



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

**Línea de investigación:
Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor

Cajaleón Gomez, Javier Gustavo

Asesor

Pumaricra Padilla, Raúl Valentín

ORCID: 0000-0002-7037-4396

Jurado

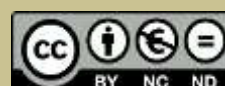
Benites Zuñiga, José Luis

Tabory Malpartida, Gustavo Augusto

Arévalo Vidal, Samir Augusto

Lima - Perú

2026



USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%	20%	3%	11%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	7%
2	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	revistas.ucr.ac.cr Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Alas Peruanas Trabajo del estudiante	1%
5	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	1%
6	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
9	repositorio.ucp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.uprit.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	www.gob.pe Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
14	"Estudio del diseño estructural y constructivo de pavimentos articulados en base a bloques	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

**USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE
EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Línea de Investigación:

Construcción Sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio.

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil

Autor

Cajaleón Gomez, Javier Gustavo

Asesor

Pumaricra Padilla, Raúl Valentín

ORCID: 0000-0002-7037-4396

Jurado:

Benites Zuñiga, José Luis

Tabory Malpartida, Gustavo Augusto

Arévalo Vidal, Samir Augusto

Lima – Perú

Dedicatoria

El presente compendio lo dedico sobre todo a Dios, por guiar cada uno de mis pasos en este camino.

A mis padres, pilares fundamentales de mi existencia, mi más profunda gratitud y amor eterno. Gracias por enseñarme a través del ejemplo, el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad. Sus sacrificios y su amor sin condiciones fueron el motor que me inspiró a no rendirme, a levantarme después de cada caída y a seguir luchando por cada uno de mis sueños, metas y anhelos. Todo lo que hoy alcanzo, lo hago con ustedes en el corazón.

Este logro es también suyo. Porque sin Dios, sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi casa de estudios, la Universidad Nacional Federico Villarreal, y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil, por haberme acogido y formado con compromiso, rigor académico y vocación de excelencia. Esta institución no solo me brindó una educación de calidad, sino también los valores, las herramientas técnicas y el espíritu de responsabilidad que todo profesional necesita para afrontar los desafíos del mundo real.

La Facultad de Ingeniería Civil de la UNFV fue la puerta que se abrió para conducirme a uno de mis grandes sueños, y siempre llevaré con orgullo su nombre como egresado de esta prestigiosa institución.

ÍNDICE

Resumen	xi
Abstract.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Descripción y formulación del problema	15
1.2 Antecedentes	20
1.3 Objetivos	30
-Objetivo General	30
-Objetivos Específicos.....	30
1.4 Justificación	30
1.5 Hipótesis.....	31
- Hipótesis General	31
-Hipótesis Específicas	31
II. MARCO TEÓRICO	33
2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación	33
III. MÉTODO.....	65
3.1 Tipo de investigación.....	65

3.2	Ámbito temporal y espacial	65
3.3	Variables.....	66
3.4	Población y muestra.....	67
3.5	Instrumentos.....	68
3.6	Procedimientos	69
3.7	Análisis de datos	71
3.8	Consideraciones éticas	72
IV.	RESULTADOS.....	73
4.1	Tema de investigación propuesta	73
4.2	Localización del proyecto	73
4.3	Trabajo de Gabinete	76
4.4	Materiales a Utilizarse.....	82
4.5	Mezcla de Materiales	84
4.5.1.	Granulometría de la muestra patrón.....	86
4.5.3.	Límite de Atterberg.....	88
4.5.4.	Proctor Modificado	96
4.5.5.	Ensayo CBR.....	97
4.6.	Cálculo de cantidades por m3.....	100

4.7. Metodología -Abastecimiento de caucho en Polvo	101
4.8. Aplicación en el análisis de costos	102
4.9. Diseño de Pavimento flexible	106
V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	114
VI. CONCLUSIONES	126
VII. RECOMENDACIONES	129
VIII. REFERENCIAS.....	131
IX ANEXOS.....	139
Anexo A: Ensayos de Laboratorio	140
Anexo B: Diseño de Pavimento Flexible	168
Anexo C: Planos del Distrito de Utulpuquio- Huaraz	181
Anexo D: Panel Fotográfico	183
Anexo E: Matriz de Consistencia	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Ruta de la Localidad de Ultupuquio distrito de Chavín de Huántar</i>	19
Figura 2: <i>Composición del pavimento flexible</i>	38
Figura 3: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $6\% \leq CBR \leq 10\%$</i>	38
Figura 4: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $10\% \leq CBR \leq 20\%$</i>	40
Figura 5: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $20\% \leq CBR \leq 30\%$</i>	41
Figura 6: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $CBR \leq 30\%$</i>	42
Figura 7: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $6\% \leq CBR \leq 10\%$</i>	43
Figura 8: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $10\% \leq CBR \leq 20\%$</i>	44
Figura 9: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $20\% \leq CBR \leq 30\%$</i>	45
Figura 10: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $30\% \leq CBR$</i>	46
Figura 11: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $6\% \leq CBR < 10\%$</i>	47
Figura 12: <i>Pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente $10\% \leq CBR < 20\%$</i>	48
Figura 13: <i>Refuerzo de pavimento flexible Tp0 a Tp7</i>	51
Figura 14: <i>Refuerzo de pavimento flexible Tp8 a Tp14</i>	52
Figura 15: <i>Ábaco para el cálculo de espesores de refuerzo en carpeta asfáltica</i>	52
Figura 16: <i>Agregados pétreos</i>	54
Figura 17: <i>Índice de Plasticidad</i>	54
Figura 18: <i>Límites de Atterberg</i>	55
Figura 19: <i>Partículas de caucho reciclado después de proceso de trituración</i>	57
Figura 20: <i>Partes del Neumático</i>	58
Figura 21: <i>Propiedades del caucho</i>	59
Figura 22: <i>Diagrama de flujo de tesis</i>	70
Figura 23: <i>Propiedades del caucho</i>	73
Figura 24: <i>Redes viales del distrito de Chavín de Huántar</i>	74
Figura 25: <i>Calicatas</i>	75
Figura 26: <i>Propiedades del caucho</i>	78
Figura 27: <i>Propiedades del caucho</i>	82
Figura 28: <i>Límite Líquido</i>	88
Figura 29: <i>Límite Plástico</i>	89
Figura 30: <i>Límite líquido</i>	90
Figura 31: <i>Límite Plástico c-02</i>	92

Figura 32: <i>Límite líquido</i>	94
Figura 33: <i>Límite plástico</i>	95
Figura 34: <i>Máxima Densidad</i>	97
Figura 35: <i>CBR (Resistencia)</i>	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i>	67
Tabla 2 <i>Tamaño de muestra</i>	68
Tabla 3 <i>Características físicas y mecánicas</i>	69
Tabla 4 <i>Requisitos de la subrasante granular</i>	71
Tabla 5 <i>Número de calicatas</i>	74
Tabla 6 <i>Análisis granulométrico</i>	77
Tabla 7 <i>Ensayo Granulométrico</i>	78
Tabla 8 <i>Índice de plasticidad</i>	80
Tabla 9 <i>Características del caucho en polvo</i>	84
Tabla 10 <i>Mezcla de materiales</i>	85
Tabla 11 <i>Clasificación SUCS y AASHTO</i>	86
Tabla 12 <i>Límite Líquido c-01</i>	88
Tabla 13 <i>Límite Plástico c-01</i>	89
Tabla 14 <i>Límite líquido</i>	91
Tabla 15 <i>Límite Plástico c-02</i>	92
Tabla 16 <i>Límite Líquido c-03</i>	94
Tabla 17 <i>Límite plástico c-03</i>	95
Tabla 18 <i>Próctor Modificado</i>	96
Tabla 19 <i>Ensayo CBR</i>	97
Tabla 20 <i>Combinaciones de CBR más % de polvo de caucho</i>	98
Tabla 21 <i>Aplicación de ejes equivalentes hasta la falla</i>	100
Tabla 22 <i>Precios de los diferentes %s de caucho en polvo al 10%, 15% y 20%</i>	102
Tabla 23 <i>Apu caucho al 10%</i>	103
Tabla 24 <i>Apu caucho al 15%</i>	103
Tabla 25 <i>Apu caucho al 20%</i>	104
Tabla 26 <i>Comparativa – referencias Revista Costos y APU</i>	105
Tabla 27 <i>Velocidad de Diseño en un tramo homogéneo</i>	106
Tabla 28 <i>Anchos mínimos de calzada en tangente</i>	109
Tabla 29 <i>Comparación de espesores de diseño (referencial)</i>	110
Tabla 30 <i>Parámetros considerados para la comparación</i>	110
Tabla 31 <i>Comportamiento mecánico y desempeño de la subrasante</i>	114
Tabla 32 <i>Costo-beneficio y disponibilidad</i>	115

Tabla 33	<i>Presupuesto del Pavimento flexible + 0% de caucho en polvo</i>	116
Tabla 34	<i>Presupuesto del Pavimento flexible + 10% de caucho en polvo</i>	117
Tabla 35	<i>Presupuesto del Pavimento flexible + 15% de caucho en polvo</i>	119
Tabla 36	<i>Presupuesto del Pavimento flexible + 20% de caucho en polvo</i>	120
Tabla 37	<i>Impacto ambiental y sostenibilidad</i>	123
Tabla 38	<i>Aceptación social y generación de valor público</i>	123
Tabla 39:	<i>Matriz de consistencia</i>	187

Resumen

Objetivo: Evaluar el uso de caucho en polvo como alternativa para optimizar el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles **Método:** Indagación cuantitativa, con tipología aplicada, nivel explicativo, de diseño cuasiexperimental, a razón de que la estimación de la subrasante del terreno fue ejecutada por medio de la cuantificación de varios indicadores como granulometría de la subrasante, límites de Atterberg, Proctor modificado y la estimación de su capacidad de soporte (CBR), que constó del estudio del diseño de pavimento flexible agregando caucho en polvo en diferentes proporciones de 10%, 15% y 20%. **Resultados:** Se mostró que adicionar caucho en polvo optimiza significativamente la resistencia mecánica del terreno, especialmente en el contenido del 10 %, donde se obtuvo el mayor valor de CBR, permitiendo reducir los espesores del diseño del pavimento hasta en un 15 %. A nivel económico, aunque el uso de caucho eleva ligeramente el costo inicial, se observó una merma de esos costes relativos al mantenimiento acumulado, por la mayor durabilidad y capacidad portante de la estructura tratada, además, se evidenció que la aplicación de caucho reciclado favorece positivamente la gestión ambiental sostenible, al reutilizar residuos sólidos. **Conclusiones:** El uso de caucho en polvo al 10 % en la subrasante representó una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para perfeccionar el tiempo de utilidad del adoquinado flexible, reduciendo aquellas intervenciones de mantenimiento y optimizando los recursos públicos en obras viales rurales.

Palabras clave: Caucho en polvo, subrasante, pavimento flexible

Abstract

Objective: To evaluate the use of rubber powder as an alternative to optimize the improvement of the subgrade in flexible pavements. **Method:** Quantitative inquiry, with applied typology, explanatory level, quasi-experimental design, since the estimation of the subgrade of the ground was executed through the quantification of several indicators such as subgrade granulometry, Atterberg limits, modified Proctor and the estimation of its bearing capacity (CBR); which consisted of the study of the flexible pavement design adding rubber powder in different proportions of 10%, 15% and 20%. **Results:** It was shown that the addition of pulverized rubber significantly optimizes the mechanical resistance of the soil, especially at the 10% content, where the highest CBR value was obtained, allowing a reduction in pavement design thicknesses by up to 15%. At an economic level, although the use of rubber slightly increases the initial cost, a reduction in these costs related to accumulated maintenance was observed, due to the greater durability and load-bearing capacity of the treated structure. In addition, it was evident that the application of recycled rubber positively favors sustainable environmental management by reusing solid waste. **Conclusions:** The use of 10% pulverized rubber in the subgrade represented a technically, economically, and environmentally viable alternative to improve the useful life of flexible paving, reducing maintenance interventions and optimizing public resources in rural road works.

Keywords: Crumb rubber, Subgrade, Flexible pavement

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de análisis, la construcción y mejora de carreteras representó un desafío considerable para la biodiversidad y el equilibrio ecológico de la región, razón por la cual fue fundamental plantear estrategias de mitigación ambiental acompañadas de una planificación adecuada para reducir su impacto negativo Ross et al. (2020). No obstante, estas intervenciones también promovieron el crecimiento económico local, incentivando el comercio, el desarrollo social y la generación de empleo. Las vías cumplieron un rol esencial en la conexión entre comunidades; sin embargo, en la jurisdicción del distrito de Chavín de Huántar, y particularmente en la localidad de Ultupuquio, se evidenciaron deficiencias en la transitabilidad vehicular, así como el incumplimiento de parámetros geométricos normativos. Estas limitaciones afectaron directamente la calidad del servicio de transporte, situación que solo pudo ser atendida mediante la implementación de medidas técnicas definidas en el estudio definitivo, junto con el financiamiento de la obra por parte del gobierno local, a fin de dotar de una infraestructura vial adecuada a sus pobladores. De acuerdo al Ministerio de Transportes y comunicaciones (MTC, 2018): El Diseño Geométrico es uno de los documentos técnicos normativos incluidos dentro del conjunto de manuales establecidos por el Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial, aprobado mediante el Decreto Supremo N.º 034-2008-MTC, este manual tiene validez a nivel nacional y su cumplimiento es obligatorio para todas las entidades encargadas de la gestión de infraestructura vial en los ámbitos del gobierno nacional, regional y local.

Frente a ello, se analizó la posibilidad de aplicar materiales sostenibles y compatibles con el entorno. En ese marco, el uso de caucho en polvo reciclado emergió como una alternativa viable en el enfoque de economía circular. Este material, también denominado crumb rubber, proveniente de neumáticos desechados, fue incorporado con éxito en diversas mezclas asfálticas modificadas, mejorando la resistencia al rutting, al

envejecimiento, al agrietamiento por bajas temperaturas y a la fatiga del pavimento según Guerrero et al. (2024) Del mismo modo, diversos estudios de laboratorio demostraron que la inclusión de caucho reciclado en mezclas estabilizadas con cemento optimizó propiedades geotécnicas del suelo, como la capacidad portante, mejora de rendimiento, capacidad de cimentación, asimismo mejorar la resistencia de la base según Dinesh y Kirubakaran (2019).

Según Ministerio del Ambiente (MINAM, 2021) Durante los últimos años, se evidenció un incremento significativo en el ingreso de llantas al mercado nacional. En el año 2014, se registraron 55,673 toneladas de llantas importadas, mientras que para el año 2018 esta cifra ascendió a 92,659 toneladas. Estos productos, tras cumplir su ciclo de vida útil, se transformaron en neumáticos fuera de uso (NFU) debido al constante recambio del parque vehicular, tanto en carreteras como en otras condiciones operativas. Una vez descartados, estos NFU pasaron a formar parte del volumen de residuos sólidos generados en el país.

Ante esta situación, se planteó la necesidad de establecer un sistema de manejo diferenciado, basado en el principio de responsabilidad extendida del productor (REP), con el fin de evitar la emisión de gases tóxicos y mitigar los posibles efectos perjudiciales para la salud de la población y el medio ambiente, derivados de una disposición final inadecuada. En respuesta a esta problemática, MINAM aprobó el Régimen Especial de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso, mediante el Decreto Supremo N.º 024-2021-MINAM. Esta medida representó el segundo régimen especial implementado en el marco de los lineamientos establecidos en el Decreto Legislativo N.º 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (2021). Este escenario favoreció la acumulación de residuos y generó un riesgo potencial de contaminación ambiental.

En la localidad de Ultupuquio, existían 2.7 kilómetros de vía sin asfaltar, lo que incrementaba significativamente la emisión de polvo vehicular, afectando la calidad del aire dentro de las viviendas y provocando afecciones respiratorias entre sus habitantes. Como medida paliativa, los propios pobladores se vieron en la necesidad de irrigar continuamente los caminos para controlar el polvo en suspensión, lo que implicó un esfuerzo adicional que no resolvía de forma definitiva el problema.

Frente a esta situación, pavimentar estas vías se hace esencial, pero, como podremos notar más adelante, esta zona requiere un reforzamiento de subrasante para que el pavimento se asiente correctamente, para ello una subrasante reforzada con caucho en polvo se consolidó como una alternativa técnica y ambientalmente sostenible frente a los mejoramientos convencionales. Este tipo de estructura vial ofreció mayor resistencia, durabilidad y una menor huella de carbono, al mismo tiempo que fomentó la economía circular mediante el aprovechamiento de residuos sólidos como insumo para la obra civil, según Ross et al. (2020) la inclusión de caucho reciclado mejoró la elasticidad del pavimento, redujo los requerimientos de mantenimiento y extendió la vida útil del mismo, según experiencias documentadas en diversas investigaciones internacionales.

En conclusión, el anteproyecto desarrollado planteó el uso de caucho en polvo reciclado como material mejorante de la subrasante en pavimentos flexibles de la localidad de Ultupuquio, integrando criterios técnicos, sociales y ambientales. Esta propuesta respondió a la necesidad urgente de mejorar la infraestructura vial, reducir los impactos en la salud pública y promover un modelo de desarrollo territorial más sostenible en el distrito de Chavín de Huántar.

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

En el estudio se describió como problemática el estado de la carretera de Ultupuquio, en el distrito de Chavín de Huántar, departamento de Áncash. Se constató que las vías existentes estaban en condiciones extremadamente deficientes tanto para peatones como para vehículos, agravadas por una topografía que variaba desde áreas planas hasta terrenos accidentados y escarpados, lo que dificultó aún más el acceso y el desplazamiento.

La plataforma vial presentó múltiples deterioros: erosión, socavación, baches, deformaciones y cursos de agua sin control, además de carecer por completo de drenajes, pontones, obras de arte y señalización. Esta situación no solo puso en riesgo la integridad de las viviendas, sino que también aumentó el aislamiento de la población en épocas críticas.

En ese contexto, se identificó que uno de los elementos clave para asegurar la durabilidad de un pavimento flexible, sobre todo en zonas de orografía y clima adversos, residió en el adecuado mejoramiento de la subrasante, es decir, de la capa de suelo natural sobre la cual se construyó toda la estructura del pavimento. Para la carretera de Ultupuquio, la subrasante mostró baja capacidad portante, alta susceptibilidad a la humedad y deformaciones importantes bajo cargas repetitivas, lo cual comprometió de manera seria la vida útil del pavimento.

Para dar respuesta a esta problemática, Jara y Vilca (2024) propusieron:

El empleo de caucho reciclado en polvo como aditivo en la subrasante, con el fin de incrementar su resistencia, elasticidad, durabilidad y comportamiento frente a las variaciones térmicas al incorporarse en mezclas estabilizadoras, dicho material mejoró la cohesión del suelo, redujo su susceptibilidad al agua y optimizó el desempeño mecánico general de la subrasante. Además, el uso de caucho reciclado representó una gestión responsable de residuos sólidos y constituyó una alternativa sostenible dentro de la construcción vial ambientalmente responsable. (p. IV)

La implementación de esta tecnología en el mejoramiento de la subrasante no solo permitió prolongar la vida útil del pavimento flexible, sino que también redujo la necesidad de intervenciones constantes de mantenimiento, generando un ahorro significativo en los costos de operación para las autoridades locales y una mejora directa en la calidad de vida de los habitantes. Asimismo, se generó un impacto positivo en términos de sostenibilidad ambiental, al reutilizar un residuo contaminante como el caucho de llantas usadas y evitar su disposición inadecuada en el medio natural.

Por tanto, el proyecto de investigación se enfocó en atender una necesidad técnica y social: desarrollar una solución vial que integrara el territorio, promoviera la sostenibilidad ambiental y garantizara una infraestructura más resistente, eficiente y duradera mediante la innovación en el diseño y mejora de la subrasante con materiales reciclados. El planteamiento del problema se sustentó en una revisión detallada de información técnica, normativa, científica y contextual de la zona de estudio. En primer lugar, se consideró el diagnóstico técnico de Ultupuquio, obtenido de fichas técnicas de obras viales rurales elaboradas conforme al Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones (Invierte.pe). Asimismo, se revisaron informes topográficos, estudios de suelos y levantamientos geotécnicos desarrollados por municipalidades distritales, provinciales y el gobierno regional, los cuales permitieron determinar las condiciones físicas y mecánicas del terreno. Complementariamente, se analizaron estudios de preinversión, tanto en nivel de perfil como en fichas técnicas estándar, que abordaron problemáticas viales en contextos similares.

En segundo lugar, se emplearon como referencia las normas y criterios técnicos de diseño vial del MTC (2018), especialmente el Manual de Carreteras DG-2018, el cual sirvió para evaluar la conformidad geométrica y estructural del trazo vial actual. También se consultaron normativas sobre estabilización de subrasantes con materiales alternativos

como aditivos cementantes, cal, geosintéticos y caucho reciclado, a fin de considerar opciones viables para el mejoramiento estructural del suelo en condiciones adversas.

Por otro lado, se recurrió a fuentes científicas y académicas que documentaron investigaciones previas sobre el uso de caucho reciclado en ingeniería de pavimentos. Se consultaron artículos de revistas indexadas en ScienceDirect, Scielo, Scopus y Redalyc, así como tesis universitarias y publicaciones académicas que estudiaron el comportamiento mecánico de suelos estabilizados con residuos industriales, en particular neumáticos fuera de uso. Esta revisión se complementó con informes técnicos de organismos especializados, como el Instituto Nacional de Investigación en Transportes.

Finalmente, se incorporó información contextual y social de la zona de intervención, obtenida de los censos poblacionales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y de documentos de planificación territorial Planes de Desarrollo Concertado, Planes de Ordenamiento Territorial y Planes de Inversión Pública emitidos por las autoridades locales. Dicha información permitió dimensionar adecuadamente las necesidades de la población, los niveles de accesibilidad y los impactos sociales y económicos asociados a la situación vial.

En conjunto, estos insumos posibilitaron estructurar una visión integral y fundamentada del problema, considerando los aspectos técnicos del pavimento, la sostenibilidad ambiental y la mejora de la calidad de vida de los beneficiarios directos del proyecto.

Figura 1

Ruta de la Localidad de Ultupuquio distrito de Chavín de Huántar



Nota. Imagen satelital que muestra la ruta de acceso a la localidad de Ultupuquio, en el distrito de Chavín de Huántar. Adaptado de Google Earth.

Según Mio y Salirrosas (2024) Hoy en día, el progreso de la tecnología son impulsantes significativamente del desarrollo de soluciones para optimizar el nivel de excelencia de la pavimentación del país. Existen múltiples alternativas que ofrecen mayor resistencia y durabilidad, adaptándose eficazmente a condiciones climáticas variables y a las cargas pesadas generadas por el tránsito vehicular. Frente al progresivo deterioro de las vías, surge la necesidad de optimizar los diseños estructurales de los pavimentos, siendo una de las alternativas más prometedora, añadir caucho reciclado a manera de aditivo en los compuestos con agregados, hecho demostrable de mejoras notables en la capacidad resistente del material. Diversos estudios han evidenciado que el uso de mezclas asfálticas reformadas con caucho reciclado aporta beneficios significativos en la elaboración de carpetas asfálticas, para ello, se han desarrollado ensayos experimentales que permitieron evaluar variables claves del diseño, obteniendo resultados favorables en cuanto a rendimiento mecánico y durabilidad. Estas soluciones ya han sido implementadas en distintos proyectos viales a nivel nacional. El uso de caucho reciclado en la ingeniería vial se está consolidando como un ejercicio de mayor presencia en la nación peruana, debido a sus excelentes propiedades frente a la corrosión,

deformación y resistencia estructural. Su adecuada trabajabilidad y desempeño en campo lo convierten en un material viable para que las empresas contratistas lo integren en obras de infraestructura vial, contribuyendo así al mejoramiento de la conectividad y al desarrollo sostenible del país.

1.1.2 Formulación del problema

Después de hacer un breve análisis de lo que podría hacerse, cabe formularse las siguientes preguntas:

Problema General

- ¿De qué manera el uso de caucho en polvo como material alternativo puede contribuir al mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles?

Problemas Específicos

- ¿Cuál es el comportamiento del CBR en la subrasante mejorada con caucho en polvo de pavimento flexible?
- ¿De qué manera el uso del caucho en polvo reducirá los espesores del diseño de pavimento flexible?
- ¿Cuál es la influencia del uso de caucho en polvo en el costo del diseño de pavimento flexible?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes de Caucho en polvo

Giraldo et al. (2017) En su investigación titulada Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura, el objetivo es obtener elastómeros termoplásticos, mientras que la industria del caucho trata de encontrar cargas de relleno de menor costo, la metodología aplicada fue documental y retrospectiva, basada en una revisión crítica y comparativa de literatura científica y técnica, con el fin de clasificar y sintetizar los procedimientos de reciclaje, las aplicaciones existentes y los beneficios reportados del

caucho reciclado en materiales para infraestructura. Como conclusión los residuos de caucho actúan como reformadores de adoquinados y materiales, contribuyendo en la mejora de su ligereza y ductilidad. Si utilizamos caucho reciclado y mezcla de caucho virgen, esto proporciona beneficios ambientales, tecnológicos y sociales, menores costos, así como hacer más fácil el proceso para obtener materiales, así como su eficacia tanto en el proceso de vulcanización como la merma del gasto de energía. Se debe considerar la resistencia a la compresión al utilizar estos materiales para la construcción. La aplicación del caucho y la estabilidad para la construcción de carreteras representa ventajas y mejores métodos como una mayor resistencia a los peligros y a la fatiga, sin menospreciar los grandes resultados ambientales y económicos. Como aporte de la presente investigación, este antecedente aporta una visión integral sobre los beneficios y desafíos de utilizar caucho reciclado virgen en la construcción de carreteras, lo que ayuda a guiar el estudio hacia aspectos técnicos, económicos y ambientales cruciales para el desarrollo de materiales más sostenibles y eficientes.

