,099

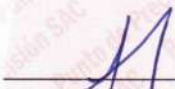
	Valor nominal del diámetro (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)
Horizontal	6,30	6,34	0,04	0,03
Vertical		6,34	0,04	0,09

	Diámetro Máximo permitido (mm)	Diámetro Máximo encontrado (mm)	Diámetro Mínimo permitido (mm)	Diámetro Mínimo encontrado (mm)
Horizontal	7,20	6,35	5,40	6,33
Vertical		6,38		6,29



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631





Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4424-2024


Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 75 mm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 75 mm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de mm						Las mediciones se realizaron en las unidades de mm					
76,31	76,16	---	---	---	---	76,43	76,29	---	---	---	---

FIN DEL DOCUMENTO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631





PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4432-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ
Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 022A21
Valor de abertura : 4,75 mm
N° de Tamiz : No. 4
Diámetro del alambre : 1,6 mm
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4432-2024

Página 2 de 3

Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,3	16,3
Humedad relativa (%hr)	52	52

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Retícula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 30 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)	Error máximo permitido (mm)
Horizontal	4,750	4,772	0,022	0,002	0,135
Vertical		4,570	-0,180	0,002	0,135

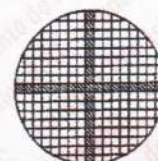
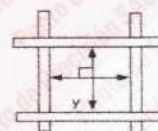
	Abertura máxima permitida (mm)	Abertura máxima encontrada (mm)	Máxima desviación permitida (mm)	Desviación estándar encontrada (mm)
Horizontal	5,120	5,121	0,118	0,260
Vertical		4,851		0,124

	Valor nominal del diámetro (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)
Horizontal	1,600	1,592	-0,008	0,003
Vertical		1,590	-0,010	0,005

	Diámetro Máximo permitido (mm)	Diámetro Máximo encontrado (mm)	Diámetro Mínimo permitido (mm)	Diámetro Mínimo encontrado (mm)
Horizontal	1,900	1,613	1,300	1,577
Vertical		1,613		1,577



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4432-2024


Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 4,75 mm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 4,75 mm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de mm						Las mediciones se realizaron en las unidades de mm					
4,568	5,104	4,576	4,499	4,554	5,083	4,605	4,605	4,447	4,518	4,851	4,564
5,121	4,692	4,568	4,615	4,499	5,083	4,613	4,605	4,399	4,407	4,399	4,605
4,568	4,692	5,121	4,568	4,568	4,554	4,447	4,605	4,605	4,605	4,851	4,613
5,104	5,121	5,104	5,104	4,615	5,083	4,407	4,605	4,605	4,605	4,447	4,407
4,568	5,121	4,554	4,568	4,615	4,554	4,851	4,518	4,564	4,605	4,518	4,613

FIN DEL DOCUMENTO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631





PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4433-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ

Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 022E21
Valor de abertura : 2,36 mm
N° de Tamiz : No. 8
Diámetro del alambre : 1 mm
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,5	16,5
Humedad relativa (%hr)	52	52

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4433-2024

Página 2 de 3

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Retícula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 40 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)	Error máximo permitido (mm)
Horizontal	2,360	2,566	0,206	0,002	0,069
Vertical		2,520	0,160	0,002	0,069

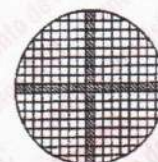
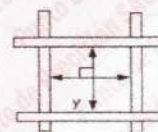
	Abertura máxima permitida (mm)	Abertura máxima encontrada (mm)	Máxima desviación permitida (mm)	Desviación estandar encontrada (mm)
Horizontal	2,590	2,590	0,071	0,025
Vertical		2,590		0,087

	Valor nominal del diámetro (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)
Horizontal	1,000	0,631	-0,369	0,003
Vertical		0,691	-0,309	0,005

	Diámetro Máximo permitido (mm)	Diámetro Máximo encontrado (mm)	Diámetro Mínimo permitido (mm)	Diámetro Mínimo encontrado (mm)
Horizontal	1,150	0,645	0,850	0,625
Vertical		0,726		0,678



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4433-2024

Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 2,36 mm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 2,36 mm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de mm						Las mediciones se realizaron en las unidades de mm					
2,516	2,581	2,589	2,548	2,546	2,545	2,403	2,584	2,581	2,387	2,532	2,590
2,560	2,580	2,590	2,585	2,548	2,585	2,581	2,586	2,498	2,384	2,584	2,581
2,516	2,546	2,548	2,590	2,590	2,560	2,387	2,586	2,590	2,384	2,590	2,590
2,589	2,585	2,560	2,581	2,589	2,589	2,498	2,387	2,498	2,590	2,590	2,581
2,590	2,548	2,560	2,516	2,546	2,589	2,387	2,387	2,384	2,498	2,586	2,590
2,545	2,589	2,589	2,580	2,590	2,516	2,590	2,584	2,384	2,586	2,387	2,581
2,585	2,581	2,546	2,546	—	—	2,581	2,584	2,584	2,532	—	—