Díaz y Castro (2017) desarrolló la indagación “Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá”, El propósito central fue la revisión del estado del arte referente a la aplicación del Grano de Caucho Reciclado en los concretos asfálticos. La metodología se inició con la recopilación sistemática de literatura técnica y estudios internacionales referentes al empleo de grano de caucho reciclado (GCR) en compuestos asfálticos, lo cual permitió identificar ventajas, limitaciones, métodos de dosificación y procesos óptimos para su incorporación el enfoque incluyó una valoración de la afectación sobre el medio ambiente y la economía derivado del uso de GCR en pavimentos. Como conclusión de lo analizado en los estudios antes mencionados sobre envases y semillas de caucho reciclado, se ve que estos tienen efectos nocivos en el comportamiento de diversos arreglos. En este se determina el nivel de temperatura en el GCR y la aplicación del producto

está diseñada para mejorar la calidad física del empaque del producto, carreteras y GCR, comparando la brecha vial aumentando la brecha económica. Por un lado, aumenta la vida útil de la cubierta y GCR, lo que permitirá ahorrar dinero en mantenimiento por daños en la máquina. Como aporte de la presente investigación, aporta a la consolidación de una visión más integral de la sostenibilidad en el esbozo y edificación de vías, demostrando que los residuos pueden convertirse en soluciones técnicas viables, tanto en contextos urbanos como rurales, y en diferentes componentes estructurales del pavimento. Además, promueven la aplicación del principio de economía circular en el manejo de desechos, en consonancia con aquellas políticas medioambientales actuales en América Latina.

Farfán y Leonardo (2018) En su revista titulada: Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. Su Objetivo general es evaluar el efecto del caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso en la resistencia a la compresión y flexión del concreto, modificado con aditivo plastificante, con el fin de determinar su viabilidad técnica como alternativa sostenible en mezclas de concreto estructural. La metodología fue de tipo aplicada, ya que buscó generar conocimientos orientados a una finalidad práctica: evaluar el uso de caucho reciclado como parte constitutiva del concreto. El nivel de investigación fue experimental, dado que se realizaron pruebas en laboratorio con variables controladas para observar el comportamiento del concreto ante diferentes porcentajes de incorporación de caucho reciclado, el diseño de investigación fue de tipo cuasi-experimental, con un enfoque cuantitativo, ya que se trabajó con datos medibles (resistencia a la compresión y flexión) y se aplicaron métodos estadísticos para el análisis de resultados, la población estuvo compuesta por mezclas de concreto convencional utilizadas comúnmente en obras civiles, mientras que la muestra correspondió a probetas cilíndricas y prismáticas de concreto, modificadas con diferentes proporciones de caucho reciclado (5%, 10% y 15% en

sustitución parcial del agregado fino), además del uso constante de un aditivo plastificante para mejorar su trabajabilidad. Como conclusión es factible utilizar caucho reciclado en combinación con aditivo plastificante para recuperar significativamente la resistencia mecánica hasta en un 10%, además contribuye a disminuir los efectos negativos que generan los desechos de caucho en el medio ambiente, La presente investigación aportó significativamente al cuerpo de conocimientos sobre la aplicación del caucho reciclado en el ámbito de la ingeniería civil, específicamente en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto, al explorar su influencia en la resistencia a la compresión y flexión. Este estudio se relacionó estrechamente con otras investigaciones que compartieron un objetivo común: revalorizar residuos de neumáticos fuera de uso (NFU) como insumos sostenibles en obras de infraestructura, asimismo se reflejó el potencial multidisciplinario del caucho reciclado en distintas capas del pavimento (superficial, intermedia y de soporte) y elementos estructurales, fortaleciendo el paradigma de la economía circular en el sector de la construcción. Cada una, desde su enfoque específico asfalto, subrasante y concreto estructural, contribuyó al diseño de soluciones técnicas que mitigan el impacto ambiental de los residuos y promueven una infraestructura más sostenible y eficiente.

Balbin y Chochón (2019) En su investigación titulada “Diseño de mezcla asfáltica con material reciclado para la mejora del comportamiento mecánico del pavimento en el tramo km 90+000 al km 95+000 de la carretera Canta a Huayllay ubicado en el distrito y provincia de Canta en el departamento de Lima 2019”, como objetivo general pretendía el diseño de un compuesto asfáltico mediante material reciclado, con miras al mejoramiento de la actuación mecánica de la capa asfáltica relativa al tramo km 90+000 al km 95+000 de la vía Canta a Huayllay situado dentro del área distrital y provincial de Canta, departamento de Lima 2019, en cuanto al método investigativo, hace adopción de una tipología aplicada, por el hecho de

que espera llevar a cabo la demostración del sustento hipotético planteado mediante pruebas y metodologías, conforme a los parámetros del MTC (2013). Particularmente en dicha indagación, se pretendía tanto reciclar como optimizar ese material obtenido de la carretera de Canta a Huayllay, interpretando su actuación mecánica. Como conclusión con relación al esbozo del compuesto asfáltico con material reutilizado para el mejoramiento de la actuación mecánica de la pavimentación en el tramo km 90+000 al km 95+000 de la carretera analizada, fue apreciable que la carpeta asfáltica manifiesta un estado de deterioro, al contrastarse con el huso granulométrico de una MAC-2. Como aporte de la presente investigación, se determinó que, al agregar material reciclado a la muestra, tendríamos una deficiencia en el agregado grueso, ya que no cumpliría con los usos granulométricos, por ende, es necesario incrementar la cuantía de agregado grueso en un 30%, asimismo pasa en el agregado fino, por dejarla sin consideración del huso granulométrico, el cual también se corregiría si se incrementa la cantidad del agregado fino al 30%, en cuanto al aporte del trabajo de investigación propio nos ayuda a identificar la incidencia del material agregado extraído del lugar y los porcentajes del aporte del estudio para los tipos de muestras.

Hoyos et al. (2021) En su investigación titulada Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria como objetivo general es reutilizar el caucho granulado, con el fin de reducir el impacto ambiental y alargar la durabilidad de los pavimentos. Mediante estudios experimentales demostraron que estas mezclas con caucho granulado mejoran significativamente la resistencia a la formación de surcos, la resistencia al daño por humedad y la estabilidad, cumpliendo así con las especificaciones estándar para pavimentos y ofreciendo suficiente módulo de rigidez dinámica. La metodología de evaluación del ciclo de vida se utiliza para evaluar y comparar el desempeño ambiental relacionado con tres cursos de desgaste del pavimento de carreteras: mezclas de grado abierto, de grado de separación y de grado denso. Como conclusión la

revisión literaria realizada sugiere que, al adicionar caucho granulado al asfalto, al agregado y a la mezcla, hay una mejora en las propiedades de la mezcla en cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, la estabilidad retenida, la resistencia a la susceptibilidad a la humedad, la resistencia a la formación de surcos, la resistencia a la fluencia y la resistencia a la permeabilidad y al envejecimiento, aumenta la vida útil de las mezclas a la fatiga y disminuye el ruido. En cuanto al porcentaje óptimo de caucho granulado en las mezclas asfálticas varían de acuerdo con la forma como se añade el caucho granulado a las mezclas asfálticas, cuando es agregado al asfalto es recomendado reemplazar un 20% del peso del asfalto, cuando se agrega al agregado usar 1% a 3% del peso total del agregado y cuando se agrega a la mezcla usar 1% del total de la mezcla, asegurando una resistencia y vida útil duradera. Como aporte de la presente investigación aporta al campo de la ingeniería civil en varios niveles. No solo contribuye a la sostenibilidad al promover el reciclaje de neumáticos, sino que también mejora las propiedades del asfalto, optimiza costos y reduce la huella ambiental del sector de pavimentación. La revisión de estos temas y sus resultados puede servir como base para futuras investigaciones y proyectos de pavimentación más ecológicos y eficientes.

1.2.2 Antecedentes de mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles

Orejón (2018) en su indagación denominada “Propuesta del mejoramiento de la subrasante de pavimentos flexibles usando las geomallas biaxiales en suelos de bajo valor de Soporte California – distrito de Ahuac”, siendo el objetivo general el establecimiento de una propuesta apropiada para optimizar la subrasante de pavimentaciones flexibles empleando geomallas biaxiales en terrenos de reducido valor de Soporte California Distrito de Ahuac. La metodología resultó con tipología aplicada, de nivel Descriptivo, debido a la ejecución de una descripción técnica y económica de esas opciones de mejora de terrenos de peculiaridad antes especificada. Con respecto al diseño resulta no experimental transversal, con un grupo

poblacional integrado por la totalidad de construcciones viales de pavimento flexible en las principales vías del distrito sujeto a investigación. La tipología muestral resulta no probabilística, siendo estimado como grupo muestral las carreteras en cumplimiento del plan “Mejoramientos de pistas y veredas del distrito de Ahuac, ubicado en el Jr. Unión, del tramo de la progresiva prog: 2+560.74 – 4+188.95”. Como Conclusión Considerando las sugerencias instauradas por el MTC (2014), relativo a suelos y pavimentos, para CBR de valía 2.6% es requirente reemplazar material de 40 cm. Por el hecho de que los terrenos con las peculiaridades físicas y mecánicas analizadas se aprecian como terrenos no apropiados e inestables de reducida valía de soporte. No obstante, empleándose geomallas biaxiales MacGrid EGB 20 y MacGrid EGB 30, para CBR semejante a 2.6 % carece de alguna forma de optimización, gracias a la aportación estructural de dicha geomalla. La aportación del estudio radica en la validación técnica y ambiental del caucho en polvo como material estabilizador de subrasantes en pavimentos flexibles, contribuyendo así a resolver una problemática vial con un enfoque integral: económico, ambiental, técnico y social. La propuesta complementa y amplía los hallazgos de investigaciones anteriores como la del distrito de Ahuac, incorporando materiales reciclados en reemplazo o en combinación con tecnologías convencionales como las geomallas, lo que abre nuevas posibilidades en la ingeniería vial peruana hacia un desarrollo más sostenible.

Chávez (2018) En su investigación titulada “Diseño del pavimento flexible para la Av. Morales Duárez, de la vía expresa Línea Amarilla en la ciudad de Lima”. Tiene como objetivo principal proponer un sistema y cobertura flexible que tendrá la Avenida Morales Suárez para la vía expresa Línea Amarilla. Para este estudio la metodología AASHTO 1993 para el diseño de pavimentos flexibles y analiza las propiedades mecánicas del asfalto. A su vez estudia los parámetros necesarios para el diseño de pavimentos flexibles, como los valores de soporte de la subrasante (CBR) y el tráfico (W18), el índice de servicio

inicial y de servicio final, el nivel de confiabilidad, etc. Como conclusión la guía ASSHTO reconoce que muchas agencias no poseen los equipos para determinar el MR. Para nuestro caso, se empleó la relación CBR-MR recomendada por la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánico (MEPDG), publicada por AASHTO en julio del 2008 y acogida por el MTC en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Como aporte de la presente investigación en el diseño de pavimentos flexibles, contribuye al diseño adecuado de pavimentos flexibles, específicamente para una vía de alta circulación como la Avenida Morales Duárez, que forma parte de la Vía Expresa Línea Amarilla en Lima. A través de un análisis detallado de las características del tráfico, las condiciones climáticas y el tipo de suelo, la tesis establece parámetros clave para el diseño estructural del pavimento flexible, lo cual es crucial para asegurar la durabilidad y el rendimiento de la carretera bajo condiciones de alta demanda. Sus resultados pueden contribuir a mejorar la calidad de las infraestructuras viales en la ciudad, optimizando costos, materiales y tiempos de ejecución, al mismo tiempo que se mejora la durabilidad y funcionalidad de las vías, lo que repercute positivamente en la movilidad urbana y la calidad de vida de los ciudadanos.

Amaro y Capcha (2021) En el trabajo investigativo titulado “Diseño de pavimento flexible ambientalmente sostenible con subrasante estabilizada mediante la adición de caucho triturado según AASHTO- 93 en el tramo Kimbiri capital - Kimbiri Alto”, como propósito central buscaba valorar si adicionando caucho triturado en la estabilización de subrasante del tramo analizado, se ocasionan apropiadas condiciones para esbozar una pavimentación flexible ambientalmente sostenible de acuerdo al método AASHTO-93, la metodología de estudio resulta básica, ya que pretende aportar tanto conocimientos como sustentos hipotéticos, de nivel descriptivo porque valora el comportamiento estudiado y los componentes, cuantifica concepciones y establece variables, midiendo el concepto de la estabilización de subrasante,

mediante la definición del agente estabilizante, de la condición mecánica y el diseño de pavimentos flexibles de manera documental, de laboratorio y metodológico. igualmente, el análisis correlacional valora con una precisión más elevada y exacta esa probable correlación entre las variables de la estabilización de subrasante y la condición mecánica de la subrasante estabilizada, la estructura del pavimento flexible y la condición ambientalmente sostenible, lo que hace que posea un valor explicativo parcial. Correspondientemente, la indagación cuantitativa resulta objetiva, secuencial y probatoria, dicho de otra forma, tiene sustento en la cuantificación numérica y aplicación de procesos estadísticos a modo de dar solución a una situación problemática delimitada y específica, mediante un control inexorable del proceso. Como conclusión adicionar caucho triturado en el área analizada, ocasiona apropiadas condiciones para esbozar una pavimentación ambientalmente sostenible de acuerdo al método AASHTO-93; de forma concreta, apropiado estado mecánico conectado a la relación de soporte CBR; apropiado estado de diseño, asociado a la merma del espesor estructural de la pavimentación flexible esbozada, así como adecuado estado ambiental comparándose con la estabilización acostumbrada por reemplazo, coherente a la ausencia de aplicación o economía de material de cantera por medio de la estabilización de subrasante por añadidura de caucho triturado, como aporte del estudio fortalece ese paradigma de sostenibilidad dentro del área de ingeniería vial, al demostrar que los residuos de caucho pueden ser reinsertados en el ciclo productivo como materiales alternativos eficientes, tanto desde la perspectiva estructural como ambiental. Además, contribuyen al desarrollo de tecnologías apropiadas para contextos rurales o de difícil acceso, donde la disponibilidad de materiales convencionales suele ser limitada.

García y Jara (2024) En su trabajo investigativo titulado “Análisis y diseño estructural del pavimento flexible para mejorar la transitabilidad en el tramo de la carretera la Coipa – Tamborapa, del Departamento de Cajamarca”, su propósito general fue realizar un análisis de la condición superficial del pavimento flexible, a modo de hacer el planteamiento de un diseño

estructural innovador para optimizar el tránsito por el tramo analizado. La metodología investigativa resulta básica, no experimental, descriptiva, analizándose un grupo poblacional integrado por la pavimentación flexible de la carretera La Coipa -Tamborapa, con un universo muestral conformado por 3 kilómetros desde el progresivo km 8+000 – km 11+000, gracias a su requerimiento de cambiarse la totalidad de la estructura pavimentar presente. La conclusión dada fue en el trayecto analizado, el más elevado índice de afectación de fallas lo representan mayormente los baches, seguido del ahuellamiento, desprendimiento de agregados, exudación y otros organizados de forma descendente. El recorrido de mayor atención crítica se encuentra en las progresivas Km 8+000 hasta Km 11+000, mostrando la cuantía más alta de fallas con un rigor alto; consecuentemente, fue realizada una demarcación con miras de dar solución al inconveniente de tránsito en el lapso de dicho trecho. Como aporte de la presente investigación desde una perspectiva complementaria, al centrar su propuesta en la mejora de la transitabilidad mediante el diseño estructural detallado del pavimento flexible. Si bien esta investigación no incluyó materiales reciclados como parte de la estabilización de la subrasante, su análisis técnico es fundamental para comprender la interacción entre las capas estructurales de la pavimentación y su comportamiento ante el tránsito, factores indispensables en cualquier propuesta que busque garantizar la durabilidad del sistema vial.

Soberón (2023) En el compendio investigativo denominado “Diseño del pavimento para el mejoramiento de la transitabilidad vehicular del pueblo joven Diego Ferré, distrito y provincia de Chiclayo, región Lambayeque”, su objetivo general fue la ejecución del estudio de topografía del proyecto. La metodología de investigación presenta un diseño descriptivo con fin aplicativa, en el diseño de la investigación, se hará uno de una investigación por objetivos. La conclusión se tiene en cuenta que con el conteo vehicular dependiendo del sentido en el carril, el factor direccional para la estimación del Esal es 0.55, asimismo, los elementos de eje equivalente tienen influencia según la tipología de la pavimentación, arrojando que dicho

índice obtenido en la pavimentación flexible resulta 490761.946, siendo inferior al de la pavimentación rígida de 560728.447 Como aporte de la presente investigación contribuyen a una visión más amplia sobre el mejoramiento vial en el Perú, demostrando que tanto en contextos urbanos como rurales, el esbozo de la pavimentación requiere tener presente esas particularidades del terreno, la disponibilidad de materiales, y los criterios de sostenibilidad para lograr una infraestructura duradera, eficiente y alineada con los objetivos de desarrollo.

1.3 Objetivos

-Objetivo General

Evaluar el uso de caucho en polvo como alternativa para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles.

-Objetivos Específicos

-Objetivo Específico 1: Determinar el comportamiento del CBR en la subrasante mejorada con caucho en polvo de pavimento flexible.

-Objetivo Específico 2: Determinar en qué medida el uso del caucho en polvo reducirá los espesores el diseño de pavimento flexible.

-Objetivo Específico 3: Determinar la influencia del uso de caucho en polvo en los costos del diseño de pavimento flexible.

1.4 Justificación

Las investigaciones actuales se centran en el uso de caucho reciclado en combinación con piedra y cemento asfáltico para obtener mezclas modificadas térmicamente capaces de aumentar la resistencia a altos volúmenes de tránsito según la construcción. Los resultados nos permitirán proponer diseños apropiados para evitar el deterioro de los pavimentos asfálticos y pueden ser utilizados en la construcción de

carreteras para reducir el tráfico de vehículos pesados en horas pico y beneficiar a nuestra sociedad.

Investigaciones futuras modificarán la mezcla asfáltica añadiendo caucho, lo que mejorará su rendimiento y alargará el tiempo de mantenimiento en carretera, reduciendo la contaminación ambiental provocada por la quema de neumáticos.

Viendo los problemas en el área de Ultupuquio, emprendí este estudio con el fin de brindar al público una fuente de información que pudiera usarse en la construcción de carreteras y extender su vida será ayudado por el polvo de caucho, al realizar un adecuado diseño aplicando un programa en el cálculo de la estructura del pavimento con datos obtenido en campo como IMD los adecuados estudios de suelo; Finalmente, proponemos explorar materiales que tengan un resultado verdadero en la mejoría de las cualidades de lo resistente a la compresión del concreto, donde planteamos la siguiente investigación: **“USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES”**.

1.5 Hipótesis

- Hipótesis General

El uso de caucho en polvo como material alternativo mejora significativamente la subrasante en el diseño de pavimentos flexibles.

-Hipótesis Específicas

-Hipótesis Específica 1: El uso del caucho en polvo incrementará el comportamiento del CBR del pavimento flexible.

-Hipótesis Específica 2: El uso del caucho en polvo reducirá los espesores del diseño del pavimento flexible.

-Hipótesis Específica 3. El uso del caucho en polvo reducirá en los costos del diseño del pavimento flexible.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

El uso del caucho en polvo en el esbozo de pavimentaciones flexibles representó un enfoque innovador y sostenible que permitió mejorar las características estructurales de los pavimentos en contextos geográficos adversos, especialmente en zonas rurales de altura donde la durabilidad, las condiciones climáticas y la escasez de materiales convencionales se presentaban como desafíos técnicos importantes. Este planteamiento cobró especial relevancia en el espacio de Ultupuquio, un entorno donde las condiciones geográficas extremas y la necesidad de una infraestructura vial eficiente se vinculaban directamente con el avance colectivo y financiero comunitario.

Diversas investigaciones respaldaron dar entrada al caucho reciclado en compuestos asfálticos debido a sus características mecánicas superiores en comparación con otras alternativas reciclables. En particular, se demostró que el caucho en polvo, obtenido de neumáticos fuera de uso, confería a la mezcla asfáltica una mayor elasticidad, mejor resistencia al agrietamiento por fatiga y una notable reducción en las deformaciones permanentes. Estudios como el de Dinesh y Kirubakaran (2019) evidenciaron que las mezclas reformadas con caucho presentaban una actuación más favorable ante la carga cíclica, lo que se tradujo en una vida útil más prolongada del pavimento. Por su parte, Hoyos et al. (2021) destacaron que las cuantías porcentuales óptimas de caucho reciclado en el hormigón asfáltico cambian en un rango de 1% - 20% en peso de totalidad. Igualmente, emplear caucho reciclado da una aportación de distintos beneficios a dicho compuesto siendo: resistencia a la tracción no directa, a la susceptibilidad, a la humedad, a la aparición de surcos, a la filtración y al envejecimiento; eleva la existencia útil de dichas mezclas a la fatiga, reduciendo el ruido.

A pesar de que existieron otros materiales reciclados como el plástico y los residuos orgánicos que también fueron considerados en investigaciones como Mukhtar y Cascada

(2021), La incorporación de residuos plásticos mezclados con suelo ha mostrado ciertos avances en cuanto al aumento de la resistencia del material; no obstante, su eficacia aún no ha sido completamente estudiada en relación con los diversos tipos y formas de plásticos reciclados aplicados sobre subrasantes naturales en el ámbito de la ingeniería vial, su desempeño no alcanzó los estándares estructurales ni la estabilidad del caucho reciclado. El plástico reciclado, por ejemplo, fue utilizado en diversas experiencias para reforzar mezclas asfálticas. Sin embargo, los resultados fueron limitados debido a la incompatibilidad térmica entre los polímeros plásticos y el ligante asfáltico convencional, lo que concluyeron que:

Los desarrollos recientes y la viabilidad de utilizar residuos plásticos como modificadores o aditivos para ligantes asfálticos o mezclas asfálticas en procesos secos y húmedos, centrándose en los diferentes materiales de los flujos de residuos, cómo producir dichos materiales modificados y las características del asfalto modificado con residuos plásticos, contribuyendo así al manejo sustentable de los recursos, así como la generación de materiales de pavimentación útiles. (Lingyun et al., 2022, p.743)

En cuanto al uso de componentes orgánicos, como fibras vegetales (cáscaras de arroz, bagazo de caña o fibras de coco), si bien algunas investigaciones reportaron mejoras en ciertas propiedades mecánicas, estas soluciones requirieron procesos de tratamiento y estabilización más complejos, Alfonso et al. (2015) señalaron:

El propósito de evaluar la melaza de caña a modo de estabilizante alternativo para la red terciaria; el despliegue tecnología innovadora y bienes eco amigables, tal como lo representa el mencionado producto basado en recursos orgánicos, siendo una formulación líquida natural no peligrosa de enzimas, optimizante de las características del terreno y que tiene la posibilidad de hallarse en abundancia para su disposición y manufactura. Empleando aditivo orgánico es posible descartar o mermar la utilización de triturados de elevados costos, puesto que permite mejorar la calidad de los suelos

locales conservando los números estructurales de la AASHTO requerentes para el aseguramiento del desempeño de la vía durante su existencia útil. Asimismo, son mermados aquellos costes referidos a mantenimiento de estas, debido al incremento de la capacidad portante de la base y subbase, el aditivo orgánico eleva esas densidades de compactación, disminuye la filtración del agua, así como el estado erosionante y pérdida de finos, favorece el incremento de la resistencia y estabilidad de la base y la disminución de porosidad al agua, permitiendo ello incrementar elocuentemente el uso y existencia de la dispendiosa capa de rodadura. (p. 10)

En contraste, el caucho en polvo ofreció un balance adecuado entre sostenibilidad ambiental y desempeño técnico, Casimiro y Melgarejo (2022) señalan:

El comportamiento de suelos cohesivos al ser estabilizados con caucho granulado como agente modificador, los logros de la experimentación mostraron que el valor del Límite de Contracción tendió a incrementarse conforme se aumentaba la proporción de caucho incorporado. Sin embargo, en concordancia a la Máxima Densidad Seca, se observó que esta alcanzó su punto más alto cuando el suelo se encontraba en su estado natural, disminuyendo progresivamente al tiempo que era adicionado caucho granulado a la mezcla. (p. i)

Por otro lado, al analizar el Índice CBR en condiciones remojadas que simulan un escenario crítico para el rendimiento estructural del hormigón se registró cierta merma de la capacidad de soporte de la superficie gracias a la inclusión del caucho. Esta pérdida de resistencia implicó que las peculiaridades físicas-mecánicas del material no mejoraran sustancialmente, ya que no llegaron a cumplir con las valías mínimas pedidas por el Manual de Carreteras (MC-05-14) para calificar como una subrasante adecuada en obras viales. En este sentido, su implementación en Ultupuquio no solo respondió a criterios de ingeniería, sino también a una decisión estratégica de carácter ambiental y económico.