FIN DEL DOCUMENTO




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631





PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4435-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ

Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 015Ñ19
Valor de abertura : 1,18 mm
N° de Tamiz : No. 16
Diámetro del alambre : 0,63 mm
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,6	16,6
Humedad relativa (%hr)	52	52

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4435-2024

Página 2 de 3

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Reticula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 80 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)	Error máximo permitido (mm)
Horizontal	1,180	1,175	-0,005	0,002	0,036
Vertical		1,203	0,023	0,002	0,036

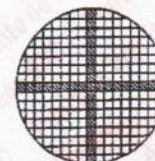
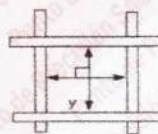
	Abertura máxima permitida (mm)	Abertura máxima encontrada (mm)	Máxima desviación permitida (mm)	Desviación estandar encontrada (mm)
Horizontal	1,320	1,242	0,045	0,031
Vertical		1,290		0,054


	Valor nominal del diámetro (mm)	Promedio de mediciones (mm)	Error encontrado (mm)	Incertidumbre de medición (mm)
Horizontal	0,630	0,425	-0,205	0,004
Vertical		0,453	-0,177	0,004

	Diámetro Máximo permitido (mm)	Diámetro Máximo encontrado (mm)	Diámetro Mínimo permitido (mm)	Diámetro Mínimo encontrado (mm)
Horizontal	0,720	0,444	0,540	0,403
Vertical		0,484		0,435



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4435-2024

Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 1,18 mm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 1,18 mm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de mm						Las mediciones se realizaron en las unidades de mm					
1,210	1,194	1,164	1,177	1,161	1,177	1,194	1,290	1,226	1,177	1,129	1,145
1,242	1,194	1,161	1,113	1,210	1,194	1,194	1,290	1,226	1,129	1,290	1,145
1,161	1,161	1,242	1,161	1,194	1,177	1,226	1,226	1,129	1,145	1,226	1,129
1,164	1,177	1,177	1,164	1,177	1,161	1,177	1,226	1,194	1,290	1,145	1,290
1,242	1,164	1,194	1,194	1,194	1,177	1,194	1,145	1,226	1,290	1,226	1,129
1,161	1,161	1,161	1,194	1,113	1,194	1,194	1,177	1,290	1,177	1,129	1,177
1,194	1,161	1,194	1,164	1,177	1,164	1,226	1,177	1,226	1,129	1,194	1,290
1,161	1,113	1,164	1,161	1,161	1,194	1,226	1,194	1,194	1,226	1,290	1,290
1,194	1,194	1,242	1,113	1,113	1,194	1,290	1,194	1,177	1,129	1,194	1,129
1,177	1,210	1,113	1,177	1,161	1,194	1,226	1,194	1,290	1,226	1,145	1,226
1,194	1,177	1,242	1,164	1,177	1,161	1,145	1,145	1,177	1,290	1,290	1,194
1,113	1,161	1,161	1,113	1,177	1,194	1,194	1,194	1,226	1,290	1,145	1,226
1,242	1,113	1,177	1,161	1,194	1,177	1,226	1,226	1,226	1,226	1,129	1,194
1,177	1,164	---	---	---	---	1,129	1,129	---	---	---	---

FIN DEL DOCUMENTO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631





PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4436-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ
Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 033019
Valor de abertura : 850 μ m
N° de Tamiz : No. 20
Diametro del alambre : 500 μ m
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO


La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizarán las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,6	16,6
Humedad relativa (%hr)	52	52

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4436-2024

Página 2 de 3

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Reticula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 80 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

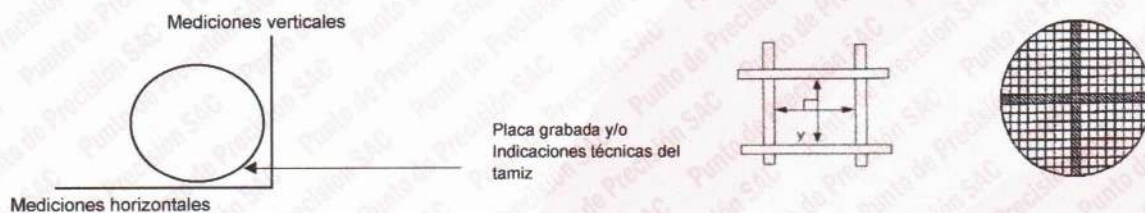
8. Resultados de medición


	Valor nominal de apertura (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)	Error máximo permitido (µm)
Horizontal	850,0	923,9	73,9	4,1	26,2
Vertical		926,5	76,5	7,1	26,2

	Abertura máxima permitida (µm)	Abertura máxima encontrada (µm)	Máxima desviación permitida (µm)	Desviación estándar encontrada (µm)
Horizontal	964,00	952,03	35,25	16,02
Vertical		962,03		29,97

	Valor nominal del diámetro (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)
Horizontal	500,0	376,6	-123,4	2,6
Vertical		386,7	-113,3	3,8