Por todo lo anterior, el caucho en polvo fue seleccionado como el aditivo más adecuado frente a otras opciones reciclables. Su comportamiento estructural en condiciones climáticas adversas, su contribución a la economía circular y su disponibilidad en el mercado nacional justificaron plenamente su elección como base de este estudio.

2.1.1 Definición y función de los pavimentos

El pavimento se describe como una estructura compuesta por distintos materiales, cuya función principal consistió en revestir la superficie de las vías o caminos:

El propósito de proporcionar una capa estable, resistente y duradera que facilitara el tránsito seguro de vehículos y peatones. A lo largo del tiempo, se emplearon diversos materiales en su construcción, tales como concreto, asfalto y adoquines, entre otros. Según su composición y comportamiento estructural, los pavimentos se clasificaron generalmente en dos grandes tipos: pavimentos rígidos, conformados por losas de concreto, y pavimentos flexibles, constituidos principalmente por mezclas asfálticas. (Ing. Vías, 2020).

2.1.1.1 Definición de pavimento flexible. Se trató de un armazón conformado por una capa de asfalto elaborada a partir de una mezcla bituminosa en caliente, la cual se aplicó sobre una base y sub-base conformadas por materiales granulares, En lo referente a este tipo de pavimento:

Se caracterizó por contar con una capa superior de mezcla asfáltica apoyada directamente sobre materiales granulares cuya calidad disminuyó progresivamente en profundidad, acercándose a la subrasante. Esta degradación gradual de los materiales se explicó tanto por razones técnicas como económicas, ya que el esfuerzo inducido por las cargas vehiculares tendió a reducirse conforme se alejaba de la superficie, lo que permitió utilizar materiales de menor calidad en las capas inferiores sin comprometer significativamente el desempeño estructural del pavimento. (Chávez , 2018, p.17).

2.1.1.2 Diseño de Pavimentos Flexibles. Según (MTC, 2014) señala:

Para el dimensionado de las secciones de pavimento tuvo aplicación los métodos de diseño con más empleo en la nación. En particular, se emplearon dos enfoques principales: el método AASHTO 1993 (Guide for Design of Pavement Structures) y el análisis del comportamiento o performance del pavimento durante su ciclo de vida. El diseño estructural de las pavimentaciones flexibles se fundamentó esencialmente en dos parámetros clave: las cargas vehiculares aplicadas sobre la estructura y las características de la subrasante, la cual constituyó el soporte esencial del sistema estructural. (p .16)

La forma en que estos factores se incorporaron al cálculo dependió directamente de la metodología de diseño seleccionada. Las cargas vehiculares se expresaron en términos de Ejes Equivalentes Simples de 8.2 toneladas (ESALs o EE), una unidad que representó el efecto acumulado del tránsito sobre el pavimento durante su vida útil. El total acumulado de estos ejes, denominado W18 o ESALD, se utilizó como un indicador fundamental para definir la capacidad estructural requerida en lo referente a pavimento.

El manual de diseño del MTC clasificó las pavimentaciones flexibles en tres categorías, basadas en el número proyectado de ejes equivalentes acumulados durante el lapso del esbozo. Una de estas categorías correspondió a caminos con un tránsito estimado entre 75,000 y 1'000,000 ejes equivalentes, lo cual determinó los criterios mínimos de exigencia estructural que debía cumplir la sección de pavimento para garantizar su adecuado desempeño en condiciones reales de operación.

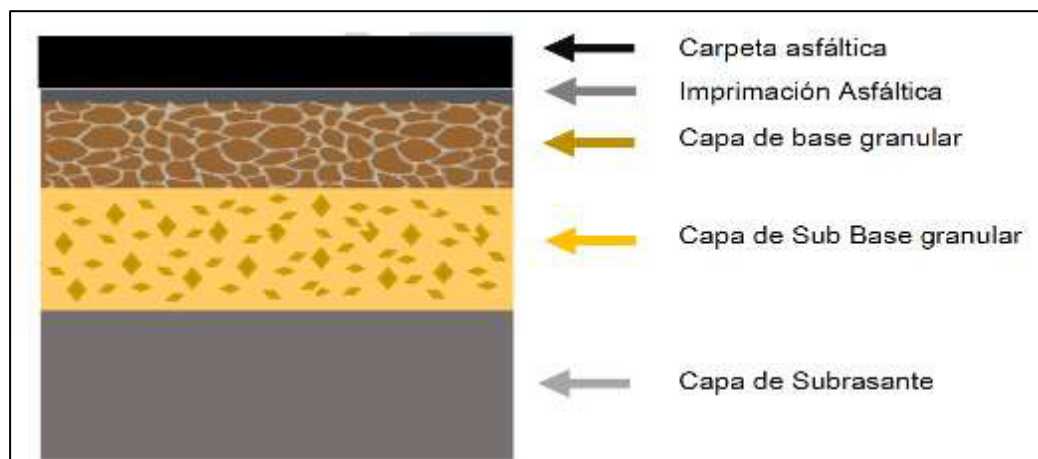
2.1.1.3 Estructura del Pavimento Flexible. La vía es una conformación formada por estratos de diversos grosores que se compactan para proporcionar lo resistente a la capa de rodaje.

Según Giraldo et al. (2012) sostienen “Estos estratos vienen a ser la capa de asfalto, la capa base y el sustrato granular, que constan de diferentes espesores. (p. 22).

Al tiempo Céspedes (2022), manifiesta que “Una pavimentación flexible se trata de una conformación que descansa sobre una base o subbase y consta de diferentes capas, a saber, la base, la subbase y la capa asfáltica” (p. 19).

Figura 2

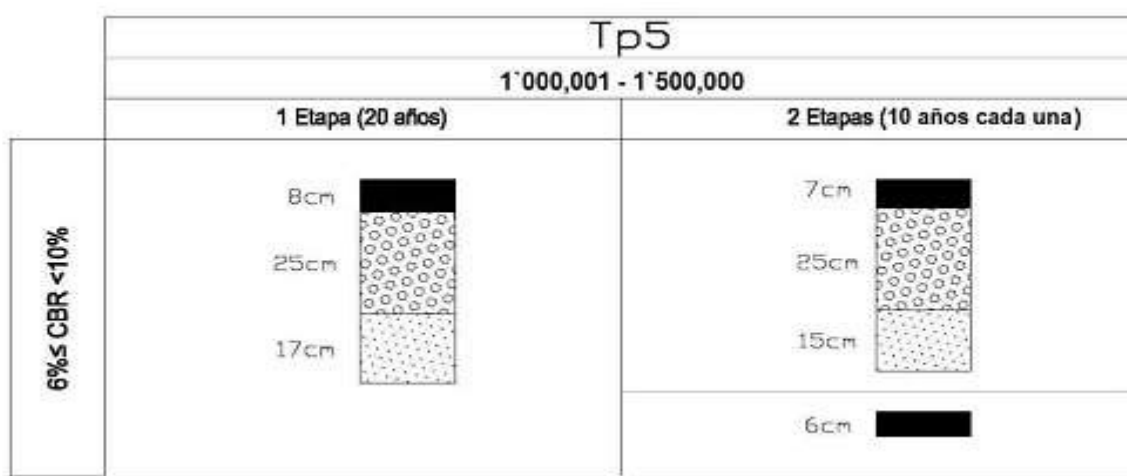
Composición del pavimento flexible



Nota. Representación estructural de las capas del pavimento flexible. Adaptado de *Diseño de pavimento flexible con adición parcial de caucho*, adaptado por Salcedo y Santi. (2022).

Figura 3

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $6\% \leq CBR < 10\%$



Nota. Estructura de pavimento para período de diseño de 10 y 20 años. adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014)

A. Diseño en una sola etapa (2 décadas de durabilidad). Esta opción contempla la construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas:

- Capa de rodadura: 8 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 25 cm de espesor.
- Sub-base granular: 17 cm de espesor.

B. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

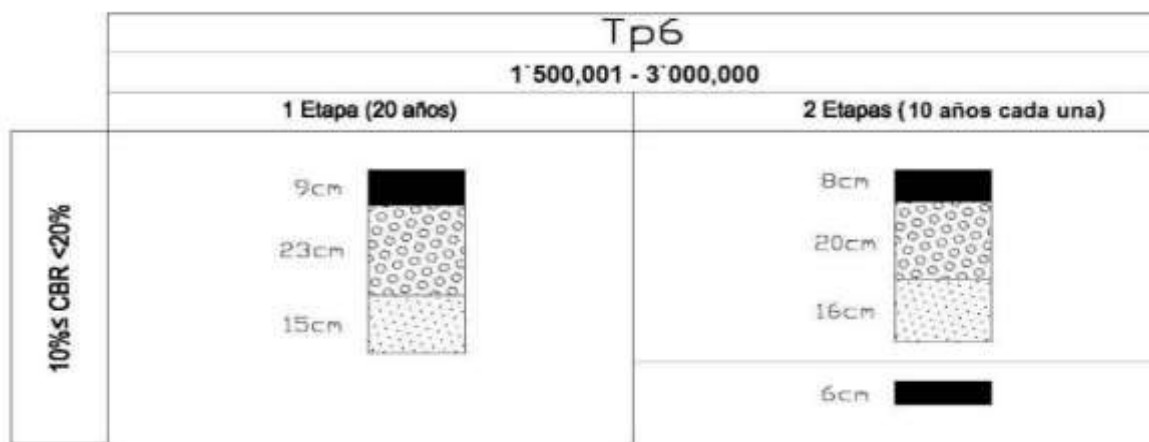
- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 7 cm de mezcla asfáltica.
 - Base granular: 25 cm.
 - Sub-base granular: 15 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Ambos esquemas estructurales han sido formulados para condiciones de subrasante de baja capacidad portante (CBR entre 6% y 10%), lo que exige un diseño que garantice una

distribución eficiente de las cargas y una adecuada durabilidad frente al volumen de tránsito vehicular estimado.

Figura 4:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $10\% \leq \text{CBR} < 20\%$



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($10\% \leq \text{CBR} < 20\%$). adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014)

C. Diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, como sigue:

- Capa de rodadura: 9 cm de mezclan de asfalto en caliente.
- Base granular: 23 cm de espesor.
- Sub-base granular: 15 cm de espesor.

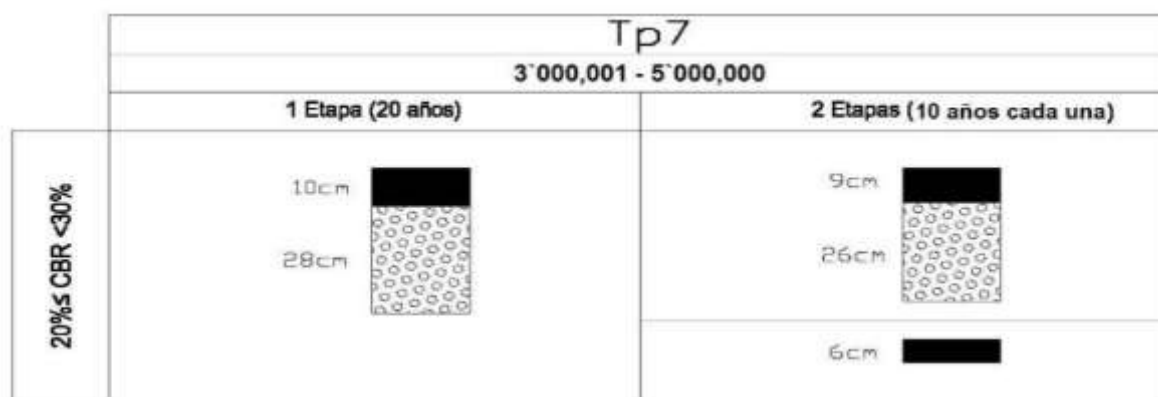
D. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 8 cm de mezcla de asfalto.
 - Base granular: 20 cm.

- Sub-base granular: 16 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 5:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $20\% \leq CBR < 30\%$.



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($20\% \leq CBR < 30\%$), adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014)

E. El esbozo en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, como sigue:

- Capa de rodadura: 10 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 28 cm de espesor.

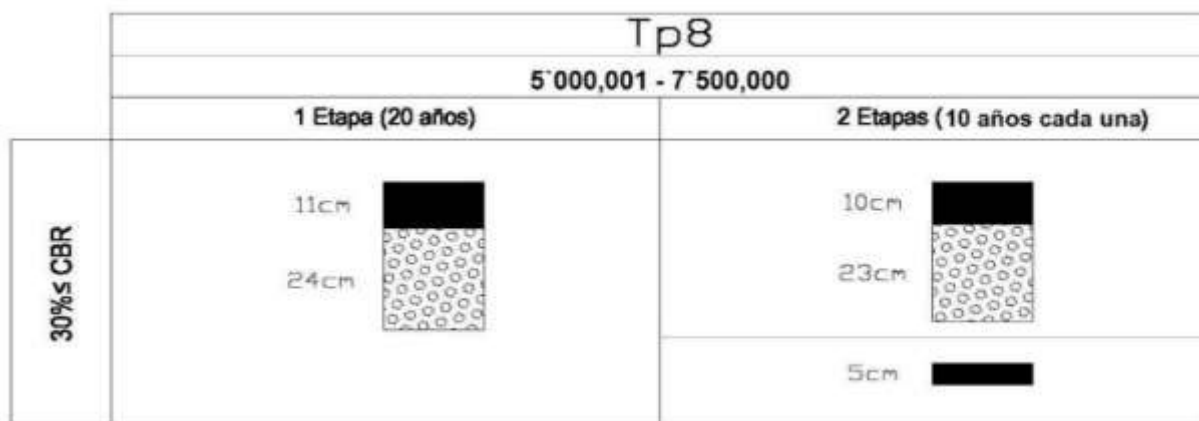
F. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 9 cm de mezcla asfáltica.
 - Base granular: 26 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):

- Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 6:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $30\% \leq \text{CBR}$



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($\text{CBR} \geq 30\%$). adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

G. El diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas que siguen:

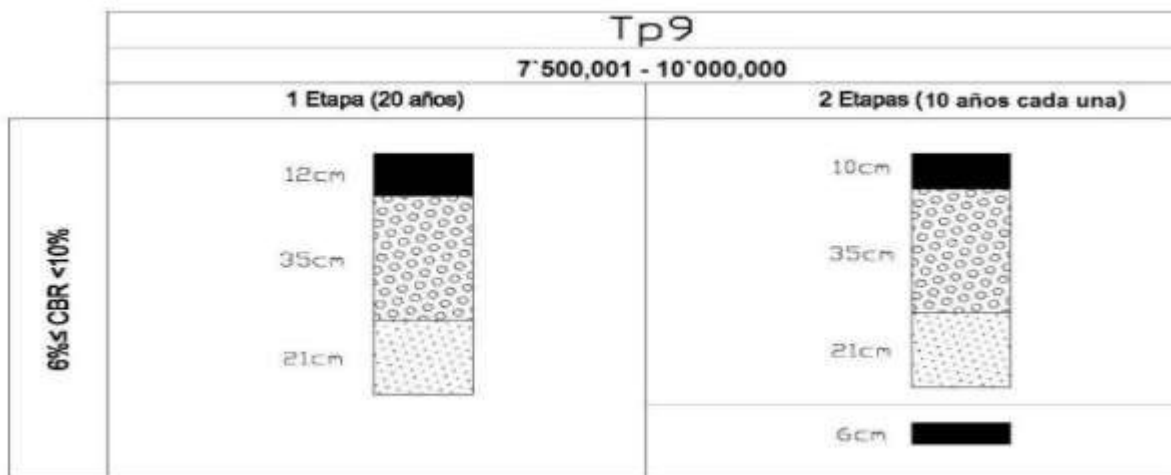
- Capa de rodadura: 11 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 24 cm de espesor.

H. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 10 cm de mezcla asfáltica.
 - Base granular: 23 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 5 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 7:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $6\% \leq \text{CBR} < 10\%$



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($6\% \leq \text{CBR} < 10\%$). adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

I. El diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas que siguen:

- Capa de rodadura: 12 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 35 cm de espesor.
- Sub-base granular: 21 cm de espesor.

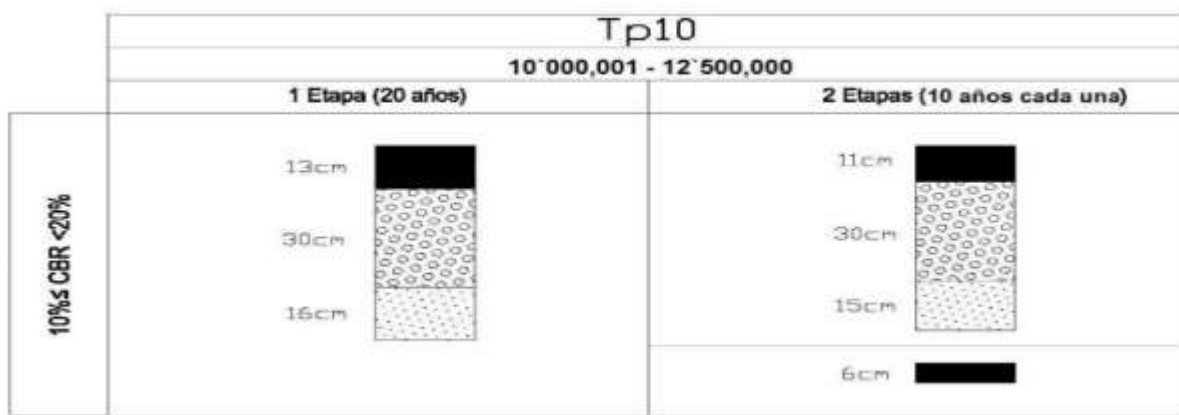
J. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 10 cm de compuesto asfáltico.
 - Base granular: 35 cm.
 - Sub-base granular: 21 cm.

- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 8:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $10\% \leq \text{CBR} < 20\%$



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($10\% \leq \text{CBR} < 20\%$). adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

K. El diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas que siguen:

- Capa de rodadura: 13 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 30 cm de espesor.
- Sub-base granular: 16 cm de espesor.

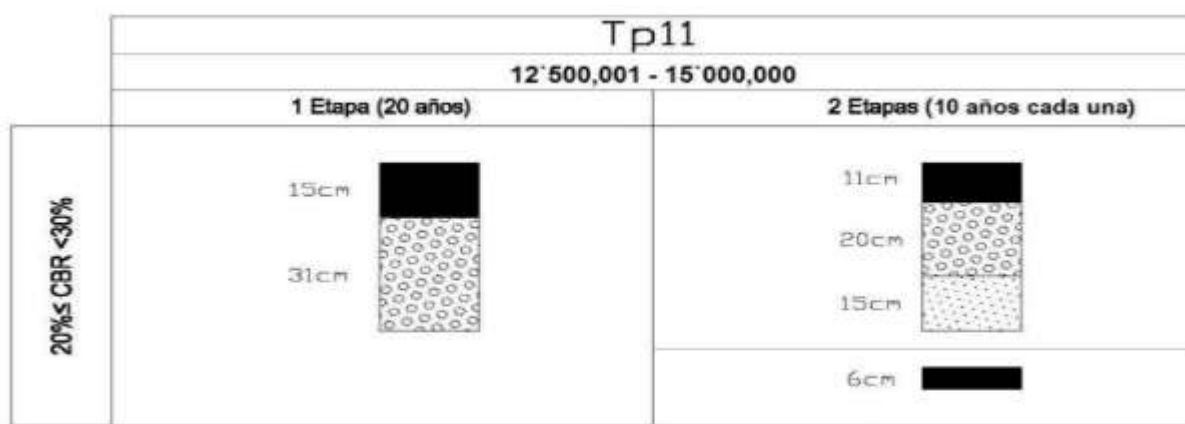
L. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 11 cm de mezcla asfáltica.
 - Base granular: 30 cm.

- Sub-base granular: 15 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 9:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $20\% \leq CBR < 30\%$.



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($20\% \leq CBR < 30\%$). Adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

M. El diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla la construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas que siguen:

- Capa de rodadura: 15 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 31 cm de espesor.

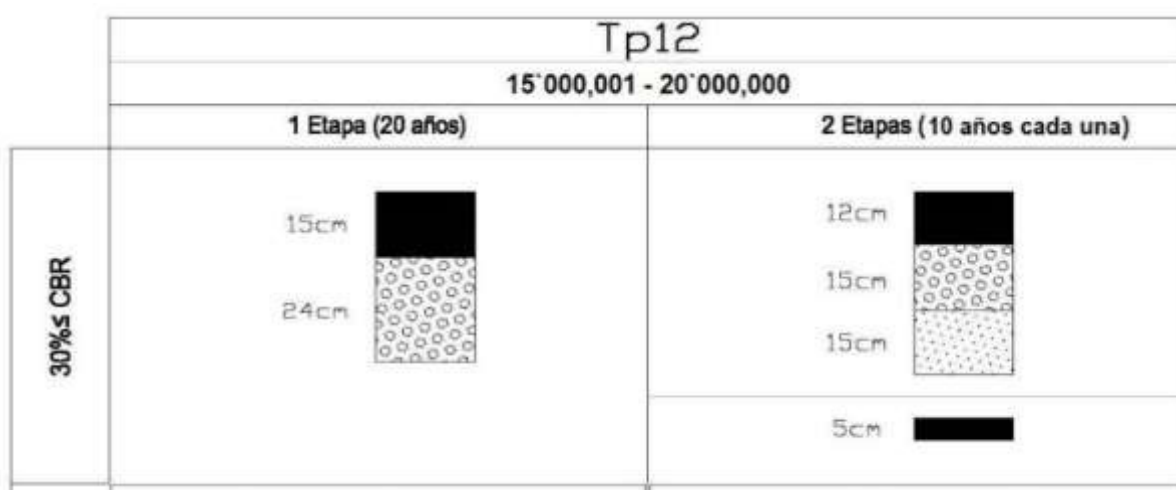
N. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 11 cm de mezcla asfáltica.
 - Base granular: 20 cm.

- Sub-base granular: 15 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 10:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $30\% \leq \text{CBR}$.



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($\text{CBR} \geq 30\%$). Adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

O. El diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas que siguen:

- Capa de rodadura: 15 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 24 cm de espesor.

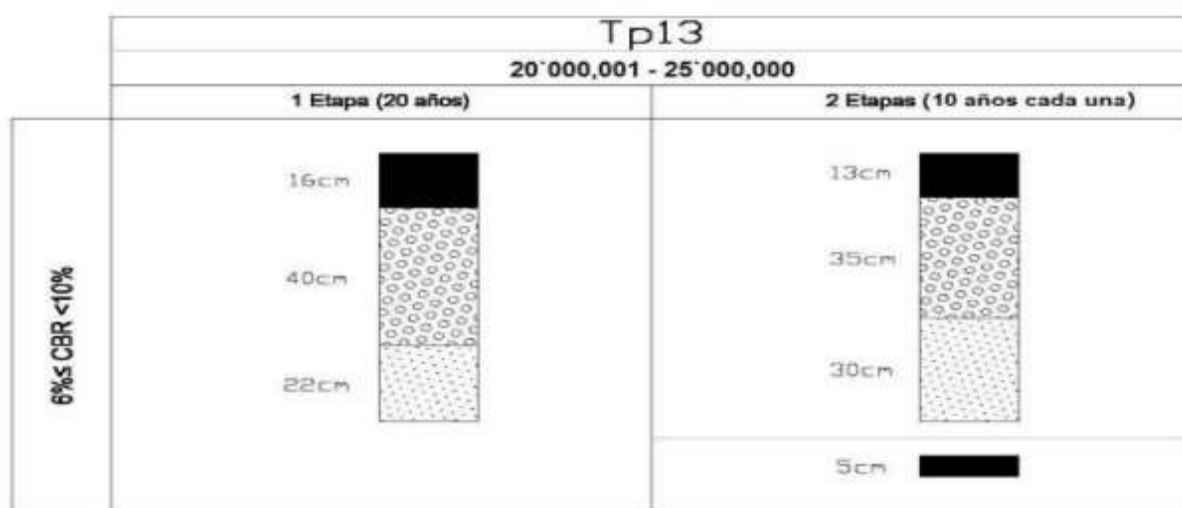
P. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 12 cm de mezcla asfáltica.

- Base granular: 15 cm.
- Sub-base granular: 15 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 5 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 11:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $6\% \leq \text{CBR} < 10\%$



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($6\% \leq \text{CBR} < 10\%$). Adaptado por Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos por MTC (2014).

Q. El diseño en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, como sigue:

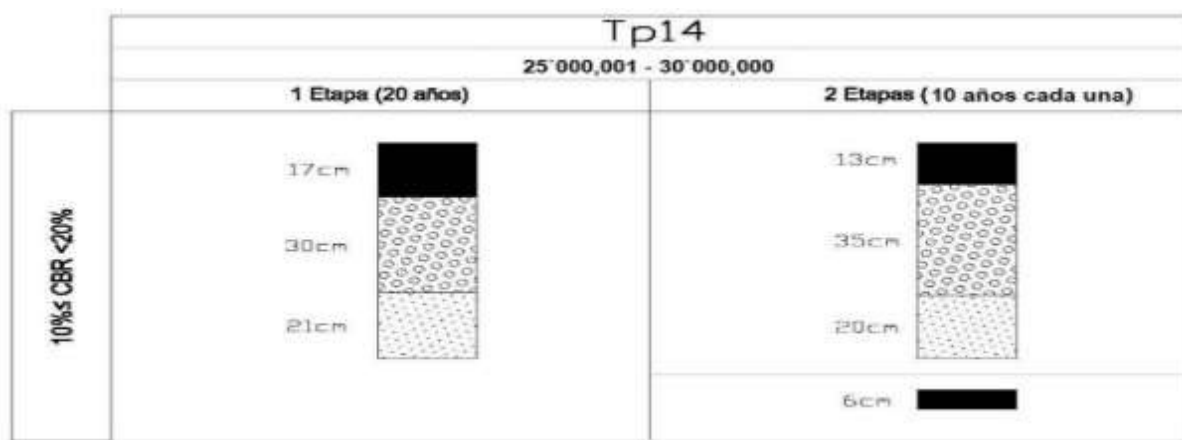
- Capa de rodadura: 16 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 40 cm de espesor.
- Sub-base granular: 22 cm de espesor.

R. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 13 cm de compuesto asfáltico.
 - Base granular: 35 cm.
 - Sub-base granular: 30 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 5 cm adicionales de mezcla asfáltica.

Figura 12:

Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente periodo de diseño 20 años y 10 años $10\% \leq CBR < 20\%$



Nota. Estructura de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente para un período de diseño de 20 años y 10 años ($10\% \leq CBR < 20\%$). Adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

S. El esbozo en una sola etapa (dos décadas de durabilidad). Esta opción contempla una construcción completa del paquete estructural desde el inicio, con las capas:

- Capa de rodadura: 17 cm de mezcla de asfalto en caliente.
- Base granular: 30 cm de espesor.
- Sub-base granular: 21 cm de espesor.

T. Diseño en dos etapas (10 años cada una). Esta modalidad plantea una construcción escalonada, en dos periodos de servicio, con una intervención intermedia:

- Primera etapa:
 - Capa de rodadura inicial: 13 cm de mezcla asfáltica.
 - Base granular: 35 cm.
 - Sub-base granular: 20 cm.
- Segunda etapa (refuerzo a los 10 años):
 - Capa de refuerzo: 6 cm adicionales de mezcla asfáltica.

El catálogo de grosores de capa asfáltica contemplaba un área crítica en la cual los espesores requeridos superaban los 150 mm y las deflexiones registradas eran elevadas. En tales casos, se recomendaba la ejecución de un estudio especial que incluyera, como parte fundamental, la apertura de calicatas, así como una extracción de ejemplares representativos de los materiales presentes tanto en las capas constituyentes como en el suelo de fundación. Estas muestras debían tener sometimiento a pruebas de laboratorio a modo de evaluar sus características física-mecánicas, y era procedido además a la verificación de espesores, grados de compactación, contenidos de humedad, entre otros aspectos técnicos relevantes.

Durante el proceso de refuerzo de pavimentos, solían presentarse diversos problemas constructivos que requerían una evaluación detallada para poder definir la solución más adecuada según el contexto específico. Por ejemplo, el mantenimiento del tránsito vehicular en el transcurso del desempeño de las obras bajo contextos admisibles podía influir directamente en la selección del tipo de refuerzo a aplicar. En aquellos casos donde el pavimento presentaba deformaciones significativas, se hacía necesario realizar un fresado o perfilado previo a la colocación del refuerzo, el cual podía incluir una capa inicial nivelante.

Asimismo, ese incremento en el grosor de la vía generaba una pendiente respecto a las bermas laterales, lo cual exigía su correspondiente adecuación por razones de seguridad vial. Tal como se indicaba en el apartado correspondiente a la renovación superficial, era

indispensable reparar previamente la capa existente antes de proceder con la aplicación del refuerzo.

También se debía considerar el riesgo de reflexión de fisuras, evaluando las medidas necesarias para atenuar su aparición. Otro aspecto técnico relevante era la mejora del sistema de drenaje, cuya eficiencia podía verse comprometida con las nuevas condiciones del pavimento. A ello se sumaban posibles ajustes en los trabajos de ensanche, correcciones menores de trazado y adecuaciones en las bermas.

Para las pavimentaciones flexibles, no era considerado el uso de subbase sin tratamiento como solución de refuerzo. Sin embargo, el ingeniero proyectista tenía la facultad de proponer alternativas distintas, como el refuerzo mediante la incorporación de pavimentación de hormigón hidráulico. A este respecto, era considerado que la pavimentación flexible existente cumpliría esa función de base para la nueva estructura, lo cual requería una preparación previa que incluyera evaluaciones y ajustes específicos antes de su implementación.

Cuando fue necesario, se llevaron a cabo intervenciones para mejorar la red de saneamiento existente, buscando garantizar una adecuada actuación hidráulica de la pavimentación. Asimismo, se realizaron reparaciones localizadas en aquellas zonas donde la estructura presentaba fallas evidentes. En casos específicos, también se procedió a ejecutar trabajos de ensanche tanto de la calzada como de las bermas, con el objetivo de adecuar la vía a las nuevas condiciones geométricas.

Previo a la colocación del refuerzo estructural, se efectuó un barrido exhaustivo del terreno asfáltico coexistente, con el fin de eliminar residuos y asegurar una adecuada adherencia. Dependiendo del estado de la carpeta, se optó por aplicar una capa de nivelación con compuesto asfáltico o con base cementada. En su defecto, se recurrió al fresado de la capa asfáltica para corregir irregularidades y deformaciones superficiales.

Como resultado de estas acciones, dicho terreno debió estar homogéneo, estable además con las condiciones necesarias para funcionar como base estructural de la nueva pavimentación de hormigón hidráulico. Finalmente, el grosor del refuerzo rígido fue determinado considerando un lapso mínimo de esbozo de dos décadas, conforme a los criterios técnicos vigentes.

Figura 13:

Refuerzo de pavimento flexible Tp0 a Tp7

DC (Km. por hora)	EE	Tp0 75,001-150,000	Tp1 150,001-300,000	Tp2 300,001-500,000	Tp3 500,001-750,000	Tp4 750,001-1'000,000	Tp5 1'000,001-1'500,000	Tp6 1'500,001-3'000,000	Tp7 3'000,001-5'000,000
≤ 20									
20-40									
40-60		RENOVACION SUPERFICIAL MEDIANTE SELLOS ASFALTICOS O MORTEROS ASFALTICOS							
60-80								Micropavimento e=25mm	Micropavimento e=25mm
80-100							Micropavimento e=25mm	Asf. 10cm	Asf. 10cm
100-120					Micropavimento e=25mm	Micropavimento e=25mm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm
120-140			Micropavimento e=25mm	Micropavimento e=25mm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm
140-160			Micropavimento e=25mm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm
160-180		Micropavimento e=25mm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm
180-200		Micropavimento e=25mm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	Asf. 10cm	ESTUDIO ESPECIAL

Refuerzo con Capote Asfáltico en Caliente (CAAC)

Nota. Rango de Tráfico en Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes en el carril y lapso de diseño Adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

Las evaluaciones superficiales de la pavimentación: Inventario de Condición, es ejecutado mínimo en una oportunidad anual; Y Rugosidad, como mínimo una valoración cada dos periodos anuales. Evaluaciones Estructurales del pavimento: Deflexiones, tendrán una estimación por lo menos cada cuatro periodos anuales. Refuerzo con Mezcla Asfáltica en

Caliente, dispuesto previo resarcimiento de rajaduras, hendeduras, socavones, fresado y/o disposición de capa nivelante.

Figura14:

Refuerzo de pavimento flexible Tp8 a Tp14

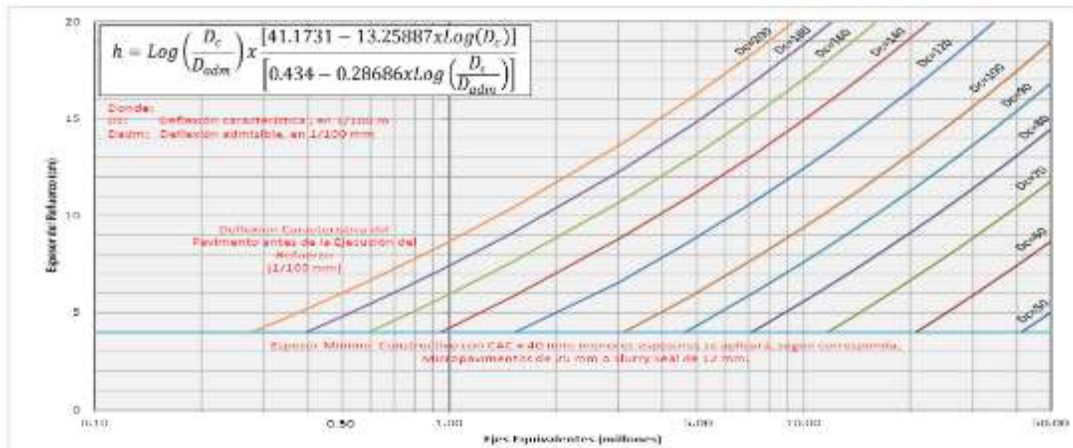
DC (km/h)	EE	Tp8 5000,001-7500,000	Tp9 7500,001-10000,000	Tp10 10000,001-12500,000	Tp11 12500,001-15000,000	Tp12 15000,001-20000,000	Tp13 20000,001-25000,000	Tp14 25000,001-30000,000
4-20		RENOVACIÓN SUPERFICIAL MEDIANTE SELLOS ASFÁLTICOS O MORTEROS ASFÁLTICOS						
20-40								
40-60			Mezcla asfáltica e=25mm	Mezcla asfáltica e=25mm	Mezcla asfáltica e=25mm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm
60-80		FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm
80-100		FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	
100-120		FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm	FCM 10cm			
120-140		FCM 10cm	FCM 10cm					
140-160				ESTUDIO ESPECIAL				
160-180								
180-200								

Nota. Rango de Tráfico en Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes en el carril y período de diseño. Evaluaciones superficiales del pavimento Adaptado por *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos* por MTC (2014).

El Inventario de Condición, será ejecutada mínimo en una oportunidad anual; Y Rugosidad, mínimo una estimación cada dos periodos anuales. Evaluaciones Estructurales del pavimento: Deflexiones, serán ejecutadas mínimo cada cuatro periodos anuales. Refuerzo con Mezcla Asfáltica en Caliente, dispuesto previo resarcimiento de rendijas, grietas, socavones, fresado y/o disposición de capa nivelante.

Figura15:

Abaco para el cálculo de espesores de refuerzo en carpeta asfáltica.



Nota. Ábaco para el cálculo de espesores de refuerzo en carpeta asfáltica. Adaptado por “Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” por MTC (2014).

Base

Capa debajo de la capa asfáltica, que tiene a su cargo el soporte de las mayores cargas en función de la tipología de tráfico, dicha capa tendrá un tratamiento o modificación a miras de incrementar su resistencia a la distorsión.

Subbase

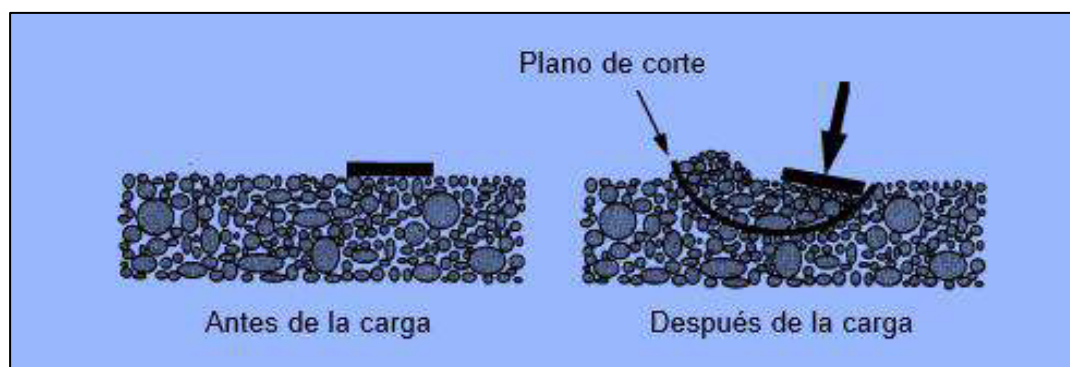
Es colocada sobre la base de la carretera y tiene como función destacada fundar una capa de soporte semejante e indestructible.

Subrasante

Tiene que estar elaborada de un recurso homogéneo y de fácil procesamiento para lograr al menos un 95% de sellado, asegurando así la estabilidad de la capa superior.

Agregados pétreos

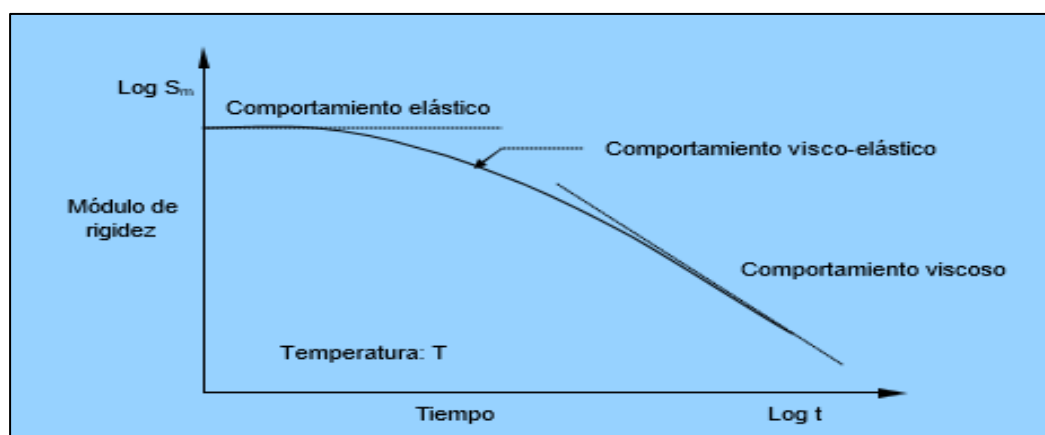
Son materiales provenientes de rocas que están listos para su uso casi sin deformación alguna, generalmente son hallados con forma de macizos rocosos o sedimentos sueltos que contienen fragmentos de diferentes tamaños (arena y grava). A menudo naturales, aunque a veces tratados o fabricados, proceden de la piedra o tienen propiedades similares a la piedra, siendo empleados con cuasi exclusividad dentro del ámbito de la construcción.

Figura16:*Agregados pétreos*

Nota. La figura muestra el comportamiento mecánico de los agregados pétreos antes y después de la aplicación de carga, evidenciando la deformación y reorganización de las partículas bajo esfuerzo. Adaptado de “Evaluación de la resistencia a la fatiga en Mezclas Asfálticas, 2013”, por (p. 08) por (García, 2013).

U. Comportamiento de mezclas asfálticas. Según Bobadilla et al. (2022) considera que "Es muy importante realizar pruebas de laboratorio para obtener un buen diseño de pavimento" (p. 101)

Es muy importante utilizar un buen material en la mezcla asfáltica, porque esto asegura buenos resultados en las pruebas de laboratorio y la posibilidad de obtener una buena estructura del pavimento.

Figura 17:*Índice de Plasticidad*

Nota. El índice de plasticidad representa el comportamiento del material (elástico, viscoelástico y viscoso) en función del tiempo y la temperatura. Adaptado de “Caucho reciclado en comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en el Distrito de Yanahuanca Provincia de Daniel Alcides Carrión – 2022” (p.20) por (Barzola, 2023).

V. *Análisis Granulométrico.* En lo referente al análisis granulométrico:

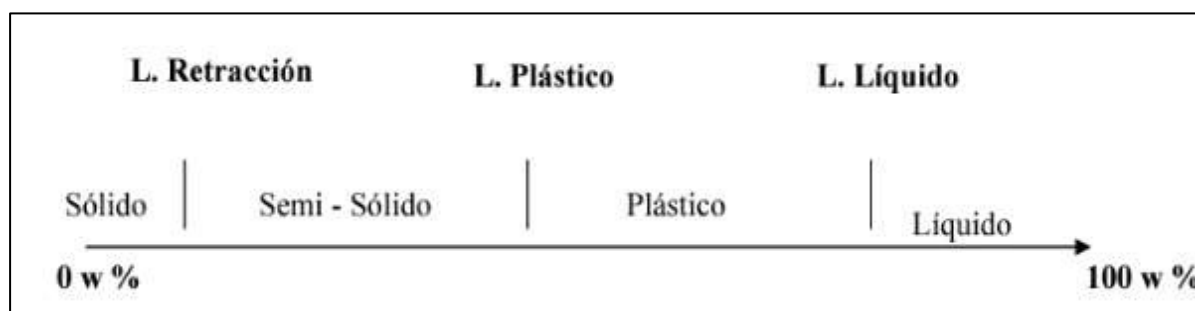
La prueba separa y divide los materiales por medio de una colección de tamiz en diferentes partes de tamaño decreciente. Luego de un periodo de tiempo retiramos el tamiz limpiando para dividir la masa de materiales retenidos en cada tamiz, su totalidad corresponde a lo utilizado en la columna de tamiz. (Chávez et al., 2022, p.1)

W. *Límites de Consistencia.* El índice de Atterberg, igualmente llamado índice de consistencia, se trata de la determinación de mayor frecuencia dentro del laboratorio de suelos:

Su uso está sustentado en el favor del ejercicio acumulativo de diversas determinaciones, es conocida su valía para tener una conceptualización correcta de la tipología del suelo, así como las peculiaridades del mismo. Por otra parte, resultan determinaciones de poca complejidad y rápidas, permitiendo de un estudio vertiginoso del terreno y la elección de muestras comunes para enfrentar pruebas complejas. (Puy, 2005, p.2).

Figura 18:

Límites de Atterberg



Nota. Límites de Atterberg: estados del suelo según su contenido de humedad (sólido, semisólido, plástico y líquido). Adaptado por “Análisis de la posible correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia” (p.22) por Patiño (2022).

X. Ensayos de CBR. Se mide mediante el CBR (Prueba de relación de rodamientos de California). resistencia al esfuerzo cortante del suelo y puede evaluar la calidad del suelo para la subrasante, la capa de cimentación y el núcleo de la carretera. Realizándose en situaciones de control a lo denso y húmedo. Es una de las cosas importantes que logramos al estudiar geotécnicamente previniendo a las construcciones, similar que el Ensayo Proctor y el análisis de granulometría del suelo.

2.1.1.4. Caucho reciclado y uso en pavimentos. El caucho reciclado se refiere principalmente a llantas desechadas o que también causan contaminación porque contienen parásitos y vectores de enfermedades.

Actualmente existen varios métodos para reciclar algunos de estos contaminantes que pueden reducir aún más su cantidad y utilizarlos para aplicaciones industriales y tecnológicas además de crear nuevos puestos de trabajo. Dependemos de su disponibilidad; Trituración mecánica de llantas de desecho: “Es un proceso mecánico que, buscando la calidad y limpieza de los materiales utilizados, lo que nos permite utilizarlos de una forma sencilla e innovadora. El método de triturar es un proceso de reciclaje Mecanización. El material del que se obtiene Los neumáticos que se reciclan se rompen en pequeñas partículas (GTR, caucho de neumáticos granulado) y al mismo tiempo se descomponen en otros componentes como acero y fibras, también se desulfura y sucesos nos ayudan a usar el resultado

final para asfalto, espacios deportivos. y elaboración moldeada, el objetivo es mejorar cada vez su uso y rendimiento (Zaga, 2022, p.16)

Figura19:

Partículas de caucho reciclado después de proceso de trituración



Fuente. Elaboración propia

A. Neumático. Un neumático es una pieza de caucho con forma de anillo que se coloca sobre Ruedas para diversos vehículos y máquinas como coches, camiones, aviones, bicicletas, motos, máquinas industriales, carretillas elevadoras y grúas, etc. Los neumáticos ayudan al vehículo o equipo en cuestión a agarrarse a la carretera para que pueda arrancar y detenerse:

Las llantas tienen hilos que refuerzan su textura, y al mismo tiempo, considerando su dirección, podemos clasificarlas en: Llantas radiales, que son las llantas que se usan en los autos modernos, y a la vez de capas del material están dispuestos uno encima del otro, otro en línea recta proporciona al pavimento mayor estabilidad y resistencia; en diagonal, las capas se colocan exactamente en diagonal una encima de la otra; en el caso de capas autoportantes, las capas también se colocan una encima de otra en dirección recta y también lateralmente. Esto proporciona

resistencia a la tapa, pero reduce la comodidad a medida que se vuelve más rígida.

Ucha (2013).

Figura 20:

Partes del Neumático



Nota. Partes de un neumático adaptado por “banda de rodamiento, costado, talón, carcasa, cinturones de acero y capa overlay” de GoodYear (2022).

B. Propiedades físicas y químicas del caucho. Las propiedades mecánicas requeridas en un pavimento flexible son:

Esenciales para asegurar su funcionalidad, durabilidad y resistencia ante las cargas vivas, los contextos climáticos y otros factores ambientales, como la rigidez axial, resistencia a la fatiga, módulo de elasticidad, resistencia al agrietamiento por calor, al agrietamiento por frío, adherencia o cohesión, estabilidad volumétrica (Garnica et al., 1998, p. 12).

El caucho en bruto, presentado en su condición natural viene a ser un hidrocarburo blanco o sin color, siendo el compuesto de caucho de mayor simplicidad el isopreno o el metilbuteno.

A temperaturas del aire líquido de aproximadamente -195°C , el caucho puro viene a ser duro, sólido y transparente entre 0 y 10°C , quebradizo y opaco, mientras que por encima de 20°C resulta flácido, maleable y transparente cuando se amasa o se calienta a más de 50°C , este material consigue una contextura plástica pegajosa se descompone a 200°C o más.

Los elastómeros son polímeros que son muy flexibles y pueden recobrar su forma luego del proceso deformante. Los elastómeros se tratan de compuestos llamados monómeros que están formados por miles de moléculas unidas entre sí para formar enormes cadenas.

Figura 21:

Propiedades del caucho



Nota. Propiedades del caucho: adaptado por Ciudades inteligentes y socialmente y responsables. (p. 14) por secretaria de Educación de Gobierno del Estado de Querétaro.

C. Ventajas del caucho reciclado en pavimentos. Aplicar caucho reciclado en pavimentación ofrece diversidad de ventajas significativas, no solo desde la perspectiva técnica sino también medioambiental; siendo estas:

- Mejora la durabilidad de las pavimentaciones (resistencia a grietas, fatiga y deformación).
- Incrementa la resistencia a la abrasión y el desgaste.
- Contribuye a la sostenibilidad, al reciclar neumáticos.

- Reduce el impacto de factores climáticos extremos, como temperaturas altas o bajas.

2.1.1.5 Impacto del Caucho en polvo en las propiedades mecánicas del pavimento.

Propiedades mecánicas mejoradas

Según Barzola (2023) confirma que “La calidad del desempeño está determinada por la calidad del material que cumplirá con los estándares en resistencia y que será utilizado para aislamiento térmico [...]; considere el módulo de resistencia como el funcionamiento de unas combinaciones de otras” (p.20).

A. Resistencia. Sobre la resistencia “La propiedad que se asocia al desgaste que puede tener la colección al exponerse a la abrasión o al impacto, la cual se puede medir con varias pruebas como la prueba de Los Ángeles” (Robles, 2018. p.22).

B. Tenacidad. Sobre la tenacidad se confirma que “Hay que conseguir una buena recogida de piedras, para que tenga una buena resistencia a la rotura por impacto” (Robles, 2018. p.22).

C. Adherencia. Sobre la adherencia se confirma que “La composición del árido requiere de una contextura sólida, así como una presentación anormal que provenga de grietas; utilizando explosivos y recubrimientos bituminosos, utilizamos mezclas para hidráulica” (Robles, 2018. p.22).

D. Dureza. Sobre la dureza es confirmado que el poder del colectivo tiene dependencia de su estructura al igual de su hábitat; “Dicha característica tiene sustentación en la combinación del poder de prueba” (Robles, 2018. p.22).

Factores de sostenibilidad ambiental

La incorporación de neumáticos reciclados en forma de caucho en polvo contribuye al manejo de desechos sólidos en la zona y al desarrollo de infraestructura más sostenible.

2.1.1.6 Condiciones locales de Ultupuquio y Chavín de Huantar

A. Factores geográficos y climáticos. El área experimenta temperaturas diurnas moderadas y nocturnas bajas, con posibles fluctuaciones térmicas que podrían generar grietas térmicas en el pavimento, la zona tiene una marcada estacionalidad en las lluvias, con temporadas húmedas significativas que pueden afectar la subrasante del pavimento y aumentar el riesgo de erosión y deformación, durante ciertos periodos del año, las temperaturas pueden descender por debajo de los 0 °C, afectando la estructura del pavimento si no se toman medidas adecuadas para mitigar el daño por congelamiento y deshielo.