	Diámetro Máximo permitido (µm)	Diámetro Máximo encontrado (µm)	Diámetro Mínimo permitido (µm)	Diámetro Mínimo encontrado (µm)
Horizontal	580,0	387,0	430,0	355,0
Vertical		419,0		371,0




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4436-2024

Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 850 µm Las mediciones se realizaron en las unidades de µm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 850 µm Las mediciones se realizaron en las unidades de µm					
936,0	903,0	936,0	903,0	919,0	936,0	903,0	919,0	871,0	958,0	962,0	956,0
906,0	952,0	935,0	931,0	935,0	931,0	958,0	919,0	903,0	936,0	956,0	958,0
952,0	919,0	903,0	936,0	931,0	936,0	958,0	936,0	903,0	936,0	871,0	962,0
936,0	952,0	919,0	903,0	935,0	936,0	956,0	919,0	919,0	903,0	958,0	958,0
936,0	935,0	931,0	903,0	952,0	936,0	871,0	919,0	936,0	919,0	903,0	871,0
903,0	906,0	936,0	903,0	936,0	919,0	871,0	903,0	956,0	958,0	903,0	919,0
919,0	903,0	935,0	903,0	906,0	903,0	903,0	903,0	956,0	903,0	936,0	919,0
903,0	936,0	906,0	906,0	906,0	931,0	956,0	871,0	958,0	903,0	936,0	936,0
919,0	952,0	931,0	919,0	903,0	936,0	871,0	903,0	958,0	919,0	871,0	958,0
906,0	935,0	931,0	936,0	931,0	919,0	903,0	871,0	919,0	919,0	956,0	919,0
931,0	935,0	952,0	931,0	906,0	906,0	919,0	956,0	958,0	936,0	936,0	903,0
906,0	903,0	906,0	936,0	935,0	935,0	903,0	962,0	956,0	903,0	956,0	958,0
936,0	903,0	903,0	906,0	936,0	919,0	962,0	962,0	958,0	871,0	956,0	956,0
952,0	919,0	---	---	---	---	919,0	936,0	---	---	---	---

FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631





PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4437-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ
Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 032P19
Valor de abertura : 600 µm
N° de Tamiz : No. 30
Diámetro del alambre : 400 µm
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

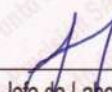
La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,6	16,6
Humedad relativa (%hr)	52	52

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4437-2024

Página 2 de 3

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Reticula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 100 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)	Error máximo permitido (µm)
Horizontal	600,0	556,5	-43,5	5,2	19,0
Vertical		556,2	-43,8	5,3	19,0

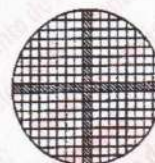
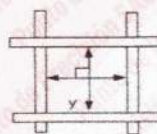
	Abertura máxima permitida (µm)	Abertura máxima encontrada (µm)	Máxima desviación permitida (µm)	Desviación estandar encontrada (µm)
Horizontal	691,00	597,03	28,06	23,69
Vertical		581,03		23,74

	Valor nominal del diámetro (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)
Horizontal	400,0	272,6	-127,4	3,1
Vertical		293,6	-106,4	2,9

	Diámetro Máximo permitido (µm)	Diámetro Máximo encontrado (µm)	Diámetro Mínimo permitido (µm)	Diámetro Mínimo encontrado (µm)
Horizontal	460,0	307,0	340,0	258,0
Vertical		323,0		275,0



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4437-2024


Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 600 µm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 600 µm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de µm						Las mediciones se realizaron en las unidades de µm					
565,0	523,0	581,0	548,0	597,0	548,0	581,0	549,0	581,0	565,0	532,0	520,0
581,0	523,0	565,0	581,0	565,0	581,0	565,0	581,0	520,0	581,0	581,0	565,0
523,0	565,0	523,0	565,0	565,0	565,0	549,0	581,0	565,0	520,0	581,0	581,0
597,0	523,0	581,0	523,0	548,0	523,0	549,0	581,0	565,0	581,0	581,0	565,0
565,0	581,0	523,0	548,0	548,0	581,0	581,0	520,0	565,0	549,0	581,0	581,0
548,0	581,0	581,0	548,0	523,0	523,0	520,0	565,0	532,0	581,0	581,0	565,0
565,0	597,0	523,0	523,0	581,0	581,0	532,0	581,0	581,0	532,0	581,0	520,0
523,0	565,0	548,0	597,0	548,0	581,0	565,0	565,0	520,0	581,0	532,0	520,0
565,0	523,0	565,0	548,0	565,0	523,0	565,0	581,0	565,0	520,0	520,0	581,0
548,0	581,0	581,0	548,0	565,0	565,0	532,0	520,0	565,0	520,0	581,0	549,0
548,0	581,0	523,0	548,0	565,0	581,0	532,0	581,0	565,0	581,0	520,0	520,0
581,0	548,0	565,0	565,0	581,0	581,0	565,0	565,0	565,0	565,0	520,0	532,0
548,0	523,0	581,0	565,0	523,0	565,0	581,0	581,0	565,0	532,0	532,0	520,0
523,0	523,0	548,0	523,0	581,0	581,0	581,0	520,0	581,0	549,0	581,0	532,0
565,0	523,0	581,0	523,0	523,0	548,0	532,0	581,0	581,0	565,0	549,0	581,0
581,0	548,0	523,0	581,0	581,0	565,0	520,0	549,0	549,0	581,0	549,0	549,0
548,0	523,0	581,0	581,0	---	---	520,0	549,0	581,0	565,0	---	---