B. Tráfico y condiciones del suelo. Los suelos en la región andina suelen ser heterogéneos, con presencia de suelos arcillosos, limosos o de baja capacidad portante en algunos sectores. Es necesario realizar un estudio geotécnico detallado para determinar la resistencia del terreno, la capacidad de carga y aquella necesidad de reforzamiento o estabilización, la presencia de suelos expansivos o sueltos que podrían comprometer la estabilidad del pavimento si no se mejora la subrasante adecuadamente.

2.1.1.7 Estudios previos sobre el uso del caucho en pavimentos flexibles

A. Origen y desarrollo. El uso de caucho reciclado en pavimentos comenzó en la década de 1960 como una solución para manejar residuos de neumáticos y mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

Los estudios han demostrado que el caucho mejora la resistencia al envejecimiento, la elasticidad y la capacidad de soporte del pavimento.

B. Ventajas técnicas. Las ventajas técnicas se dividen en resistencia al agrietamiento y durabilidad mejorada.

- Resistencia al agrietamiento térmico: Estudios como los de Kaloush et al. (2002) han destacado que el caucho en polvo reduce la rigidez del pavimento en temperaturas bajas, evitando grietas térmicas.
- Durabilidad mejorada: Investigaciones en países como EE.UU., México y Brasil han confirmado que los pavimentos con caucho tienen una mayor vida útil frente a los pavimentos convencionales.

2.1.1.8. Procedimiento del uso del caucho para el diseño de pavimentos

flexibles. El uso de caucho en el esbozo de pavimentación flexible, particularmente a través de la incorporación de caucho reciclado de neumáticos, es una técnica que ofrece beneficios en términos de sostenibilidad y mejora de las propiedades del pavimento.

Su procedimiento se inicia de la siguiente manera:

*A. **Recolección y reciclaje del caucho:*** Se recolectan neumáticos fuera de uso y otros productos de caucho, se tritura y se procesa para obtener gránulos o polvo de caucho.

*B. **Preparación del aglomerado asfáltico:*** Se añade caucho triturado al betún asfáltico en proporciones específicas, puede añadirse como un modificador en dos formas; Método húmedo, cuando se mezcla directamente con el betún para formar un ligante modificado y método seco, el caucho se mezcla como un agregado en el proceso de preparación del compuesto asfáltico.

*C. **Diseño del aglomerado asfáltico:*** Se realizan pruebas de laboratorio para diseñar la mezcla, asegurando de cumplimiento a esas exigencias de desempeño, como resistencia a deformaciones, durabilidad y resistencia al agrietamiento, se utilizan métodos estándar como el ensayo Marshall o Superpave.

*D. **Producción y colocación.*** La mezcla se produce en plantas de asfalto, teniendo en cuenta las temperaturas óptimas para evitar la degradación del caucho, es transportado hasta el lugar de edificación, y colocado utilizando equipo convencional de pavimentación.

E. Compactación y acabado. Se realiza la compactación con rodillos para alcanzar la densidad especificada, se inspecciona la superficie para garantizar la uniformidad y la calidad.

F. Mantenimiento y monitoreo. Se lleva a cabo un monitoreo continuo del pavimento para evaluar su desempeño en el tiempo.

2.1.1.9 Beneficios del caucho en pavimentos. El uso de caucho en pavimentos ofrece múltiples beneficios, estos son:

- Mayor resistencia al agrietamiento y a las deformaciones.
- Reducción del ruido del tráfico
- Mejora en la durabilidad del pavimento
- Contribución a la sostenibilidad mediante el reciclaje de neumáticos

2.1.1.10 Costos de Implementación del Caucho en Polvo en la Subrasante de pavimentos Flexibles. El costo de incorporación de caucho en polvo en la subrasante de pavimento flexible es una consideración clave, los beneficios a largo plazo, como la durabilidad mejorada y los menores costos de mantenimiento, pueden justificar la inversión. En consecuencia, los pavimentos contruidos con mezclas de caucho asfáltico tienen muchos beneficios, como una durabilidad mejorada y una resistencia mejorada a la fatiga iniciada en la superficie y al agrietamiento por reflexión, resistencia mejorada al envejecimiento y a la oxidación debido a un mayor contenido de aglomerante. Shen et al. (2012).

Los costos, según Granados (2017), nos señala que “Para la fabricación de 1 m³ de mezcla asfáltica incluyendo el caucho reciclado se requieren aproximadamente 4 llantas, y que para producir una tonelada de grano de caucho reciclado se requieren 250 neumáticos” (p.43).

Pues debido a que el material reciclado (neumático) se encuentra muchas veces en acopios sin utilizar lo que genera que tenga un bajo costo, la trituración generara un costo menor en el mismo ya que no tiene muchos procesos mecánicos ni adición de algún otro material para su descomposición.

A. Costo de adquisición del caucho reciclado. El costo puede variar según la disponibilidad de neumáticos reciclados en la región y la logística de transporte.

B. Proceso de integración del caucho. El proceso de mezcla y dosificación del caucho en polvo en la mezcla asfáltica puede requerir equipos especializados, lo que puede incrementar los costos iniciales.

C. Reducción de espesor y mantenimiento. Al ser más duraderos y resistentes según, Munder, et al. (2023) en su artículo “A Review of Rubberised Asphalt for Flexible Pavement Applications: Production, Content, Performance, Motivations and Future Directions”, señalan que diversos estudios han demostrado que los pavimentos de asfalto usando caucho en polvo no solo contribuyen a la reducción del espesor estructural requerido, sino también a la disminución del ruido del tráfico, la contaminación ambiental y los costos de conservación. Asimismo, destacan que este tipo de mezclas prolonga la vida útil de los pavimentos y disminuye fenómenos como la refracción y la reflexión de ondas, lo cual reafirma sus ventajas técnicas y ambientales frente a los diseños convencionales.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

El compendio investigativo presentado tiene tipología aplicada, gracias a que permite desarrollar y resolver un problema práctico como es el caso del esbozo de la pavimentación flexible, generando una solución técnica basada en conocimientos existentes y adaptarlos al contexto local, asimismo, busca ampliar nuestro conocimiento para comprender si la adición de caucho refleja buenos resultados y pueda aplicarse en otros casos.

El diseño de la indagación considerando a Hernández y Mendoza (2018), resulta experimental, ya que se realizan pruebas en laboratorio, se puede aplicar un diseño experimental con manejo de la variable independiente (caucho en polvo) así como observación del efecto de este sobre variables dependientes.

El nivel investigativo viene por alcance viene a ser Explicativo, debido a que dicho estudio incluye una fase experimental, se podría evaluar cómo la inclusión de caucho en polvo afecta el comportamiento mecánico del pavimento en comparación con materiales tradicionales.

3.2 Ámbito temporal y espacial

La indagación presentada tuvo desarrollo dentro del sitio de Ultupuquio, distrito de Chavín de Huántar, provincia de Huari, departamento de Áncash. Esta zona es seleccionada por presentar condiciones geográficas, climáticas y de infraestructura vial que requerían alternativas sostenibles y de bajo costo para el mejoramiento de pavimentos, especialmente en lo referente al comportamiento de la subrasante. La indagación estuvo centrada en evaluar la aplicación de caucho en polvo reciclado como aditivo en distintas proporciones (10%, 15% y 20%) en mezclas con el suelo natural, con el objetivo de comparar su rendimiento frente al diseño convencional de pavimento flexible sin adición.

El ámbito temporal del estudio comprendió un período de aproximadamente doce meses, en los cuales se llevaron a cabo diversas actividades, desde la recolección de muestras de suelo en campo y su posterior caracterización en laboratorio, hasta la elaboración de mezclas con caucho en polvo y la realización de ensayos de resistencia y comportamiento mecánico, como el CBR y la estimación del número de cargas repetidas admisibles. Además, se llevó a cabo una comparación de costes de mantenimiento asociados a cada opción de esbozo.

Durante este tiempo, se desarrollaron estudios experimentales que permitieron precisar la afectación del caucho en polvo en la optimización de esa capacidad portante del terreno, así como su influencia en la existencia útil de la pavimentación, así como aquellos costes asociados al cuidado a largo plazo. Asimismo, se consideró la viabilidad de la adquisición del caucho en polvo para atender la demanda local, identificando como principales fuentes de abastecimiento las plantas recicladoras de neumáticos ubicadas en Lima, un ejemplo de ella es la empresa Rodacaucho la cual cuenta con procesos de trituración y micronizado que permiten obtener un material apto para aplicaciones en ingeniería vial. Los resultados obtenidos sirvieron para establecer criterios técnicos y económicos sobre la viabilidad del uso de este material reciclado, asimismo con el transporte al lugar en el contexto local de Ultupuquio.

3.3 Variables

3.3.1 Variables de estudio

Variable Independiente: Caucho en Polvo

Variable Dependiente: Alternativa sostenible para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles.

3.3.2 Operacionalización de variables:

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variable	Indicador	Método
Independiente	% de caucho en polvo	Tipo: Aplicada
Dependientes Nro. 1	CBR	Enfoque: Cuantitativo
	Números de ejes equivalentes hasta la falla (ensayo triaxial o modelos)	Diseño: Experimental
Dependientes Nro. 2		Tipo: Cuasi-
Dependientes Nro. 3	Metrados	Experimental
Dependientes Nro. 4	A.C.U	

Fuente: Elaboración Propia

Las variables representan el eje transversal de toda indagación investigativa, partiendo del planteamiento de la idea originaria hasta el desarrollo de los resultados. Por ello, es fundamental determinar qué variables se estudiarán, cómo se identifican, de qué manera se miden y cuál es la relación existente entre ellas, ya que de su adecuada definición depende la coherencia y validez del estudio. Rodríguez et al. (2021).

3.4 Población y muestra

Hernández, et al. (2018) señalan que el término refiere “El total de ese acontecimiento analizado, en el cual las unidades cuentan con peculiaridades comunes, que son estudiadas y generan los registros informativos de la exploración”. (p. 175)

El grupo muestral viene a ser el aglomerado del universo poblacional empleado para llevar a cabo dicho análisis, relacionándose dicha proposición con lo comentado por Chávez (2004), el cual asevera que se trata de una porción característica de un conjunto, población o

universo cuyas peculiaridades es necesario que produzcan en lo diminuto, lo más preciso que tenga posibilidad.

En el caso del compendio presentado, se dará atención al grupo poblacional conformante del distrito de Chavín de Huántar.

Con respecto a la muestra tomaremos el tramo de Ultupuquio desde el Km 11+154 hasta el Km 10+150 constando de 1 km, a modo de contar con una amplia extensión de esta temática, lo que empuja a considerar la totalidad de pruebas de laboratorio para este análisis; trayecto que manifiesta mayor presencia de fallas, por lo que se recopilaron registros mediante fotos y formatos de inspección, percibiéndose que es ese que presenta mayor criticidad con una extensión de 1km, lo que lleva a que los ensayos que se realizarán sean obtenidos del lugar.

Tabla 2

Tamaño de Muestra

Descripción	% de Caucho en polvo	N° de Briquetas
Muestra inicial	0%	15
Muestra inicial más caucho en polvo	10%	15
	15%	15
	20%	15
Total		60

Fuente: Elaboración Propia

Se obtuvo 60 muestras con 0%, 10%, 15% y 20% de caucho en polvo, necesarios para poder realizar los ensayos considerando al reglamento de diseño de pavimentos que serán ejecutados dentro de laboratorio, teniéndose con ello mayor exactitud en los alcances.

3.5 Instrumentos

3.5.1 Instrumentos metodológicos o de recolección de datos

Según Arias (2020) “Esto nos dice que las observaciones, cuando se hacen de manera experimental, producen datos que están bajo el control del propio investigador, porque le permite manipular fácilmente sus variables”. Con esto, utilizamos una

herramienta de muestreo llamada "árbol de probabilidad o diagrama de árbol" para recolectar datos, lo que nos ayuda a identificar muchas posibilidades y también determinar el tamaño de muestra requerido para el estudio.

Por tanto, la herramienta utilizada para la recogida y procesamiento de datos es un formulario de prueba.

Tabla 3

Características físicas y mecánicas

Características físicas	Normas Aplicables
Contenido de Humedades	MTC E-108
Análisis de granulometría por tamiz	MTC E-107
Límites de Consistencias	
Límites Líquidos	MTC E-110
Límites plásticos	MTC E-111
Índice Plástico	MTC E-111
Características mecánicas	
Proctor modificado	MTC E-115
CBR	MTC E-132

Fuente: Elaboración propia

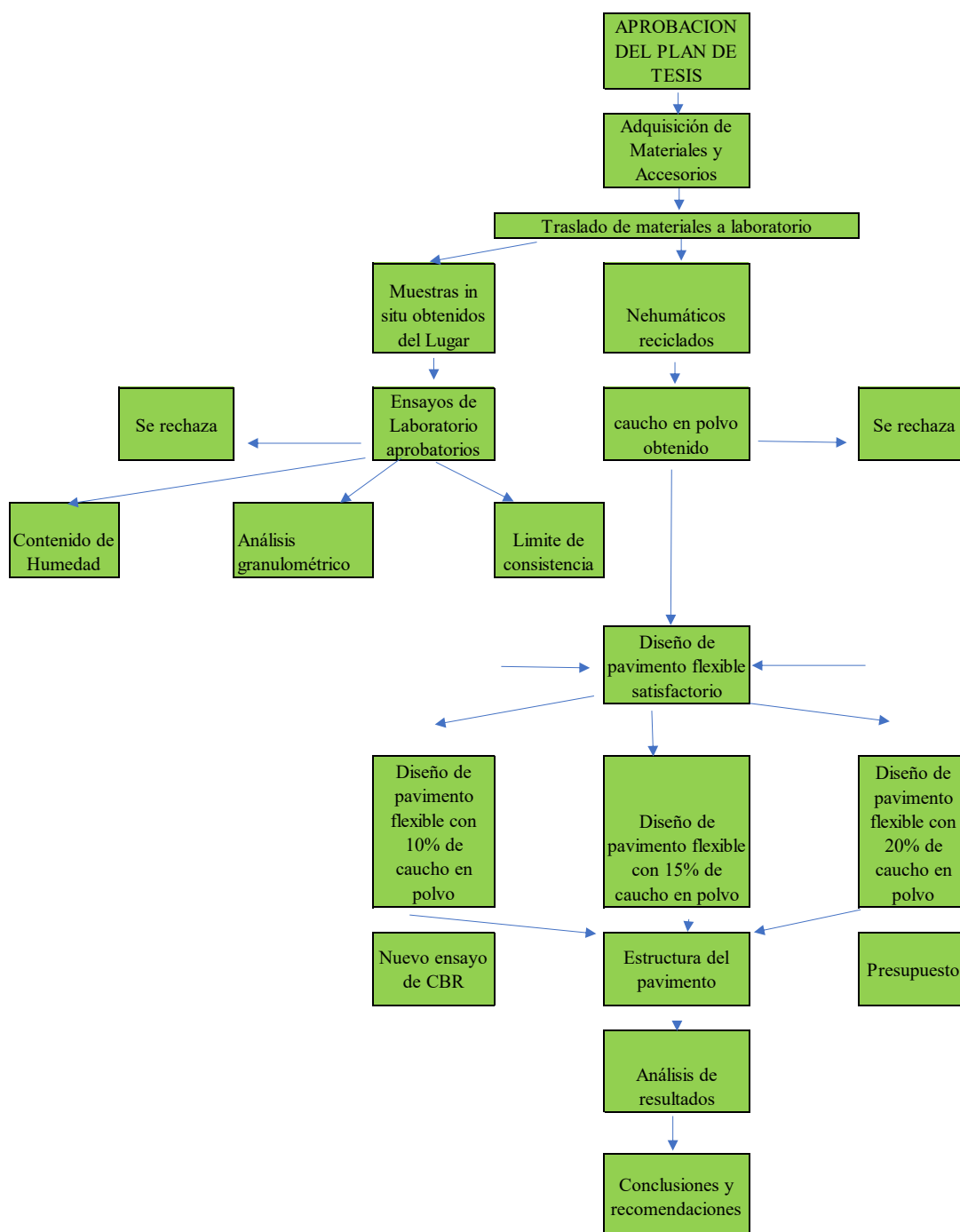
Las peculiaridades físicas y mecánicas del terreno fueron determinadas por medio de una serie de ensayos normalizados, según las especificaciones del MTC. En cuanto a las primeras, fue evaluado el contenido de humedad conforme a dicho ente mencionado, respecto a las segundas peculiaridades, tuvo aplicación ensayos de Proctor modificado a objeto de establecer la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad, y el CBR, destinado a evaluar la capacidad de soporte del terreno. Estos alcances permitieron conocer el comportamiento del material ante cargas y establecer su idoneidad para el esbozo de la subrasante en pavimentaciones flexibles.

3.6 Procedimientos

El procedimiento para realizar la encuesta donde mostramos en el diagrama de flujo a continuación.

Figura 22:

Diagrama de flujo de trabajo de Tesis



Fuente: Elaboración Propia

3.6.1 Ensayos para el control de los materiales para el diseño de pavimento flexible

Para el proceso de interpretación obtenido en el laboratorio, trabajamos tal cual, utilizando herramientas informáticas o software adecuados para procesar la información de la prueba; Microsoft Word, Excel, Autocad civil, Power Point, bajo la supervisión de un consultor y en base al plan universitario.

Tabla 4

Requisitos de la subrasante granular

Ensayo	Norma MTC	Norma	Norma	Requerimiento por Altitud	
		ASTM	AASHTO	<3000 msnm	>3000 msnm
Abrasión	MTC E 207	C 131	T 96	50% máx.	50% máx.
CBR	MTC E 132	D 1883	T 193	40% mín.	40% mín.
LL	MTC E 110	D 4318	T 89	25% máx.	25% máx.
IP	MTC E 111	D 4318	T 89	6% máx.	4% máx.

Nota. Requisitos de la subrasante granular adaptado por “Supervisión y seguimiento para el proyecto creación del servicio de transitabilidad vehicular y peatonal de la asociación los suyos, distrito de Carabayllo, Lima -2019” (p. 20) por (Cuya, 2021)

3.7 Análisis de datos

Con miras a conceptualizar el sustento hipotético del estudio, Sánchez et al. (2018) exponen que “El mismo se trata de la estructuración del proceso de recaudación de datos a fin de que tenga la posibilidad de un procesamiento e interpretación detallada, siendo posible que sea de naturaleza cuantitativa y/o cualitativa” (P. 15).

En la naturaleza las pruebas de laboratorio de mecánica del suelo son ventajosas y los procedimientos experimentales se explicarán en detalle utilizando tablas descriptivas y

Microsoft Excel (hojas de cálculo), cuyo valor importante es la funcionalidad suficiente de la estabilidad química del polvo de caucho reciclado en el sustrato.

Por otro lado, la colocación de estabilizadores dentro del terreno analizado en los estudios geotécnicos se basará en el comportamiento de su forma natural, la cual se considera como muestra estándar sin dependencia alguna, así como diferentes dosis de caucho reciclado en polvo para estabilizar la calzada, siguiendo estrictamente la norma peruana.

3.8 Consideraciones éticas

Es muy importante mantener la competencia intelectual del investigador al momento de manejar los datos informativos del análisis, redactar los aspectos referenciales en APA y todos los lineamientos estén correctamente definidos según la reglamentación interna de la Universidad Nacional Federico Villarreal. En el caso de aspirantes a ingenieros civiles, siempre deben mantener la integridad, el honor y el respeto de la profesión y proporcionar datos precisos para futuras exploraciones a una serie de expertos que siguen carreras de ingeniería.

Según el código introducido por el Colegio de Ingenieros de la nación peruana, el código de conducta promueve entre los profesionales la actitud y el pensamiento crítico que deben tener durante su trabajo de ingeniería, donde la actividad se desarrollará con orden.

IV. RESULTADOS

4.1 Tema de investigación propuesta

El título de nuestra investigación es: Uso de caucho en polvo como alternativa para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles.

4.2 Localización del proyecto

a) Ubicación:

Departamento : Ancash

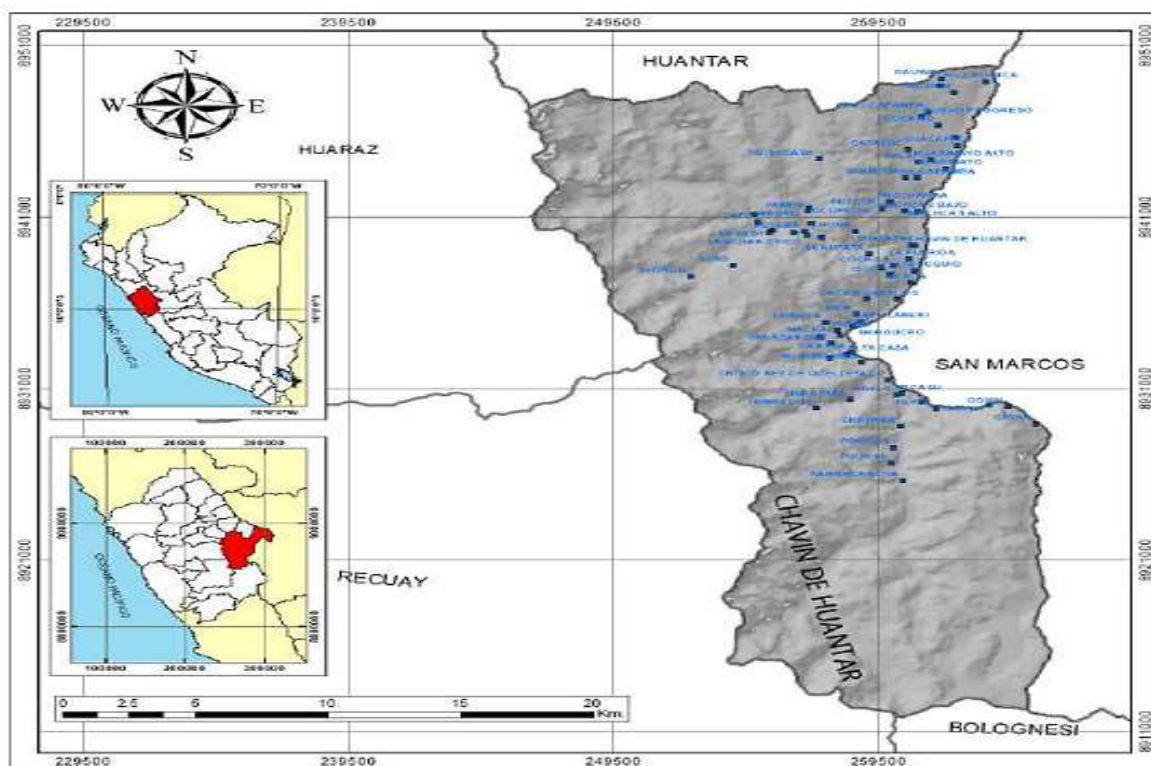
Provincia : Huari

Distrito : Chavín de Huántar

Localidad : Ultupuquio

Figura 23:

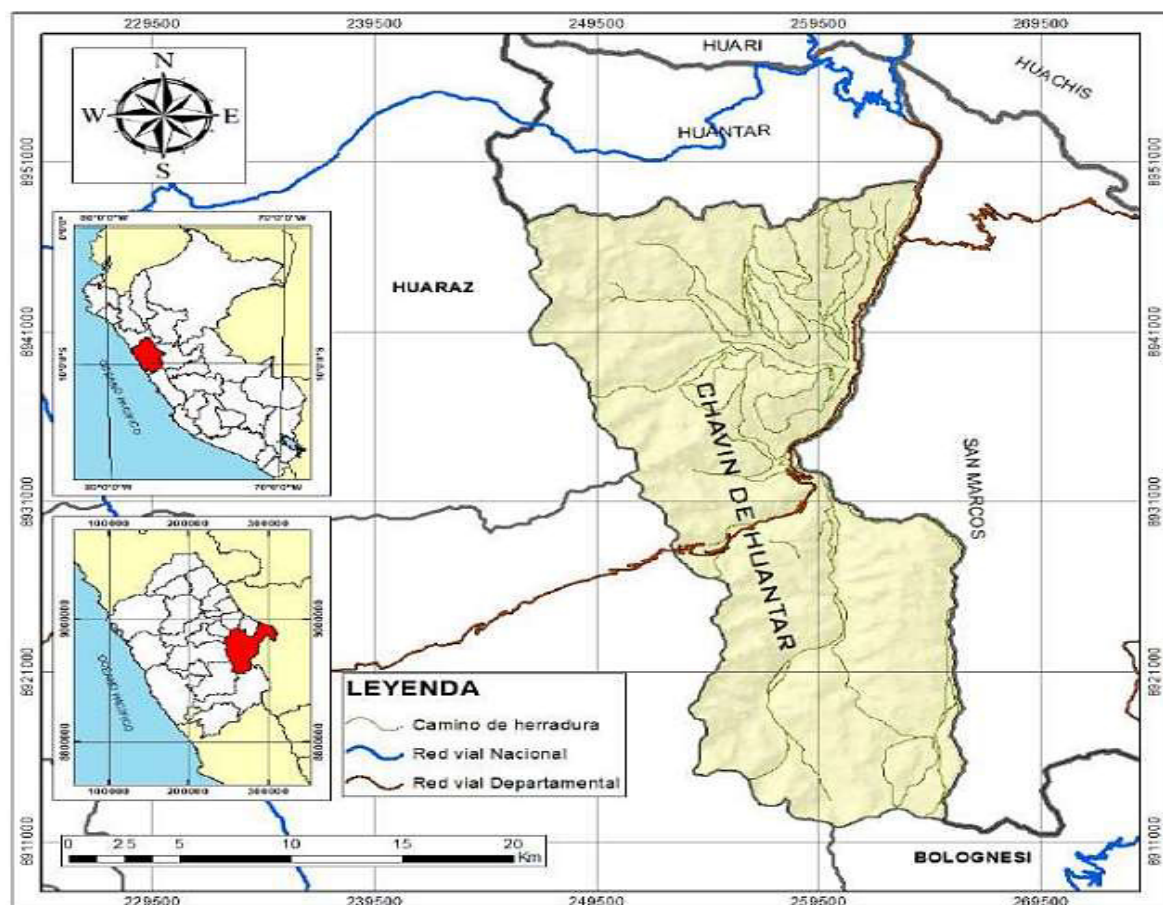
Mapa de localización del distrito de Chavín de Huántar



Nota. La figura muestra la localización del distrito de Chavín de Huántar, adaptado por “Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres del distrito de Chavín de Huántar – Provincia de Huari – Región Áncash”, p. 33. por (Montes, 2022)

Figura 24:

Redes viales del distrito de Chavín de Huántar



Nota. La figura muestra Las redes viales del distrito de Chavin de Huantar, adaptado por “Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres del distrito de Chavín de Huántar – Provincia de Huari – Región Áncash”, p. 34. por (Montes, 2022)

Tabla 5

Número de calicatas

CALICATA	PROGRESIVA	COTA	ESTE	NORTE
N° 01	KM 11+154	3824	255047.778	8940643.490
N° 02	KM 10+650	3784	255013.403	8940430.622
N° 03	KM 10+150	3740	255040.169	8940143.373

Fuente: Elaboración Propia

Este compendio que se presenta, vino a ser la excavación a pala de tres calicatas designadas “CALICATA 01”, “CALICATA 02 y CALICATA 03” situadas en ubicaciones estratégicas en las progresivas 11+154 + 10+650 y 10+150 representativos en la vía estudiada con una depresión máxima de 1.50m.

Figura 25:

Calicatas

Calicata 01



Fuente: Elaboración Propia

La calicata 01 está localizada en la progresiva KM 11+154 en la vía de Ultupuquio.

Calicata 02



Fuente: Elaboración Propia

La calicata 02 está localizada en la progresiva KM 10+650 en la carretera de Ultupuquio.

Calicata 03



Fuente: Elaboración Propia

La calicata 03 está localizada en la progresiva KM 10+150 en vía de Ultupuquio.

La calicata 01, 02 y 03 se realizaron en la progresiva de la carretera de Ultupuquio a Km 11+154, 10+650 y 10+150. Estos puntos fueron seleccionados por ser representativos en las condiciones del terreno natural y de la subrasante a lo largo del tramo objeto de estudio, además de que se encontraron en una zona accesible para hacer las exploraciones in situ.

El procedimiento consistió en excavar manualmente una superficie aproximada de un metro por un metro hasta alcanzar una profundidad próxima a 1.50 metros, considerando los parámetros planteados en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014). Durante la apertura se llevó un registro detallado de los estratos encontrados, describiendo el color, la textura, el grado de humedad o la presencia de materiales gruesos o finos.

4.3 Trabajo de Gabinete

4.3.1. Ensayos Físicos.

Las pruebas para la superficie arcillosa se elaboraron en el Laboratorio de mecánica de suelos, concreto y pavimentos 3R GeoIngeniería SAC; siendo ejecutados según el manual de ensayo de materiales para carreteras del MTC.

4.3.1.1. Determinación del contenido de Humedad. En la superficie, el contenido de humedad es calculado como cuantía porcentual del peso del agua en correspondencia con el peso del suelo seco. Dicha prueba es efectuada determinando el peso del vital líquido eliminado, secando el suelo húmedo hasta un peso invariable en un horno controlado a 110 ± 5 °C.

El peso del terreno que persiste secado en dicho equipo, se utiliza como el peso de las partículas sólidas, mientras que la pérdida de peso por el secado se aprecia como el peso de agua. La estimación del mismo es obtenida a través de la fórmula que sigue:

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo secado del horno}} \times 100$$

La prueba para cuantificar dicho contenido mencionado, se ejecutó sustentándose en la normativa MTC E 108 relativo al manual de ensayo de materiales.

4.3.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado. A través de este, en alguna superficie es posible estimar cuantitativamente la cuantía proporcional de esas partículas constituyentes de la superficie, categorizándolas de acuerdo al tamaño que poseen. Seguidamente será mostrado el, considerando el manual de suelos y pavimentos.

Tabla 6

Análisis granulométrico

Tamiz	Abertura mm	Tamiz	Abertura mm
3"	76.2	#8	2.36
2 1/2"	63.5	#10	2
2"	50.8	#20	0.84
1 1/2"	38.11	#40	0.42
1"	25.4	#50	0.3
3/4"	19.1	#80	0.177
1/2"	12.7	#100	0.149
3/8"	9.52	#200	0.074
1/4"	6.35	<#200	Fondo
#4	4.76		

Fuente: Elaboración Propia.

La siguiente figura, manifiesta el grupo de tamices usados en la interpretación granulométrica por tamizado C-1.

Figura 26:

Tamices utilizados para el ensayo de análisis granulométrico por tamizado



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al estudio de la dimensión de partículas, fue llevada a cabo según la normativa del ensayo MTC E 107 del manual de ensayo de materiales del MTC (2016); según la dimensión de la partícula del terreno.

Tabla 7

Ensayo Granulométrico

Tipo de Material		Tamaño de partículas
Grava		75 mm - 4.75 mm
		Arena Gruesa: 4.75 mm- 2.00 mm
		Arena media: 2.00 mm- 0.425 mm
		Arena fina: 0.425 mm- 0.075 mm
Material fino	Limo	0.075 mm - 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Nota. La tabla presenta la clasificación de los materiales según el ensayo granulométrico, indicando los rangos de tamaño de partículas para grava, arena (gruesa, media y fina), limo y arcilla. Adaptado de “Mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso adicionando hormigón en el sector Nuevo Barraza - Laredo - Trujillo, Región La Libertad, 2021”, p. 12. por (Quipuzcoa, 2021).

4.3.1.3. Límites de Atterberg. Los mismos determinan el grado de sensibilidad de la superficie con respecto al contenido de humedad, estableciendo los parámetros concernientes a los cuatro estados de consistencia de acuerdo a su humedad, y según lo obtenido de ello, es posible la presentación de un terreno: plástico, líquido, sólido o semisólido. Los mismos vienen a ser: el límite plástico y líquido. Las pruebas tienen que ejecutarse en base al terreno que pasa el tamiz N° 40.

A. Límite líquido. Es definido como ese contenido de humedad más alto que contiene una superficie; siendo conceptualizado como esa condicionante donde la resistencia al corte del terreno resulta tan baja, que cualquier leve esfuerzo causa que fluya. Esta prueba fue efectuada según la legislación MTC E 110 del manual de ensayo de materiales del MTC, que establece que una ranura forjada en una masa de terreno en una copa estándar se cierra en un trecho de 12,7 mm (½ pulgada) bajo 25 golpes del dispositivo de Casagrande.

B. Límite plástico. Esta prueba tuvo ejecución según la normativa MTC E 111 del manual de ensayo de materiales del MTC, hace posible la identificación del grado de plasticidad de la superficie junto con el límite líquido, es empleado para la cuantificación del nivel de plasticidad, siendo el contenido de agua del terreno manifestado como porcentaje de su peso seco, en el cual la superficie comienza su desmoronamiento al momento de enrollarse en hilos de 3 mm de diámetro.

C. Índice de Plasticidad. Esta prueba fue efectuada según la normativa MTC E 111 del manual de ensayo de materiales del MTC, tratándose del intervalo de contenido de agua donde la superficie manifiesta características plásticas. Dicho índice es expresado a través de la fórmula $IP = LL - LP$.

Considerando este parámetro, se tiene la categorización que sigue:

Tabla 8

Índice de plasticidad

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Características
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No plástica	Suelos exentos de arcillosas

Nota. La tabla presenta la clasificación de los materiales según el ensayo granulométrico, indicando los rangos de tamaño de partículas para grava, arena (gruesa, media y fina), limo y arcilla. Adaptado de “Mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso

adicionando hormigón en el sector Nuevo Barraza - Laredo - Trujillo, Región La Libertad, 2021”, p. 16. por (Quipuzcoa, 2021).

4.3.2. Ensayos Físicos.

4.3.2.1. Proctor Modificado. Dicha prueba se realizó en un laboratorio, permitiendo delimitar esa correlación entre el contenido de agua y el peso unitario seco del terreno relleno en moldes en capas, con magnitudes determinadas mediante un pistón de 10 lbf que desciende desde una altura previamente definida, generando una energía de compactación de 2700 kN-m/m³.

Mediante el mismo, se tuvo la posibilidad de establecer la densidad seca máxima de un terreno en analogía con su nivel de humedad, aplicando una energía de compactación definida. Tuvo una aplicación única a terrenos con una manifestación del 30% o menos en peso de partículas retenidas en el tamiz de 3/4” (19,0 mm). En esos casos donde el suelo contenía más del 30% de material retenido en dicho tamiz, tuvo empleo la metodología de prueba estándar dirigida a la corrección de la unidad de peso y contenido de agua en superficies con partículas de sobre tamaño (ASTM 4718). Fueron dispuestos tres metodologías electivas: A, B y C. Dentro de los métodos A y B, con uso de un molde de 4 pulgadas de diámetro, compactando el suelo en cinco capas, aplicando cinco golpes por capa con el martillo o pisón. En el caso del C, tuvo empleo un molde de 6 pulgadas de diámetro, compactando igualmente en cinco capas, pero con 56 golpes por capa.

Finalmente, esta prueba tuvo ejecución conforme a la normativa MTC E 115, establecida en el Manual de Ensayo de Materiales del MTC.

4.3.2.2. Ensayo CBR. A pesar de tener mayor difusión y simplicidad, permitió tener conocimiento sobre la resistencia del terreno, siendo empleado principalmente en el esbozo de pavimentos a modo de evaluar la resistencia potencial de las subrasantes, subbases y bases. Fue llevado a cabo sobre suelos previamente preparados en circunstancias controladas de humedad y densidad, aun cuando igualmente pudo ejecutarse sobre muestras inalteradas logradas directamente de la superficie.

4.4 Materiales a Utilizarse

4.4.1. Arcilla Inorgánica de Baja compresibilidad

La arcilla inorgánica estuvo comprendida principalmente por minerales como caolinita, illita y montmorillonita, estos minerales fueron responsables de las propiedades plásticas y de la retención de agua de la arcilla.

La baja compresibilidad indicó que la arcilla presentó una alta resistencia a la deformación bajo carga, lo que la hizo adecuada para aplicaciones en las que se requería mayor estabilidad estructural. Las muestras recabadas de las superficies fueron de coloración marrón; mientras que, para su extracción, fueron realizadas calicatas de 1.5 mts. de profundidad, con el fin de evitar la tierra negra y obtener una porción más limpia y con representatividad del nivel de subrasante.

4.4.2. Polvo de caucho

La obtención de polvo de caucho en la localidad sujeta a análisis, implicó un proceso de reciclaje de neumáticos usados, los cuales fueron triturados y procesados hasta obtener partículas finas. Este polvo de caucho se empleó en diversas aplicaciones, especialmente en la mejora de mezclas asfálticas, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al aprovechamiento eficiente de materiales reciclados.

Figura 27:

Polvo de caucho



Fuente Elaboración Propia

4.4.2.1 Proceso de Obtención de Polvo de Caucho. Proceso mediante el cual los neumáticos reciclados se trituran y procesan hasta obtener polvo de caucho, listo para su uso en mezclas asfálticas.

A. *Recolección de Neumáticos Usados.* Se inicia recabando llantas fuera de uso, que vienen a ser el principal recurso en la generación de polvo de caucho. Estos neumáticos son transportados a una planta de reciclaje donde se clasificaron y prepararon para el proceso.

B. *Desmontaje y preparación.* Los neumáticos son desmontados para separar las partes metálicas y textiles, que son necesarios para la producción de polvo. Este proceso puede incluir el uso de maquinaria especializada para garantizar que solo se utilice el caucho.

C. *Trituración.* Una vez preparados, los neumáticos son triturados en máquinas que reducen su tamaño a partículas más pequeñas. Este proceso puede realizarse en varias etapas, comenzando con una trituración gruesa y luego pasando a una trituración más fina.

D. *Granulación.* Después de la trituración, el caucho se somete a un proceso de granulación, donde se obtienen partículas de tamaño uniforme. Con este paso se asegura que el polvo de caucho tenga características consistentes y adecuadas para su uso posterior.

E. *Tamizado.* El material granulado se tamiza para separar las partículas de diferentes tamaños, asegurando que solo se obtenga el polvo de caucho de la fracción deseada. Las partículas que no cumplen con los estándares de tamaño se pueden volver a triturar.

F. Almacenamiento y Distribución. El polvo de caucho obtenido se almacena en condiciones adecuadas a modo de prevenir la polución, así como el desgaste del material. Posteriormente, el material fue distribuido a diversas industrias, las cuales lo emplearon en aplicaciones como la fabricación de productos de caucho, la elaboración de mezclas asfálticas, así como en otros usos dentro del ámbito de la construcción y el deporte.

Tabla 9

Características del caucho en polvo

Componente	Porcentaje (%)
Caucho	20%
Caucho de Etileno	10%
Negro de Carbono	20%
Aditivos (azufre, plastificantes, antioxidantes, etc.)	10%

Fuente: Elaboración Propia

El caucho está compuesto por diversos elementos en proporciones específicas que, al ser procesados, permiten obtener un material con las propiedades adecuadas en su presentación en polvo, tal como lo señalan Alfayez, et al. (2020) en su investigación.

Caucho de Etileno-Propileno-Dieno (EPDM): Resistente a la intemperie y al ozono.

Negro de Carbono: Relleno que mejora la resistencia y durabilidad.

Aditivos: Incluyen azufre para vulcanización, plastificantes para mejorar la manejabilidad y antioxidantes para proteger contra la degradación.

Recuerde que esta es una formulación general y puede ajustarse según las necesidades específicas de cada aplicación.

4.5 Mezcla de Materiales

A objeto de delimitar esa cuantía óptima de polvo de caucho para la superficie analizada, fue definida la incorporación de distintas valías de polvo en analogía al peso del suelo seco. La superficie arcillosa inorgánica y el polvo de caucho fueron secadas en horno,

para posteriormente almacenarse dentro de envases plásticos. Dichas mezclas fueron estimadas en peso correspondientemente según las proporciones señaladas en Tabla 10.

Tabla 10

Mezcla de materiales

Combinación	Porcentaje de suelo arcilloso	Porcentaje de polvo de caucho	Simbología
Suelo arcilloso inorgánico	100	0	SAI
Polvo de caucho	0	100	PC
combinación 1 (10% PC)	90	10	SAI90- PC10
combinación 2 (15% PC)	85	15	SAI85- PC15
combinación 3 (20% PC)	80	20	SAI80- PC20

Fuente: Elaboración Propia

En el presente estudio se elaboraron diferentes combinaciones de suelo arcilloso inorgánico (SAI) con polvo de caucho (PC) en proporciones variables, con miras a estudiar el efecto del caucho como material mejorante en las particularidades físicas y mecánicas de la superficie.

SAI: Suelo Arcilloso inorgánico

PC: Polvo de Caucho

SAI90 – PC10: Suelo al 90% y polvo en caucho al 10%

SAI85 – PC15: Suelo al 85% y polvo en caucho al 15%

SAI80 – PC20: Suelo al 80% y polvo en caucho al 20%

Para precisar la cuantía porcentual óptima de polvo de caucho para el equilibrio de la superficie arcilloso inorgánico, se tuvo la necesidad de aplicar distintos ensayos de laboratorio con ejemplares del suelo natural, a su vez de mezclas integradas por desiguales proporciones de los materiales a usar. Los alcances logrados de la ejecución de dichas pruebas, resultaron primordiales para definir de los índices de trabajo óptimos, que permitieron planificar la ejecución a gran escala de las labores de estabilización en el camino proyectado.

Los especímenes representativos de arcilla inorgánica y polvo de caucho tuvieron sometimiento a pruebas de caracterización física con el fin de determinar sus propiedades. Asimismo, para evaluar aquellas peculiaridades de resistencia de la arcilla inorgánica mezclada con polvo de caucho, se consideraron de manera referencial, los valores obtenidos en la prueba CBR (California Bearing Ratio).

4.5.1. Granulometría de la muestra patrón

Para la calicata N° 01 apreciamos la cuantía porcentual que pasa por el tamiz N° 200 fue de 89%, lo que referenció que se trata de un suelo fino.

4.5.2. Clasificación SUCS y AASHTO de la muestra patrón

Bajo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la muestra patrón fue clasificada a partir del estudio granulométrico y los límites de Atterberg, los cuales determinaron el tipo de terreno en función de su textura y plasticidad. Este sistema permitió establecer si el material correspondía a un suelo fino (arcilla o limo) o a un suelo grueso (arena o grava), además de indicar su grado de plasticidad y comportamiento frente al agua.

Por otro lado, a través el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), la muestra patrón fue evaluada con base en su porcentaje de finos que pasan el tamiz N.º 200, los límites de plasticidad y el índice de grupo, con el propósito de determinar su idoneidad como material de subrasante o base en pavimentos.

Tabla 11

Clasificación SUCS y AASHTO

Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-7-6(23)
Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio y la aplicación de los sistemas de clasificación SUCS y AASHTO, el suelo evaluado fue clasificado como un suelo arcilloso inorgánico de baja plasticidad (CL).

Descripción Calicata 01

Progresiva: 11+154km

Profundidad: 1.50m

Dimensiones: 1.00m x 1.40m

Orientación: Noreste

Posteriormente, se trasladaron las muestras al laboratorio para ejecutar los ensayos correspondientes, entre ellos: determinación del contenido de humedad, análisis granulométrico mediante tamizado, límites de Atterberg, y la clasificación del suelo según los sistemas SUCS y AASHTO. Asimismo, se aplicaron los ensayos Proctor Modificado y CBR en el estado natural de las muestras, obteniéndose los resultados respectivos:

4.5.2.1 Análisis Granulométrico de la muestra patrón. Evaluación de la distribución de tamaños de partículas en la muestra patrón para verificar su uniformidad y cumplimiento de especificaciones.

Calicata: C-01

Muestra: M-01

Profundidad (m): 0.00-1.50

Descripción de la muestra:

Límite líquido	=	47.30%
Límite Plástico	=	23.70%
Índice de Plasticidad	=	23.80%
Clasificación AASHTO	=	A-7-6 (23)

material de suelo arcilloso (MS). La muestra patrón (C-1) presentó un límite líquido de 47.30%, característico de suelos de alta plasticidad.

Figura 29:

Límite Plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Límite Plástico c-01

Descripción	muestra patrón c-1	MS+ 10% de polvo en caucho	MS+ 15% de polvo en caucho	MS+ 20% de polvo en caucho
Límite Plástico (%)	23.70%	30.10%	26.40%	-

Fuente: Elaboración Propia

En el ensayo de Límite Plástico (LP) se observó un comportamiento variable del suelo al incorporar diferentes proporciones de polvo de caucho. La muestra patrón (C-1) presentó un valor de 23.70%, mientras que al adicionar 10% de polvo de caucho, el límite plástico aumentó a 30.10%, indicando una mayor cohesión del material. Sin embargo, al incrementar la proporción a 15%, el valor descendió a 26.40%, y en la mezcla con 20% no se obtuvo un resultado definido debido a la pérdida de cohesión del material.

A. Descripción Calicata 02

Progresiva: 10+650km

Profundidad: 1.50m

Dimensiones: 1.00m x 1.40m

Orientación: Noreste

Posteriormente, se trasladaron las muestras al laboratorio para ejecutar los ensayos correspondientes, entre ellos: determinación del contenido de humedad, análisis granulométrico mediante tamizado, límites de Atterberg, y la clasificación del suelo según los sistemas SUCS y AASHTO. Asimismo, se aplicaron los ensayos Proctor Modificado y CBR en el estado natural de las muestras, obteniéndose los resultados respectivos:

A. *Análisis Granulométrico de la muestra patrón.*

Calicata: C-02

Muestra: M-01

Profundidad (m): 0.00-1.50

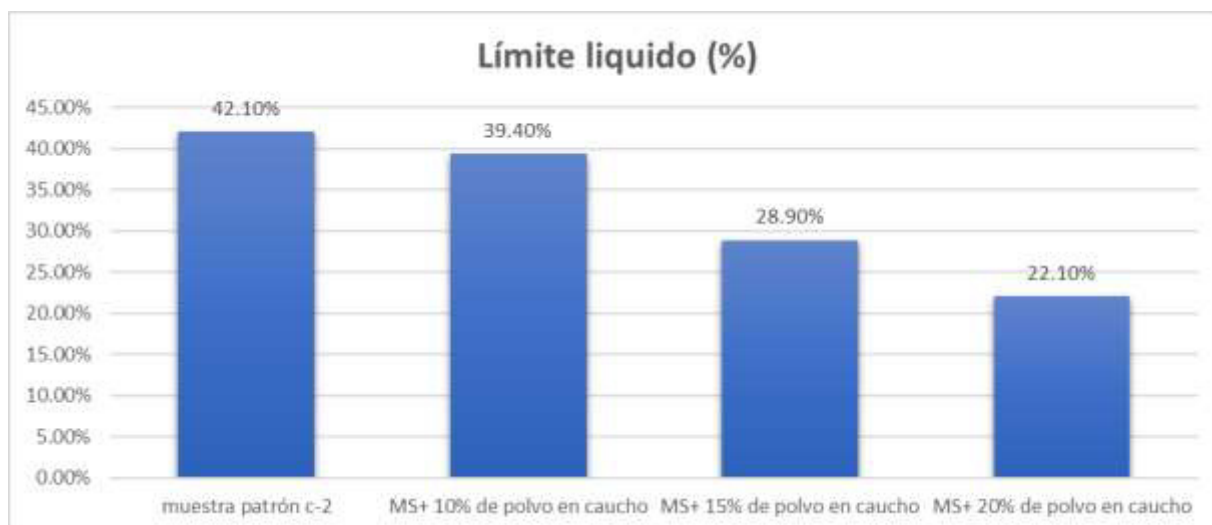
B. *Descripción de la muestra.*

Límite líquido	=	42.10%
Límite Plástico	=	22.70%
Índice de Plasticidad	=	19.40%
Clasificación AASHTO	=	A-7-6 (17)
Clasificación SUCS	=	CL
Contenido de Humedad	=	7.20%

4.5.3.2 Límite de Atterberg C-2. Referente a la descripción del suelo, identificamos que la arcilla inorgánica de baja compresibilidad. Un 11% de arena grano fino fracción fina pasante la malla N°200 en un 89% plástico a muy plástico donde el LL= 42.10% y el IP= 19.40%, poco húmedo.

Figura 30:

Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

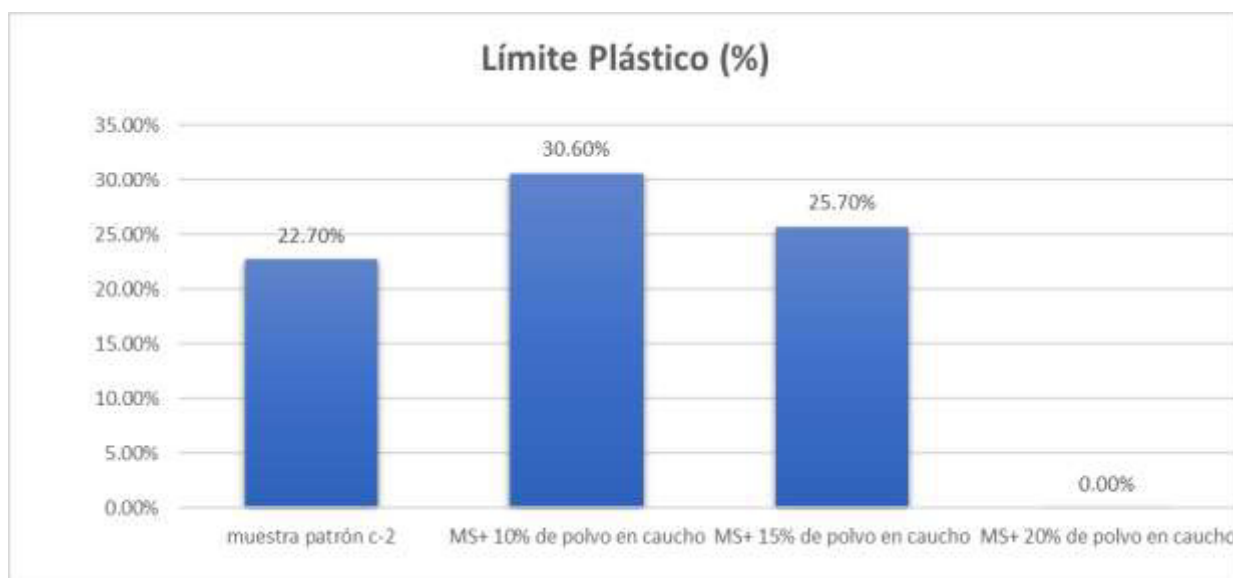
Límite líquido c-2

Descripción	muestra patrón c-2	MS+ 10% de polvo en caucho	MS+ 15% de polvo en caucho	MS+ 20% de polvo en caucho
Límite líquido (%)	42.10%	39.40%	28.90%	22.10%

Fuente: Elaboración Propia

En esta prueba correspondiente a la muestra C-2, se evidenció una disminución progresiva del contenido de humedad límite cuando se eleva la cuantía porcentual de polvo de caucho. La muestra patrón registró un 42.10%, al tiempo que incorporándose 10% de caucho, el valor manifestó una merma a 39.40%; con 15%, disminuyó aún más a 28.90%, y finalmente, con 20%, alcanzó 22.10%.