FIN DEL DOCUMENTO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631





PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4438-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ
Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 005Q20
Valor de abertura : 425 μ m
N° de Tamiz : No. 40
Diámetro del alambre : 280 μ m
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,7	16,7
Humedad relativa (%hr)	52	52

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4438-2024

Página 2 de 3

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Retícula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 120 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)	Error máximo permitido (µm)
Horizontal	425,0	414,6	-10,4	3,1	14,0
Vertical		411,5	-13,5	3,5	14,0

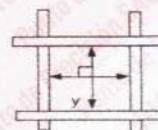
	Abertura máxima permitida (µm)	Abertura máxima encontrada (µm)	Máxima desviación permitida (µm)	Desviación estándar encontrada (µm)
Horizontal	498,00	440,04	22,43	10,53
Vertical		440,04		15,91


	Valor nominal del diámetro (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)
Horizontal	280,0	216,4	-63,6	2,2
Vertical		231,4	-48,6	1,9

	Diámetro Máximo permitido (µm)	Diámetro Máximo encontrado (µm)	Diámetro Mínimo permitido (µm)	Diámetro Mínimo encontrado (µm)
Horizontal	320,0	233,0	240,0	207,0
Vertical		239,0		224,0



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4438-2024

Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 425 µm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 425 µm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de µm						Las mediciones se realizaron en las unidades de µm					
405,0	414,0	423,0	423,0	414,0	397,0	414,0	397,0	423,0	388,0	440,0	397,0
440,0	414,0	415,0	405,0	415,0	397,0	414,0	414,0	397,0	423,0	423,0	440,0
423,0	405,0	405,0	414,0	405,0	415,0	414,0	388,0	397,0	397,0	423,0	414,0
405,0	405,0	414,0	415,0	414,0	440,0	414,0	397,0	423,0	397,0	423,0	397,0
397,0	423,0	423,0	405,0	414,0	405,0	397,0	423,0	414,0	423,0	388,0	414,0
397,0	423,0	415,0	414,0	423,0	397,0	423,0	414,0	423,0	423,0	423,0	423,0
440,0	405,0	423,0	423,0	414,0	423,0	414,0	423,0	423,0	397,0	423,0	397,0
414,0	414,0	423,0	397,0	414,0	414,0	388,0	397,0	414,0	414,0	414,0	397,0
423,0	414,0	414,0	397,0	423,0	423,0	423,0	414,0	440,0	440,0	388,0	414,0
414,0	423,0	414,0	423,0	414,0	414,0	423,0	397,0	397,0	414,0	388,0	397,0
415,0	423,0	414,0	414,0	440,0	414,0	423,0	423,0	388,0	414,0	423,0	414,0
414,0	415,0	415,0	414,0	440,0	415,0	423,0	388,0	423,0	423,0	414,0	423,0
440,0	423,0	415,0	440,0	423,0	414,0	397,0	440,0	388,0	414,0	388,0	423,0
423,0	397,0	414,0	414,0	414,0	414,0	397,0	423,0	397,0	414,0	388,0	397,0
414,0	405,0	423,0	405,0	405,0	405,0	397,0	440,0	397,0	397,0	414,0	423,0
397,0	440,0	414,0	405,0	405,0	423,0	397,0	388,0	440,0	388,0	397,0	397,0
423,0	415,0	423,0	414,0	440,0	405,0	388,0	440,0	440,0	440,0	414,0	423,0
414,0	397,0	405,0	405,0	405,0	405,0	414,0	414,0	423,0	414,0	414,0	414,0
414,0	414,0	414,0	415,0	405,0	414,0	423,0	423,0	414,0	397,0	440,0	388,0
397,0	405,0	405,0	414,0	414,0	423,0	397,0	388,0	440,0	397,0	397,0	440,0

FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4440-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ
Marca : ARSOUGROUP
Modelo : NO INDICA
Número de serie : 033U19
Valor de abertura : 150 µm
N° de Tamiz : No. 100
Diámetro del alambre : 100 µm
Material : ACERO INOXIDABLE
Procedencia : NO INDICA
Identificación : NO INDICA
Ubicación : LABORATORIO
Fecha de calibración : 2024-09-03

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4440-2024

Página 2 de 3

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,7	16,7
Humedad relativa (%hr)	52	52

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Reticula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 200 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