Este comportamiento indica que el polvo de caucho reduce la competencia del suelo para la infiltración, disminuyendo su plasticidad al igual que la tendencia a deformarse con variaciones de humedad. En consecuencia, el adicionamiento de caucho mejora esa estabilidad volumétrica de la superficie, haciéndolo más apto para su uso en capas de subrasante dentro del diseño de pavimentos flexibles.

Figura 31:*Límite Plástico*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15*Límite Plástico c-02*

Descripción	muestra patrón c-2	MS+ 10% de polvo en caucho	MS+ 15% de polvo en caucho	MS+ 20% de polvo en caucho
Límite Plástico (%)	22.70%	30.60%	25.70%	-

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el contenido de polvo de caucho influye significativamente en la plasticidad del material. El incremento de un 10% de caucho genera un aumento notable en el límite plástico, lo que indica una mayor capacidad del suelo para deformarse sin romperse. Sin embargo, al incrementar el contenido a 15%, el valor disminuye ligeramente, lo que sugiere una pérdida de cohesión debido al exceso de material no plástico. En la mezcla con 20% de caucho, no se obtuvo un valor representativo, posiblemente por la falta de homogeneidad o por el comportamiento granular predominante del caucho. Estos resultados evidencian que la adición moderada de caucho

(alrededor del 10%) mejora las propiedades plásticas del suelo, mientras que porcentajes mayores tienden a reducir dicha mejora por la alteración de la matriz fina del material.

A. Descripción Calicata 03

Progresiva: 10+150km

Profundidad: 1.50m

Dimensiones: 1.00m x 1.40m

Orientación: Noreste

Posteriormente, se trasladaron las muestras al laboratorio para ejecutar los ensayos correspondientes, entre ellos: determinación del contenido de humedad, análisis granulométrico mediante tamizado, límites de Atterberg, y la clasificación del suelo según los sistemas SUCS y AASHTO. Asimismo, se aplicaron los ensayos Proctor Modificado y CBR en el estado natural de las muestras, obteniéndose los resultados respectivos:

B. Granulometría de la muestra patrón

Calicata: C-03

Muestra: M-01

Profundidad (m): 0.00-1.50

C. Descripción de la muestra:

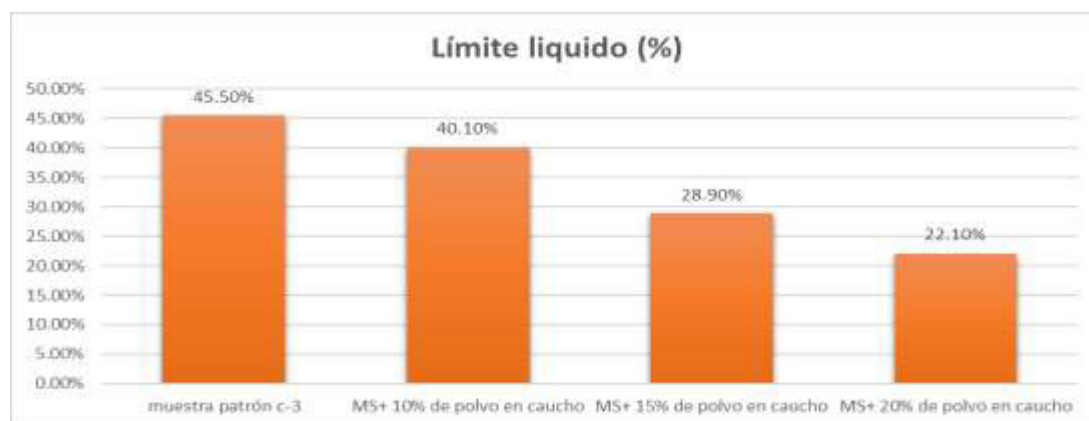
Límite líquido	=	45.50%
Límite Plástico	=	23.90%
Índice de Plasticidad	=	21.60%
Clasificación AASHTO	=	A-7-6 (18)
Clasificación SUCS	=	CL
Contenido de Humedad	=	8.80%

4.5.3.3 Límite de Atterberg C-3. Referente a la descripción del suelo, identificamos que la arcilla inorgánica de baja compresibilidad. Un 11% de arena grano fino fracción

finas pasante la malla N°200 en un 89% plástico a muy plástico donde el LL= 45.50% y el IP= 21.60%.

Figura 32:

Límite líquido



Fuente: Elaboración propia.

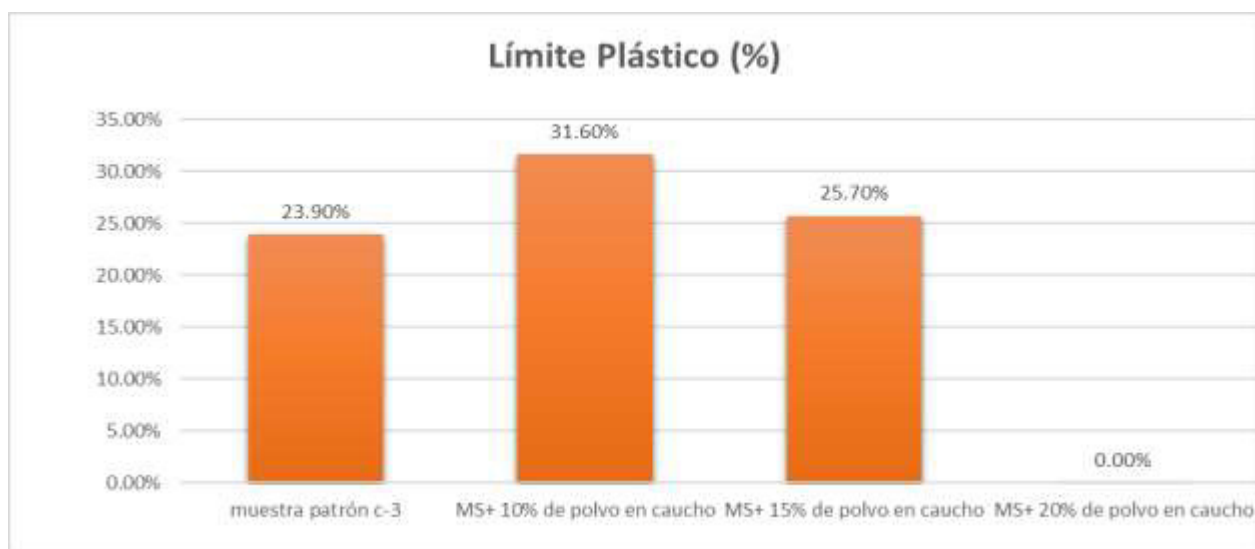
Tabla 16

Límite Líquido c-03

Descripción	muestra patrón c-3	MS+ 10% de polvo en caucho	MS+ 15% de polvo en caucho	MS+ 20% de polvo en caucho
Límite líquido (%)	45.50%	40.10%	28.90%	22.10%

Fuente: Elaboración Propia

Se observa una disminución progresiva del límite líquido conforme aumenta el porcentaje de polvo de caucho en la mezcla. El valor del límite líquido disminuye de 45.50% en la muestra patrón a 22.10% con 20% de caucho, lo cual indica una reducción en la plasticidad y en la capacidad de retener agua del suelo. Este comportamiento se debe a que el polvo de caucho actúa como un material no cohesivo y de baja absorción, que reemplaza parcialmente la fracción fina del suelo, reduciendo su capacidad de hidratación y su comportamiento plástico. En conclusión, la incorporación de polvo de caucho mejora la estabilidad volumétrica del material, haciéndolo menos susceptible a variaciones de humedad, siendo más notorio este efecto a partir del 15% de adición.

Figura 33:*Límite plástico*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17*Límite plástico c-03*

	muestra patrón	MS+ 10% de	MS+ 15% de	MS+ 20% de
Descripción	c-3	polvo en caucho	polvo en caucho	polvo en caucho
Límite Plástico				
(%)	23.90%	31.60%	25.70%	-

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de los resultados se aprecia que la adición de 10% de polvo de caucho incrementa el límite plástico del suelo, alcanzando un valor de 31.60%, lo que sugiere una mayor capacidad del material para deformarse sin agrietarse. Sin embargo, al aumentar la proporción de caucho a 15%, el límite plástico disminuye a 25.70%, reflejando una reducción en la cohesión y plasticidad del material.

En la mezcla con 20% de polvo de caucho no se obtuvo un valor definido, posiblemente debido a la pérdida de cohesión de la muestra, ocasionada por el exceso de material no plástico. En conclusión, se evidencia que la adición moderada de polvo de caucho (10%) mejora el comportamiento plástico del suelo, mientras que porcentajes

mayores tienden a disminuir su cohesión y plasticidad natural, afectando la consistencia del material.

4.5.4. Proctor Modificado

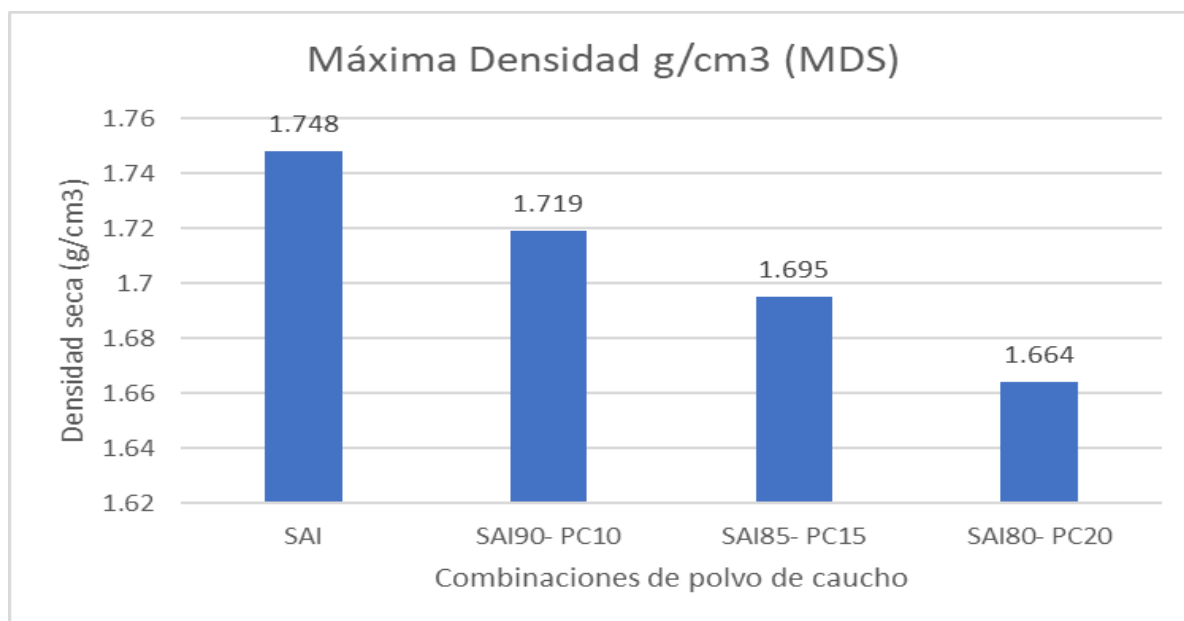
Tabla 18

Proctor Modificado

Proctor Modificado			
Muestras	Óptimo contenido de Humedad %		Máxima Densidad g/cm ³
	(OCH)		(MDS)
SAI	17.50%		1.748
SAI90- PC10	18.10%		1.719
SAI85- PC15	18.80%		1.695
SAI80- PC20	19%		1.664

Fuente: Elaboración Propia.

Del análisis de los resultados se observa que, al incrementar el porcentaje de polvo de caucho, el óptimo contenido de humedad aumenta progresivamente, mientras que la máxima densidad seca disminuye. Este comportamiento se debe a que el polvo de caucho posee menor peso específico y mayor elasticidad en comparación con las partículas minerales del suelo, lo cual reduce la compactación efectiva y aumenta la cantidad de agua requerida para alcanzar la densidad máxima. En consecuencia, se evidencia que la inclusión de caucho modifica las características de compactación del suelo, haciendo que el material sea más liviano y con mayor absorción de humedad, siendo estos efectos más notorios a partir de adiciones del 15% en adelante.

Figura 34:*Máxima Densidad*

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 34 se observa que la máxima densidad seca se obtiene al adicionar 10% de polvo de caucho, la máxima densidad seca es de 1.748 g/cm³. Esto nos da como resultado que al adicionar polvo de caucho descende la compactación con la reducción de vacíos, por lo tanto, baja la densidad del suelo.

4.5.5. Ensayo CBR

En la tabla 19 se muestra los valores de CBR al 95% y al 100 % que tiene el suelo natural, a continuación, se muestra el análisis de la calicata 01, 02 y 03.

Tabla19*Ensayo CBR*

Muestras	CBR al 100%	
	CBR al 95%	
Calicata 01	4.3	7.2
Calicata 02	4.5	7.4
Calicata 03	4.6	7.5

Fuente: Elaboración Propia

Es observable que las valías de CBR aumentan al incrementar el grado de compactación del 95% al 100%, evidenciando una mejor densificación y capacidad portante del material. Asimismo, los valores promedio de CBR indican que el suelo natural presenta una baja capacidad de soporte, ubicándose dentro de la clasificación de suelos de subrasante de calidad regular a baja, común en materiales finos con alto contenido de humedad.

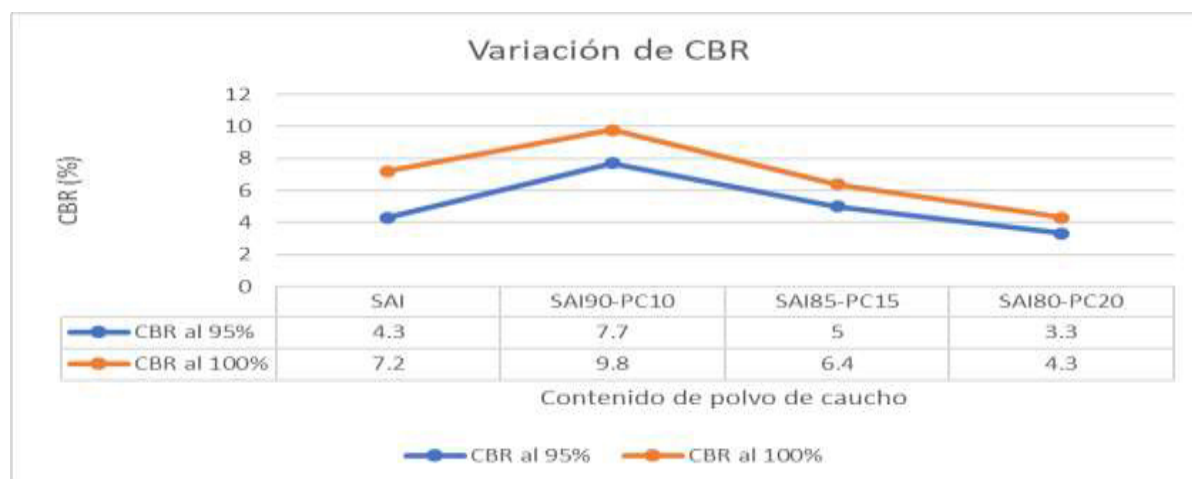
Tabla 20

Combinaciones de CBR

Muestras	CBR al 95%	CBR al 100%
SAI	4.3	7.2
SAI90-PC10	7.7	9.8
SAI85-PC15	5.0	6.4
SAI80-PC20	3.3	4.3

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de resultados se observa que la adición del 10% de polvo de caucho genera un incremento significativo en los valores de CBR, alcanzando 7.7% al 95% y 9.8% al 100%, lo que evidencia una mejora en la resistencia y capacidad de soporte del suelo. Sin embargo, al aumentar el contenido de caucho a 15% y 20%, los valores de CBR disminuyen progresivamente, debido a que el exceso de caucho reduce la compactación efectiva y disminuye la fricción interna entre las partículas del suelo.

Figura 35:*CBR (Resistencia)*

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en laboratorio se obtuvieron analizando las diferentes combinaciones de polvo de caucho el porcentaje máximo de CBR se logra al adicionar el 10 % de polvo de caucho al suelo de la subrasante.

Para determinar el número de cargas repetidas o el número de ejes equivalentes hasta la falla, se emplean métodos de diseño estructural basados en modelos mecanicistas-empíricos como el de la Guía AASHTO 1993, y se complementan con ensayos de laboratorio como el triaxial cíclico, triaxial no confinado o el ensayo de fatiga en mezcla asfáltica, dependiendo de la capa analizada.

A continuación, te explico cómo se determina ese valor y cómo influye el caucho en polvo en la resistencia a cargas repetidas.

Se determina con la siguiente fórmula de la Guía AASHTO 1993:

$$\log_{10}(N) = Z_r \cdot S_o + 9.36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right) \cdot \frac{1}{(0.40 + 1094 / (SN + 1)^{5.19})} + 2.32 \cdot \log_{10}(MR) - 8.07$$

Donde:

N= Número de ejes equivalentes hasta la falla.

SN= Número estructural del pavimento

MR = módulo resiliente de la subrasante (psi o MPa)

Zr = valor de confiabilidad (por ejemplo, -1.036 para 85 %)

So = desviación estándar combinada del diseño (ej. 0.45)

Δ PSI = pérdida permisible de servicio (ej. 1.8)

Tabla 21

Aplicación de ejes equivalentes hasta la falla

% de caucho en polvo	MR (psi)	SN estimado
0 % (natural)	6,498.46	4.400
10 %	9,435.07	3.850
15 %	7,157.01	4.250
20 %	5,485.80	4.660

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis se observa una tendencia creciente del módulo resiliente (MR) conforme se incrementa el contenido de polvo de caucho. Este comportamiento indica una mejora progresiva en la elasticidad y capacidad de recuperación del material ante cargas repetitivas.

4.6. Cálculo de cantidades por m³

La densidad seca máxima (Proctor Mod.) del material con 10% de caucho: $\gamma_{d,max} = 1.719 \text{ t/m}^3$ y OCH = 18.1%. Entonces, por 1 m³ compactado:

- Masa seca total $\approx 1,719 \text{ kg/m}^3$.
- Caucho (10%) $= 0.10 \times 1,719 = 172 \text{ kg/m}^3$.
- Suelo (90%) $= 1,547 \text{ kg/m}^3$.
- Agua para OCH $\approx 0.181 \times 1,719 = 311 \text{ kg} \approx 0.31 \text{ m}^3$.

La densidad seca máxima (Proctor Mod.) del material con 15% de caucho: $\gamma_{d,max} = 1.682 \text{ t/m}^3$ y OCH = 20.4%. Entonces, por 1 m³ compactado:

- Masa seca total por $m^3 = 1,682 \text{ kg/m}^3$
- Caucho (15%) = $0.15 \times 1,682 = 252 \text{ kg/m}^3$
- Suelo (85%) = $1,430 \text{ kg/m}^3$
- Agua (OCH 20.4%) = $0.204 \times 1,682 = 343 \text{ kg} \approx 0.34 \text{ m}^3$ agua.

La densidad seca máxima (Proctor Mod.) del material con 15% de caucho: $\gamma_{d,\max} = 1.619 \text{ t/m}^3$ y OCH = 22.8%. Entonces, por 1 m^3 compactado:

- Masa seca total por $m^3 = 1,619 \text{ kg/m}^3$
- Caucho (20%) = $0.20 \times 1,619 = 324 \text{ kg/m}^3$
- Suelo (80%) = $1,295 \text{ kg/m}^3$
- Agua (OCH 22.8%) = $0.228 \times 1,619 = 369 \text{ kg} \approx 0.37 \text{ m}^3$ agua

Con esto, la cantidad de caucho para Ultupuquio (propuesta): $\approx 172 \text{ kg}$ por cada m^3 de subrasante mejorada (10% en peso seco), sustentado por que el 10% dio el mayor CBR.

4.7. Metodología -Abastecimiento de caucho en Polvo

En el despliegue del presente compendio investigativo fueron considerados además de los ensayos de laboratorio, la viabilidad de abastecimiento del caucho en polvo requerido para la optimización de la subrasante, en este sentido se realizó:

4.7.1. Reconocimiento de fuentes de suministro

Se buscaron proveedores en la región de Áncash, encontrándose una empresa recicladora de neumáticos en la ciudad de Huaraz, dedicada a la trituration y transformación de caucho en polvo para fines constructivos y ambientales.

4.7.2. Cotización local

Se solicitó una cotización referencial en dicha empresa, obteniéndose un precio de S/ 0.60 por kilogramo de caucho en polvo, valor considerablemente más bajo que las referencias de mercado nacional.

4.7.3. Ventajas logísticas

La ubicación del proveedor en Huaraz representa una ventaja frente a la demanda de la localidad de Utulpuquio (Chavín de Huántar, provincia de Huari), ya que reduce costos de transporte en comparación con la importación o compra en Lima.

Además, el caucho reciclado contribuye al manejo sostenible de desechos sólidos (neumáticos fuera de uso) en el lugar, alineándose con los criterios de sostenibilidad ambiental.

4.8. Aplicación en el análisis de costos

Para efectos del análisis económico de los APU, se consideró el precio local obtenido en Huaraz (S/ 0.60/kg). Esto permite evaluar con mayor realismo la viabilidad de aplicar el 10% de caucho en polvo como estabilizador de la subrasante en Utulpuquio.

Tabla 22

Precios de los diferentes porcentajes de caucho en polvo al 10%, 15% y 20%

Dosificación	Item	Unidad	Cantidad	PU (S/)	Costo (S/)
10%	Caucho en polvo	kg	172	0.6	103.2
10%	Agua para mezcla	m3	0.31	1.5	0.465
15%	Caucho en polvo	kg	252	0.6	151.2
15%	Agua para mezcla	m3	0.34	1.5	0.51
20%	Caucho en polvo	kg	324	0.6	194.4
20%	Agua para mezcla	m3	0.37	1.5	0.555

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis se aprecia que el costo total de la mezcla aumenta proporcionalmente al incremento del porcentaje de caucho en polvo, debido al mayor consumo del material reciclado en cada dosificación. Sin embargo, el costo unitario del caucho (S/ 0.60 por kg) se mantiene constante, reflejando una alternativa económica y sostenible frente a otros aditivos de mejora del suelo.

Tabla 23*APU caucho al 10%*

Rendimiento	150m3 DIA	Costo Unitario por m3		137.14	
Mano de obra	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial(S/)
Operador motoniveladora	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operador rodillo	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operador cisterna	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operario	hh	1.0000	0.0533	28.39	1.51
Peón	hh	2.0000	0.1067	20.22	2.16
				137.44	8.41
Materiales					
Caucho en polvo	kg		172	0.6	103.20
Agua para mezcla	m3		0.31	1.5	0.465
					103.67
Equipo					
Motoniveladora 140-160					
HP	hm		0.0533	120	6.4
Rodillo liso vibratorio 10-					
12t	hm		0.0533	90	4.8
Cisterna 8-10 m3	hm		0.0533	60	3.2
Cargador frontal (uso					
acopio)	hm		0.1067	100	10.67
					25.07

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con el estudio de costos unitarios, pudo determinarse que para una dosificación con 10% de caucho en polvo, el costo total por 150 m³ de mezcla asciende a S/ 137.14.

Tabla 24*APU caucho al 15%*

Rendimiento	150m3 DIA	Costo Unitario por m3			185.19
Mano de obra	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial(S/)
Operador motoniveladora	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operador rodillo	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operador cisterna	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operario	hh	1.0000	0.0533	28.39	1.51
Peón	hh	2.0000	0.1067	20.22	2.16
					8.41
Materiales					
Caucho en polvo	kg		252	0.6	151.20
Agua para mezcla	m3		0.34	1.5	0.510
					151.71
Equipo					
Motoniveladora 140-160 HP	hm		0.0533	120	6.4
Rodillo liso vibratorio 10-12t	hm		0.0533	90	4.8
Cisterna 8-10 m3	hm		0.0533	60	3.2
Cargador frontal (uso acopio)	hm		0.1067	100	10.67
					25.07

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con el estudio de costos por unidad, pudo determinarse que para una dosificación con 15% de caucho en polvo, el costo total por 150 m³ de mezcla asciende a S/ 185.19.