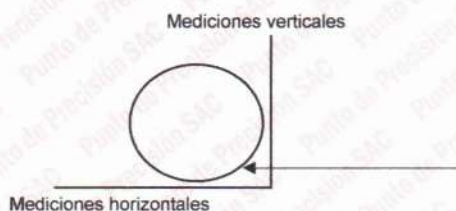
8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)	Error máximo permitido (µm)
Horizontal	150,0	154,5	4,5	2,6	6,0
Vertical		153,1	3,1	2,2	6,0

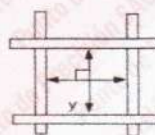
	Abertura máxima permitida (µm)	Abertura máxima encontrada (µm)	Máxima desviación permitida (µm)	Desviación estandar encontrada (µm)
Horizontal	188,00	165,05	11,86	6,30
Vertical		161,05		6,12


	Valor nominal del diámetro (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)
Horizontal	100,0	94,7	-5,3	1,7
Vertical		101,3	1,3	1,9

	Diámetro Máximo permitido (µm)	Diámetro Máximo encontrado (µm)	Diámetro Mínimo permitido (µm)	Diámetro Mínimo encontrado (µm)
Horizontal	115,0	97,1	85,0	92,1
Vertical		110,1		92,1



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4440-2024

Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 150 µm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 150 µm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de µm						Las mediciones se realizaron en las unidades de µm					
161,1	165,1	149,1	146,1	156,1	156,1	147,1	154,1	156,1	147,1	161,1	142,1
149,1	161,1	146,1	156,1	149,1	156,1	156,1	147,1	161,1	154,1	156,1	156,1
149,1	156,1	161,1	161,1	161,1	156,1	154,1	154,1	147,1	154,1	142,1	147,1
156,1	146,1	156,1	149,1	165,1	146,1	147,1	161,1	156,1	147,1	142,1	156,1
161,1	156,1	161,1	149,1	165,1	161,1	161,1	147,1	154,1	156,1	161,1	156,1
146,1	165,1	146,1	161,1	161,1	146,1	147,1	147,1	161,1	161,1	156,1	154,1
149,1	156,1	165,1	156,1	156,1	156,1	154,1	142,1	142,1	147,1	147,1	156,1
161,1	161,1	161,1	149,1	149,1	165,1	156,1	154,1	156,1	147,1	156,1	161,1
165,1	149,1	146,1	161,1	146,1	156,1	142,1	154,1	147,1	161,1	142,1	147,1
156,1	165,1	149,1	146,1	146,1	146,1	154,1	147,1	156,1	142,1	147,1	142,1
149,1	149,1	156,1	161,1	156,1	156,1	154,1	156,1	154,1	154,1	156,1	154,1
165,1	161,1	156,1	149,1	161,1	149,1	161,1	161,1	161,1	156,1	154,1	156,1
149,1	156,1	161,1	146,1	156,1	156,1	156,1	147,1	156,1	147,1	161,1	147,1
146,1	156,1	161,1	146,1	161,1	149,1	147,1	147,1	161,1	147,1	161,1	142,1
161,1	161,1	146,1	161,1	146,1	146,1	161,1	161,1	156,1	147,1	161,1	142,1
161,1	156,1	146,1	149,1	146,1	156,1	154,1	156,1	142,1	154,1	147,1	154,1
156,1	149,1	161,1	149,1	146,1	161,1	161,1	147,1	156,1	161,1	161,1	154,1
156,1	146,1	161,1	156,1	156,1	156,1	154,1	156,1	161,1	142,1	154,1	161,1
156,1	161,1	161,1	156,1	149,1	156,1	156,1	147,1	142,1	156,1	147,1	142,1
156,1	156,1	161,1	165,1	146,1	149,1	154,1	154,1	156,1	156,1	154,1	154,1
156,1	161,1	156,1	156,1	165,1	149,1	142,1	147,1	147,1	161,1	156,1	147,1
149,1	156,1	165,1	156,1	146,1	149,1	147,1	156,1	156,1	161,1	161,1	161,1
149,1	156,1	146,1	165,1	149,1	149,1	161,1	156,1	161,1	147,1	154,1	154,1
146,1	156,1	156,1	161,1	161,1	149,1	147,1	154,1	161,1	142,1	142,1	156,1
149,1	149,1	156,1	161,1	156,1	149,1	161,1	161,1	154,1	154,1	161,1	156,1
149,1	161,1	165,1	161,1	146,1	146,1	156,1	147,1	161,1	161,1	147,1	154,1
149,1	156,1	156,1	149,1	149,1	156,1	147,1	147,1	161,1	154,1	142,1	142,1
156,1	156,1	146,1	146,1	146,1	146,1	147,1	161,1	147,1	156,1	147,1	154,1
165,1	161,1	161,1	156,1	165,1	165,1	147,1	154,1	154,1	147,1	161,1	147,1
156,1	146,1	161,1	165,1	149,1	149,1	161,1	156,1	154,1	156,1	156,1	161,1
146,1	149,1	156,1	161,1	156,1	156,1	154,1	154,1	147,1	161,1	156,1	142,1
156,1	146,1	156,1	156,1	146,1	156,1	156,1	161,1	154,1	156,1	147,1	154,1
156,1	146,1	149,1	149,1	149,1	149,1	161,1	147,1	156,1	154,1	156,1	147,1
146,1	146,1	—	—	—	—	154,1	161,1	—	—	—	—

FIN DEL DOCUMENTO




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4441-2024

Página 1 de 3

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.

Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Instrumento de medición : TAMIZ

Marca : ARSOUGROUP

Modelo : NO INDICA

Número de serie : 006X20

Valor de abertura : 75 µm

N° de Tamiz : No. 200

Diametro del alambre : 50 µm

Material : ACERO INOXIDABLE

Procedencia : NO INDICA

Identificación : NO INDICA

Ubicación : LABORATORIO

Fecha de calibración : 2024-09-03

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones en que se realizaron las mediciones y no debe ser utilizado como certificado de conformidad con normas de productos o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

PUNTO DE PRECIÓN S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

3. Método de calibración

La calibración se realizó mediante comparación directa sin contacto según la Norma "ASTM E11-22 Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves".

4. Lugar de calibración

AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO




Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4441-2024

Página 2 de 3

5. Condiciones ambientales

	Inicial	Final
Temperatura ambiental (°C)	16,7	16,1
Humedad relativa (%hr)	51	51

6. Trazabilidad

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
INACAL-DM	Reticula microscópica con una incertidumbre máxima de 1,1 µm.	LLA-050-2023

7. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación de "CALIBRADO".
- Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Para la calibración del tamiz, se realizó 250 mediciones en apertura de la malla y en el diámetro del alambre.

8. Resultados de medición

	Valor nominal de apertura (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)	Error máximo permitido (µm)
Horizontal	75,0	74,7	-0,3	2,5	3,7
Vertical		71,7	-3,3	2,5	3,7

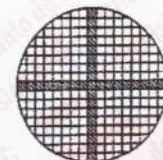
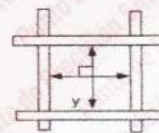
	Abertura máxima permitida (µm)	Abertura máxima encontrada (µm)	Máxima desviación permitida (µm)	Desviación estándar encontrada (µm)
Horizontal	101,00	83,06	8,04	3,98
Vertical		78,06		3,45

	Valor nominal del diámetro (µm)	Promedio de mediciones (µm)	Error encontrado (µm)	Incertidumbre de medición (µm)
Horizontal	50,0	53,3	3,3	1,7
Vertical		50,7	0,7	1,8

	Diámetro Máximo permitido (µm)	Diámetro Máximo encontrado (µm)	Diámetro Mínimo permitido (µm)	Diámetro Mínimo encontrado (µm)
Horizontal	58,0	58,1	43,0	46,1
Vertical		55,1		46,1



Placa grabada y/o Indicaciones técnicas del tamiz



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631

Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106 698-9620

www.puntodeprecision.com E-mail: ventas@puntodeprecision.com.pe / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



Laboratorio PP

PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LL-4441-2024

Página 3 de 3

ANEXO A - MEDICIONES REALIZADAS

MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - HORIZONTAL - VALOR NOMINAL DE 75 µm						MEDIDAS REALIZADAS DE APERTURA - VERTICAL - VALOR NOMINAL DE 75 µm					
Las mediciones se realizaron en las unidades de µm						Las mediciones se realizaron en las unidades de µm					
78,1	71,1	83,1	69,1	78,1	74,1	73,1	64,1	73,1	73,1	76,1	69,1
73,1	71,1	78,1	73,1	73,1	78,1	73,1	69,1	70,1	78,1	70,1	73,1
73,1	74,1	78,1	78,1	74,1	78,1	73,1	70,1	69,1	73,1	69,1	78,1
78,1	73,1	78,1	71,1	83,1	71,1	69,1	78,1	70,1	76,1	73,1	78,1
74,1	73,1	73,1	78,1	69,1	73,1	73,1	73,1	73,1	64,1	70,1	73,1
69,1	78,1	69,1	69,1	78,1	69,1	69,1	73,1	70,1	73,1	73,1	73,1
74,1	71,1	71,1	74,1	78,1	78,1	73,1	76,1	73,1	73,1	69,1	69,1
71,1	78,1	78,1	73,1	73,1	71,1	73,1	73,1	69,1	76,1	70,1	73,1
73,1	71,1	74,1	78,1	73,1	69,1	73,1	73,1	73,1	73,1	64,1	78,1
71,1	83,1	73,1	71,1	73,1	71,1	70,1	64,1	73,1	73,1	69,1	73,1
69,1	78,1	71,1	78,1	74,1	73,1	70,1	73,1	73,1	73,1	69,1	69,1
78,1	78,1	71,1	78,1	78,1	73,1	76,1	73,1	73,1	73,1	73,1	69,1
73,1	71,1	74,1	78,1	71,1	73,1	69,1	64,1	73,1	70,1	69,1	69,1
74,1	74,1	78,1	78,1	71,1	78,1	73,1	69,1	69,1	70,1	73,1	78,1
73,1	78,1	73,1	71,1	78,1	71,1	73,1	73,1	73,1	64,1	69,1	73,1
73,1	69,1	73,1	73,1	71,1	78,1	70,1	73,1	78,1	73,1	73,1	70,1
69,1	71,1	83,1	78,1	83,1	78,1	69,1	64,1	73,1	73,1	73,1	76,1
71,1	71,1	71,1	83,1	78,1	73,1	76,1	76,1	69,1	69,1	64,1	64,1
73,1	78,1	78,1	71,1	78,1	71,1	73,1	76,1	73,1	76,1	69,1	69,1
71,1	78,1	78,1	73,1	71,1	71,1	73,1	69,1	73,1	76,1	73,1	73,1
73,1	71,1	71,1	78,1	83,1	83,1	70,1	78,1	73,1	73,1	64,1	73,1
69,1	78,1	73,1	73,1	74,1	78,1	73,1	73,1	64,1	69,1	73,1	73,1
83,1	73,1	83,1	71,1	83,1	69,1	78,1	73,1	69,1	73,1	76,1	70,1
78,1	71,1	78,1	78,1	73,1	78,1	70,1	69,1	73,1	73,1	73,1	73,1
78,1	83,1	71,1	73,1	73,1	73,1	73,1	70,1	78,1	64,1	73,1	73,1
74,1	71,1	83,1	73,1	73,1	78,1	70,1	70,1	73,1	73,1	73,1	73,1
78,1	78,1	71,1	73,1	71,1	69,1	69,1	73,1	70,1	73,1	73,1	73,1
73,1	71,1	71,1	69,1	69,1	71,1	70,1	69,1	73,1	73,1	76,1	69,1
74,1	78,1	73,1	78,1	69,1	78,1	69,1	69,1	73,1	76,1	70,1	64,1
71,1	73,1	71,1	73,1	83,1	78,1	78,1	64,1	64,1	64,1	70,1	69,1
71,1	78,1	73,1	73,1	71,1	73,1	69,1	76,1	73,1	69,1	64,1	73,1
83,1	83,1	71,1	73,1	73,1	78,1	73,1	73,1	69,1	76,1	64,1	73,1
78,1	74,1	71,1	71,1	83,1	73,1	69,1	70,1	73,1	76,1	69,1	69,1
78,1	73,1	83,1	78,1	74,1	78,1	78,1	73,1	64,1	64,1	69,1	70,1
83,1	73,1	74,1	78,1	83,1	78,1	73,1	78,1	70,1	73,1	73,1	69,1
73,1	74,1	73,1	78,1	73,1	69,1	70,1	78,1	73,1	76,1	69,1	69,1
73,1	71,1	78,1	69,1	71,1	73,1	70,1	73,1	70,1	73,1	69,1	78,1
78,1	83,1	78,1	71,1	71,1	71,1	73,1	73,1	76,1	69,1	73,1	76,1
74,1	78,1	78,1	71,1	74,1	78,1	69,1	73,1	69,1	73,1	73,1	76,1
71,1	71,1	78,1	71,1	74,1	71,1	78,1	73,1	69,1	73,1	73,1	73,1
78,1	83,1	69,1	74,1	71,1	73,1	73,1	64,1	76,1	73,1	69,1	76,1
74,1	71,1	83,1	69,1	—	—	69,1	69,1	73,1	69,1	—	—

FIN DEL DOCUMENTO



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



Av. Los Ángeles 653 - LIMA 42 Telf. 292-5106 698-9620

www.puntodeprecision.com E-mail: ventas@puntodeprecision.com.pe / puntodeprecision@hotmail.com

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LFP-863-2024

Página : 1 de 2

Expediente : 410-2024
Fecha de emisión : 2024-09-07

1. Solicitante : J & T INGEOTECNIA SERVICIOS GENERALES S.A.C.
Dirección : AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN
ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO

2. Descripción del Equipo : PRENSA CBR
Marca de Prensa : ARSOU GROUP
Modelo de Prensa : PP401
Serie de Prensa : 400001
Marca de Celda : ZEMIC
Modelo de Celda : H3-C3-5.0t-6B
Serie de Celda : ULI68997
Capacidad de Celda : 5 t
Marca de indicador : HI WEIGH
Modelo de Indicador : X8
Serie de Indicador : 19H0301046

3. Lugar y fecha de Calibración
AV. AVENIDA COLLASUYO/LAS PALMERAS A-1 NRO. SN ASC. PROLONGACION - SAN SEBASTIAN - CUSCO
03 - SETIEMBRE - 2024

4. Método de Calibración
La Calibración se realizó de acuerdo a la norma ASTM E4 .

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
CELDA DE CARGA	ZEMIC	MT-8009-2023	SISTEMA INTERNACIONAL
INDICADOR	AEP TRANSDUCERS		

6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	17,1	17,1
Humedad %	46	46

7. Resultados de la Medición

Los errores de la prensa se encuentran en la página siguiente.

8. Observaciones

Con fines de identificación se ha colocado una etiqueta autoadhesiva de color verde con el número de certificado y fecha de calibración de la empresa PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo. Indicado ha sido calibrado probado y verificado usando patrones certificados con trazabilidad a la Dirección de Metrología del INACAL y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

Punto de Precision S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.



Jefe de Laboratorio
Ing. Luis Loayza Capcha
Reg. CIP N° 152631



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LFP-863-2024

Página : 2 de 2

TABLA N° 1

SISTEMA DIGITAL "A" kgf	SERIES DE VERIFICACIÓN (kgf)				PROMEDIO "B" kgf	ERROR Ep %	RPTBLD Rp %
	SERIE 1	SERIE 2	ERROR (1) %	ERROR (2) %			
500	497,55	497,45	0,49	0,51	497,50	0,50	0,02
1000	997,85	998,10	0,21	0,19	997,98	0,20	-0,03
1500	1500,05	1501,10	0,00	-0,07	1500,58	-0,04	-0,07
2000	2002,30	2001,95	-0,11	-0,10	2002,13	-0,11	0,02
2500	2505,90	2505,45	-0,24	-0,22	2505,68	-0,23	0,02
3000	3012,15	3011,85	-0,41	-0,39	3012,00	-0,40	0,01
3500	3522,85	3523,10	-0,65	-0,66	3522,98	-0,65	-0,01
4000	4032,40	4033,80	-0,81	-0,85	4033,10	-0,82	-0,04

NOTAS SOBRE LA CALIBRACIÓN

- 1.- Ep y Rp son el Error Porcentual y la Repetibilidad definidos en la citada Norma:

$$Ep = ((A-B) / B) * 100 \quad Rp = Error(2) - Error(1)$$
- 2.- La norma exige que Ep y Rp no excedan el 1,0 %
- 3.- Coeficiente Correlación: $R^2 = 1$

Ecuación de ajuste : $y = 0,9903x + 12,988$

Donde: x : Lectura de la pantalla
y : Fuerza promedio (kgf)

GRÁFICO N° 1

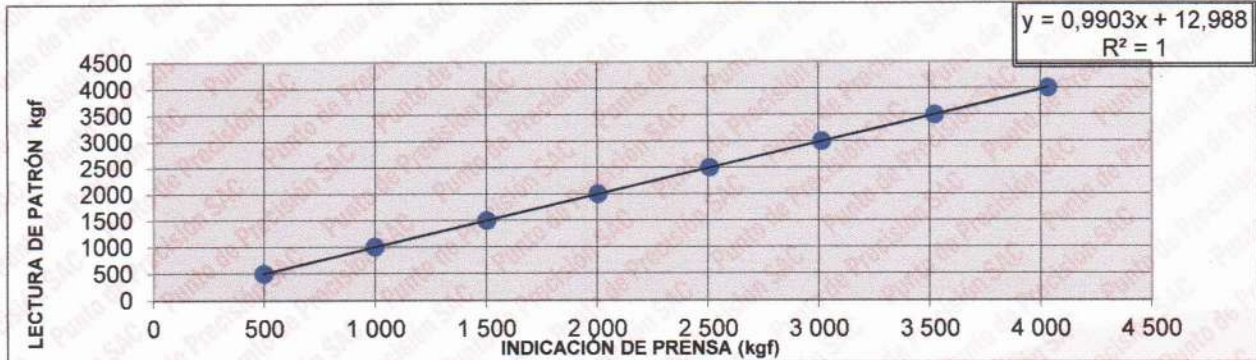
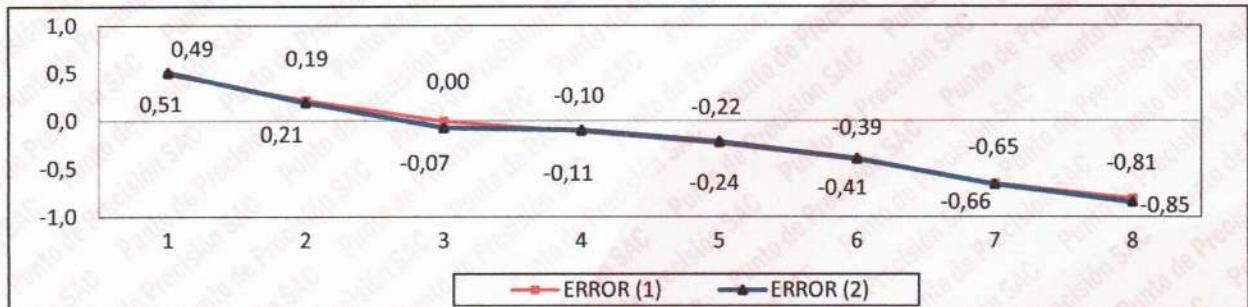



GRÁFICO DE ERRORES



FIN DEL DOCUMENTO




 Jefe de Laboratorio
 Ing. Luis Loayza Capcha
 Reg. CIP N° 152631