Tabla 25

APU caucho al 20%

Rendimiento	150m3 DIA	Costo Unitario por m3			228.43
Mano de obra	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial(S/)
Operador motoniveladora	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operador rodillo	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operador cisterna	hh	1.0000	0.0533	29.61	1.58
Operario	hh	1.0000	0.0533	28.39	1.51
Peón	hh	2.0000	0.1067	20.22	2.16
					8.41
Materiales					
Caucho en polvo	kg		324	0.6	194.40

Agua para mezcla	m3	0.37	1.5	0.555
				194.96

Equipo

Motoniveladora 140-160

HP	hm	0.0533	120	6.4
Rodillo liso vibratorio 10-12t	hm	0.0533	90	4.8
Cisterna 8-10 m3	hm	0.0533	60	3.2
Cargador frontal (uso acopio)	hm	0.1067	100	10.67
				25.07

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con el estudio de costos por unidad, pudo determinarse que para una dosificación con 20% de caucho en polvo, el costo total por 150 m³ de mezcla asciende a S/ 228.43.

Tabla 26

Comparativa – referencias Revista Costos y APU

Tipo de estabilizador	Presentación	Unidad de medida	Metrado	Costo	Precio Unitario	Caucho en polvo	
						Metrado patrón de caucho en polvo	Costo comparativo
Cemento Sol							
Tipo I	Bolsa	kg	42.5	30	0.71 x kg	20 kg	S/ 14.20
Cal AASHTO	Bolsa	kg	20	17.9	0.90 x kg	20 kg	S/ 18.00
Cloruro de							
calcio	Bolsa	kg	25	58	2.32 x kg	20 kg	S/ 46.40
Caucho en							
polvo	Bolsa	kg	30	18	0.6 x kg	20 kg	S/ 12.00

Fuente: Elaboración Propia

Nota. Velocidad de Diseño en un tramo homogéneo. Adaptado por, " *Manual de Carreteras Diseño Geométrico DG- 2018* por Ministerio de Transportes y Comunicaciones" (p.97) por (MTC, 2018)

Rangos de la velocidad de diseño en función a la clasificación de la carretera por demanda y orografía.

4.9.1. Características de Diseño

Las características del tránsito están referidas a la predicción de los volúmenes de demanda, su composición y la evolución de las mismas, y las variaciones que puedan experimentar a lo largo de la vida útil del proyecto, siendo los principales indicadores para este tipo de carreteras: el índice Medio Anual (IMDA), la clasificación por tipo de vehículo y crecimiento de Tránsito.

La evaluación, del tránsito ha tomado en cuenta las diferentes categorías de vehículos, a continuación, escribimos dichas categorías:

- Vehículos ligeros: Automóviles, camionetas hasta 1,500 kg
- Camiones: Unidad simple para Transporte de carga.

El estudio de tráfico para el presente estudio es de 73 vehículo/día para tramo de Ultupuquio.

4.9.2. Velocidad de Diseño

Para el presente la velocidad de diseño corresponde a 30 km/h. Es recomendable en una vía que la velocidad sea una sola, la combinación de velocidades aumenta el peligro para el usuario.

La velocidad directriz definida es uniforme, y será la máxima que se pondrá mantener con seguridad en la carretera, cuando las circunstancias sean favorables para que prevalezcan las condiciones de diseño. La velocidad directriz condiciona todas las características geométricas de la vía, su definición está íntimamente ligada al costo de construcción de cada carretera. Para una velocidad directriz alta, el diseño vial obliga, entre

otros, al uso de mayores anchos de plataforma y mayores radios de giro en las curvas horizontales lo que trae como consecuencia el incremento de los volúmenes de obra.

Para la elección de la velocidad directriz, consideramos lo siguiente;

- Desde el punto de vista de seguridad, es preferible no emplear la mayor velocidad posible de diseño.
- Se trata de lograr un diseño económico considerando los costos de construcción.
- La velocidad directriz elegida, corresponde a la máxima velocidad que se podrá mantener con seguridad sobre una sección determinada de cada carretera.

La velocidad propuesta contempla a la definición de todas las características geométricas que define en el presente proyecto de acuerdo a las Normas de Diseño de carreteras DG-2018.

4.9.3. Sección transversal

La sección transversal de una carretera en un punto, es un corte vertical normal al alineamiento horizontal, el cual permite definir la disposición y dimensiones de los elementos que forman la carretera en un punto correspondiente a cada sección y su relación con el terreno natural.

Los elementos que integran y definen la sección transversal son: ancho o derecho de vía, calzada o superficie de rodadora, bermas, carriles, cunetas, taludes y elementos complementarios, para el tramo km 10+650 al km 11+154 se ha establecido un ancho de 4 m.

4.9.4. Calzada

De acuerdo a las recomendaciones de la Norma DG-2018 y en función a la clasificación de la carretera tipo IMDA y la velocidad de diseño, se determina que el ancho de la calzada sea 4.00 metros para el tramo mencionado (Con mira de proyección a carretera de tercera clase con las propiedades que manda la normativa vigente) de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 28*Anchos mínimos de calzada en tangente*

Clasificación		Autopista								Carretera				Carretera				Carretera			
Tráfico vehículos/ día		>6000				6000-4001				4000-2001				2000-400				<400			
Tipo		Primera clase				Segunda clase				Primera clase				Segunda clase				Tercera clase			
Orografía		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Velocidad de diseño	30 km/h																			6,00	6,00
	40 km/h																6,60	6,60	6,60	6,00	
	50 km/h											7,20	7,20			6,60	6,60	6,60	6,60	6,00	
	60 km/h					7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	6,60	6,60	6,60	6,60		
	70 km/h			7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	6,60		6,60	6,60		
	80 km/h	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20		7,20	7,20			6,60	6,60		
	90 km/h	7,20	7,20	7,20		7,20	7,20	7,20		7,20	7,20			7,20				6,60	6,60		
	100 km/h	7,20	7,20	7,20		7,20	7,20	7,20		7,20				7,20							
	110 km/h	7,20	7,20			7,20															
	120 km/h	7,20	7,20			7,20															
	130 km/h	7,20																			

Nota. Velocidad de Diseño en un tramo homogéneo. Adaptado por “Manual de Carreteras Diseño Geométrico DG- 2018” por MTC (2018)

4.9.5. Parámetros para el diseño (referenciales)

- Tipo de vía: Caminos vecinales rurales
- Tránsito proyectado: Bajo (tercera clase) <400
- Vida útil: 10 años
- Normativa: Manual de Carreteras – DG-2018 (Capítulo de diseño de pavimentos no urbanas)
- Método de diseño: Método CBR (empírico)
- Considerando subrasante como capa inferior de apoyo.

4.9.6. Comparación de espesores de diseño (referencial)

Según la metodología del MTC, a menor CBR de subrasante, se requieren mayores espesores de base y/o subbase para compensar su baja capacidad portante. Se presenta a continuación un cuadro comparativo de espesores típicos propuestos para un pavimento flexible:

Tabla 29*Comparación de espesores de diseño (referencial)*

Mezcla / CBR Subrasante	Espesor Subrasante (m)	Espesor Subbase (m)	Espesor Base (m)	Carpeta Asfáltica (m)	Espesor Total (m)
Subrasante natural (4.3)	0.4	0.55	0.2	0.05	0.80
Con 10% caucho en polvo (7.7)	0.3	0.45	0.15	0.05	0.65
Con 15% caucho en polvo (5.0)	0.28	0.50	0.2	0.05	0.75
Con 20% caucho en polvo (3.3)	0.25	0.65	0.2	0.05	0.90

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis se observa que el espesor total del pavimento disminuye cuando se mejora la capacidad portante de la subrasante mediante la incorporación de 10% de polvo de caucho, alcanzando un valor de 0.65 m, lo que representa una reducción de 18.75% respecto al espesor del suelo natural (0.80 m).

Tabla 30*Parámetros considerados para la comparación en durabilidad y vida útil del pavimento flexible*

Parámetro clave	Subrasante Natural	+10 % Caucho	+15 % Caucho	+20 % Caucho
CBR (%)	4.3	7.7	5.0	3.3
Espesor de subbase (cm)	55	45	50	65

Espesor total del pavimento (cm)	80	65	75	75
Vida útil estimada (años)	10	15	13	12
Frecuencia de mantenimiento mayor	Cada 5 años	Cada 7 años	Cada 6 años	Cada 6 años

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de los resultados se evidencia que la adición del 10% de caucho en polvo mejora significativamente las propiedades estructurales del suelo, incrementando el CBR y el módulo resiliente, lo que permite reducir los espesores del pavimento y prolongar la vida útil hasta 15 años. Sin embargo, al incrementar el contenido de caucho a 15% y 20%, se observa una disminución progresiva de la rigidez y capacidad portante, lo que repercute en una menor durabilidad estructural y una frecuencia de mantenimiento más frecuente.

- El CBR se obtuvo de los ensayos comparativos realizados en la subrasante con y sin adición de caucho en polvo.
- El Módulo Resiliente (MR) se calculó en función del CBR, lo que permitió estimar la capacidad de recuperación elástica de la subrasante.
- El espesor de subrasante y el espesor total del pavimento provinieron de los cálculos de diseño AASHTO 93 aplicados en la tesis.
- La vida útil estimada se proyectó en base al desempeño estructural y el tránsito (ESALs) considerado.
- La frecuencia de mantenimiento mayor se estimó considerando el deterioro acumulado y la necesidad de intervenciones a lo largo de la vida útil del pavimento

Esto se alinea con estudios como el de Flores et al. (2022) y Alfayez et al. (2020), que reportan que: “El uso de caucho reciclado en capas estructurales puede prolongar la vida

útil del pavimento hasta en un 30-40 %, dependiendo de la dosificación y condiciones climáticas” (p.3)

Diversos estudios recientes como Padilha et al. (2022) exploraron la capacidad del caucho en polvo (crumb rubber) para reducir el espesor requerido de la capa de rodadura en pavimentos flexibles, sin sacrificar su vida útil ni desempeño estructural. En un ensayo comparativo, se calculó que mezclas asfálticas modificadas con caucho permitieron reducir al menos un 50 % del espesor de la capa superficial, manteniendo una vida útil equivalente a la mezcla convencional de referencia. Este hallazgo fue particularmente relevante ya que la resistencia a la fatiga de las mezclas con caucho fue sustancialmente mayor, habilitando diseños más delgados sin comprometer la durabilidad.

Además, Guerrero et al. (2024) menciona que una revisión integral de aplicaciones del crumb rubber en infraestructuras viales concluyó que, con una dosificación adecuada (entre 15–20 % del peso del ligante bituminoso), se logró una performance mecánica superior que, en consecuencia, permitía ahorros en el espesor estructural del pavimento y reducciones significativas en impactos ambientales.

Para Vijay (2018) el caso de estabilización de subsuelos con 15 % de caucho reciclado granulado como aditivo físico, se observó una disminución de aproximadamente un 14 % en el espesor necesario del pavimento, para distintos niveles de intensidad de tráfico.

En síntesis, los datos más recientes indicaron que:

- Las mezclas tipo “asphalt rubber” permitieron una reducción del espesor superficial en torno al 50 %, manteniendo iguales niveles de fatiga y vida útil. Padilha et al. (2022).
- En el diseño estructural general, adecuando la dosificación de crumb rubber (15-20 %), se consiguieron mejoras mecánicas que soportaron diseños más delgados con ahorro de material y menor impacto ambiental. Guerrero et al. (2024).

- En subrasantes tratadas con 15 % de caucho, se logró reducir el espesor total del pavimento en alrededor de 14 %, especialmente en condiciones de tránsito bajo a moderado. Vijay (2018).

V.DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Ventajas del uso de caucho en polvo frente a otros aditivos

El empleo de caucho en polvo como aditivo en la estabilización de la subrasante presentó ventajas significativas cuando se compara con otros materiales comúnmente utilizados, como la cal, el cemento Portland, las cenizas volantes u otros polímeros sintéticos, estas ventajas pudieron analizarse en distintos planos:

Tabla 31

Comportamiento mecánico y desempeño de la subrasante

Caucho en polvo	Cal y cemento	Cenizas Volantes	Polímeros sintéticos
Optimiza la resistencia al corte, la capacidad de soporte (CBR) y la resiliencia elástica del suelo, reduciendo la deformación permanente bajo cargas repetidas de tránsito. Además, incrementa la durabilidad frente a fenómenos de fatiga.	Aportan rigidez y aumentan la resistencia inicial, pero pueden generar fragilidad en el suelo tratado, con fisuración prematura ante cargas dinámicas y cambios térmicos.	Mejoran la trabajabilidad y reducen la plasticidad de suelos arcillosos, pero requieren condiciones de humedad y curado estrictas para alcanzar su máximo desempeño.	Ofrecen buena capacidad estabilizante, pero a un costo elevado y con limitada disponibilidad en contextos rurales.

Fuente: Elaboración Propia

El caucho genera una mezcla más flexible y resiliente, condición crucial para pavimentos en zonas altoandinas con cambios bruscos de temperatura, como en Áncash.

Tabla 32*Costo-beneficio y disponibilidad.*

Caucho en polvo	Cal y cemento	Cenizas Volantes	Polímeros sintéticos
Aunque disponibles			
Proviene del reciclaje de neumáticos fuera de uso, lo que lo hace relativamente económico y accesible, además de resolver un problema ambiental de disposición final.	en el mercado nacional, implican un costo elevado de transporte hacia zonas rurales de la sierra, incrementando el costo total del proyecto.	No siempre se encuentran en la región andina, lo que limita su aplicación práctica.	Son importados y tienen precios muy superiores al caucho.

Fuente: Elaboración Propia

En términos de costo–beneficio, el caucho en polvo se posiciona como la alternativa más eficiente y sostenible, al combinar bajo costo, disponibilidad creciente y valor ambiental agregado mediante el reaprovechamiento de residuos.

Tabla 33*Presupuesto del Pavimento flexible + 0% de caucho en polvo*

PRESUPUESTO					
Presupuesto	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES				
Tesista	Cajaleón Gómez, Javier Gustavo				
Lugar	Ultupuquio -Huaraz				
Muestra	Pavimento flexible + 0% de caucho en polvo				
Item	Descripción	Und	Metrado	Precio S/.	Parcial
01.00.00	Obras preliminares				5,326.72
01.01.00	Movilización y desmovilización	Glb	1.00	5326.72	5,326.72
2.00.00	Movimiento de Tierras				9,678.56
2.01.00	Perfilado, nivelación y compactación de la subrasante en zonas de corte	m2	4,016.00	2.41	9,678.56
3.00.00	Pavimentos				227,895.95
03.01.00	Sub base granular E=55 cm	m3	1,204.80	57.5	69,276.00
03.02.00	Base Granular E= 20 cm	m3	803.20	72.94	58,585.41
03.03.00	Carpeta asfáltica en caliente E= 5cm	m3	200.80	498.18	100,034.54

Costo Directo		S/ 242,901.23
Gastos Generales 10.114%	10.114%	24,567.03
Utilidad 10%	10%	24,290.12
Subtotal		291,758.39
IGV	18%	52,516.51
Presupuesto total		S/ 344,274.90

Fuente: Elaboración Propia

El presupuesto presentado corresponde al diseño de pavimento flexible con subrasante natural (0 % de caucho en polvo). En proyectos comparativos, la incorporación de caucho en polvo en proporciones de 10 %, 15 % y 20 % puede modificar los costos directos y los espesores de capa, reflejando una optimización en la inversión inicial y un incremento en la vida útil del pavimento.

Tabla 34

Presupuesto del Pavimento flexible + 10% de caucho en polvo

PRESUPUESTO				
Presupuesto	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES			
Tesista	Cajaleón Gómez, Javier Gustavo			
Lugar	Ultupuquio -Huaraz			
Item	Descripción	Und	Metrado	Precio S/. Parcial
Muestra	Pavimento flexible + 10% en caucho en polvo			

01.00.00	Obras preliminares				5,326.72
01.01.00	Movilización y desmovilización	Glb	1.00	5326.72	5,326.72
2.00.00	Movimiento de Tierras				9,678.56
2.01.00	Perfilado, nivelación y compactación de la subrasante en zonas de corte	m2	4,016.00	2.41	9,678.56
3.00.00	Pavimentos				201,703.60
03.01.00	Sub base granular E=45 cm	m3	1,004.00	57.5	57,730.00
03.02.00	Base Granular E= 15 cm	m3	602.40	72.94	43,939.06
03.03.00	Carpeta asfáltica en caliente E= 5cm	m3	200.80	498.18	100,034.54
	Costo Directo				S/ 216,708.88
	Gastos Generales 10.114%		10.114%		21,917.94
	Utilidad 10%		10%		21,670.89
	Subtotal				260,297.70
	IGV		18%		46,853.59
Presupuesto total					S/ 307,151.29

Fuente: Elaboración Propia

El presupuesto presentado corresponde al diseño de pavimento flexible con subrasante natural (10 % de caucho en polvo). En proyectos comparativos, la incorporación de caucho en polvo en proporciones de 10 %, 15 % y 20 % puede modificar los costos directos y los espesores de capa, reflejando una optimización en la inversión inicial y un incremento en la vida útil del pavimento.

Tabla 35

Presupuesto del Pavimento flexible + 15% de caucho en polvo

PRESUPUESTO					
Presupuesto	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES				
Tesista	Cajaleón Gómez, Javier Gustavo				
Lugar	Ultupuquio -Huaraz				
Item	Descripción	Und	Metrado	Precio S/.	Parcial
Muestra	Pavimento flexible + 15% en caucho en polvo				
01.00.00	Obras preliminares				5,326.72
01.01.00	Movilización y desmovilización	Glb	1.00	5326.72	5,326.72
2.00.00	Movimiento de Tierras				9,678.56
2.01.00	Perfilado, nivelación y compactación de la subrasante en zonas de corte	m2	4,016.00	2.41	9,678.56
3.00.00	Pavimentos				223,277.55

03.01.00	Sub base granular E=50 cm	m3	1,124.48	57.5	64,657.60
03.02.00	Base Granular E= 20 cm	m3	803.20	72.94	58,585.41
03.03.00	Carpeta asfáltica en caliente E= 5cm	m3	200.80	498.18	100,034.54
Costo Directo					S/ 238,282.83
	Gastos Generales 10.114%		10.114%		24,099.93
	Utilidad 10%		10%		23,828.28
	Subtotal				286,211.04
	IGV		18%		51,517.99
Presupuesto total					S/ 337,729.03

Fuente: Elaboración Propia

El presupuesto presentado corresponde al diseño de pavimento flexible con subrasante natural (15 % de caucho en polvo). En proyectos comparativos, la incorporación de caucho en polvo en proporciones de 10 %, 15 % y 20 % puede modificar los costos directos y los espesores de capa, reflejando una optimización en la inversión inicial y un incremento en la vida útil del pavimento.

Tabla 36*Presupuesto del Pavimento flexible + 20% de caucho en polvo*

PRESUPUESTO					
Presupuesto	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES				
Tesista	Cajaleón Gómez, Javier Gustavo				
Lugar	Ultupuquio -Huaraz				
Muestra	Pavimento flexible + 20% en caucho en polvo				
Item	Descripción	Und	Metrado	Precio S/.	Parcial
01.00.00	Obras preliminares				5,326.72
01.01.00	Movilización y desmovilización	Glb	1.00	5326.72	5,326.72
2.00.00	Movimiento de Tierras				9,678.56
2.01.00	Perfilado, nivelación y compactación de la subrasante en zonas de corte	m2	4,016.00	2.41	9,678.56
3.00.00	Pavimentos				234,823.55
03.01.00	Sub base granular E=65 cm	m3	1,325.28	57.5	76,203.60
03.02.00	Base Granular E= 20 cm	m3	803.20	72.94	58,585.41
03.03.00	Carpeta asfáltica en caliente E= 5cm	m3	200.80	498.18	100,034.54

Costo Directo		S/ 249,828.83
Gastos Generales 10.114%	10.114%	25,267.69
Utilidad 10%	10%	24,982.88
Subtotal		300,079.40
IGV	18%	54,014.29
Presupuesto total		S/ 354,093.70

Fuente: Elaboración Propia

El presupuesto presentado corresponde al diseño de pavimento flexible con subrasante natural (20 % de caucho en polvo). En proyectos comparativos, la incorporación de caucho en polvo en proporciones de 10 %, 15 % y 20 % puede modificar los costos directos y los espesores de capa, reflejando una optimización en la inversión inicial y un incremento en la vida útil del pavimento.

El caucho en polvo, al ser un insumo reciclado, reduce los costos, como ejemplo podemos ver que la diferencia de costo se reduce en un s/. 37,123.61 soles agregando el 10% en caucho en polvo, asimismo contribuye a una resistencia a largo plazo y genera un doble valor público: mejora vial y mitigación ambiental.

Tabla 37*Impacto ambiental y sostenibilidad*

Caucho en polvo	Cal y cemento	Cenizas Volantes	Polímeros sintéticos
Contribuye a la economía circular, reduciendo la contaminación ambiental por neumáticos desechados, que tardan cientos de años en degradarse.	Su producción implica altas emisiones de CO ₂ y un elevado consumo energético, además de impactos por la explotación minera.	Aunque reutilizan residuos industriales, su transporte y manejo en zonas rurales limitan su sostenibilidad.	Tienen una huella de carbono significativa y generan pasivos ambientales al final de su vida útil.

Fuente: Elaboración Propia

El análisis comparativo de los materiales estabilizantes evidencia que el caucho en polvo destaca como aquella opción de mayor sostenibilidad para el mejoramiento de subrasantes en pavimentos flexibles. Su origen en el reciclaje de neumáticos fuera de uso contribuye a mermar residuos sólidos, así como mitigar la afectación del medio ambiente asociada a su disposición final, favoreciendo el principio de economía circular.

El caucho es más amigable con el ambiente y se alinea con los ODS 9 (infraestructura sostenible) y ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles).

Tabla 38*Aceptación social y generación de valor público*

Caucho en polvo	Cal y cemento	Cenizas Volantes	Polímeros sintéticos
------------------------	----------------------	-------------------------	-----------------------------

Tiene alta aceptación social porque asocia la obra pública con la reutilización de residuos sólidos visibles (llantas), lo que refuerza la percepción positiva de la comunidad hacia el proyecto.	Son percibidos como insumos industriales sin un beneficio ambiental directo, por lo que su aporte al valor público es limitado
--	---

Fuente: Elaboración Propia

En contextos rurales, la utilización de caucho en polvo puede fortalecer la legitimidad social de los proyectos de inversión pública, dado que la comunidad percibe un beneficio ambiental adicional.

En esta investigación, decidimos comenzar con una dosificación mínima del 10% de caucho en polvo para estabilizar la subrasante. Esta elección no fue al azar; se basó en una revisión exhaustiva de antecedentes y estudios previos, tanto a nivel nacional como internacional. Asimismo, en investigaciones consultadas, como las de Farfán y Leonardo (2018), se ha demostrado que:

Los efectos significativos en las propiedades mecánicas de los suelos especialmente en la mejora del CBR, la reducción de la plasticidad y la variación de la densidad seca máxima se hacen más evidentes cuando se supera el 5% de incorporación de caucho. (p. 242)

Además, otras tesis revisadas, como las de Alvarez y Gutierrez (2020) y Torres (2025), reportaron ensayos con porcentajes más bajos (entre 1% y 5%), logrando mejoras puntuales en suelos de alta plasticidad. Sin embargo, estos resultados fueron variables y dependieron del tipo de suelo, lo que limita su aplicación práctica en proyectos viales. Por lo tanto, se decidió que iniciar el estudio con un 10% permitiría observar cambios más

significativos en las propiedades físico-mecánicas de la subrasante, asegurando resultados comparables y técnicamente relevantes.

Otro factor que respaldó esta decisión fue la viabilidad de ingeniería como ambiental. Por un lado, el uso de porcentajes muy bajos de caucho podría no justificar los costos y la logística de su incorporación, ya que no produciría mejoras consistentes desde la perspectiva de la ingeniería geotécnica. Por otro lado, comenzar con un 10% también se alinea con criterios de sostenibilidad, ya que aumenta el volumen de neumáticos reciclados utilizados en el proceso, contribuyendo de manera más significativa a la reducción de impactos ambientales negativos.

En este contexto, la elección del 10% como punto de partida se fundamenta en la evidencia de diversas tesis y estudios experimentales que sugieren trabajar dentro de ese rango. Es precisamente ahí donde se logran resultados más confiables y con una mayor aplicabilidad en la mejora de suelos para pavimentos flexibles.

El caucho en polvo representa una alternativa más integral frente a los aditivos tradicionales, ya que no solo mejora las propiedades mecánicas de la subrasante, sino que también reduce costos, fortalece la sostenibilidad ambiental y promueve la generación de valor público. A diferencia de la cal o el cemento, que aportan rigidez, pero generan impactos ambientales negativos, o de los polímeros sintéticos, que son costosos y poco accesibles, el caucho combina buen desempeño técnico, bajo costo relativo y beneficios ambientales.

Su uso, por tanto, no debe evaluarse únicamente como una mejora técnica de la subrasante, sino como una estrategia de innovación en la gestión de proyectos de infraestructura pública, capaz de articular objetivos de desempeño vial, sostenibilidad y legitimidad social.

VI. CONCLUSIONES

- **Conclusión de la Hipótesis General: El uso de caucho en polvo como material alternativo mejora significativamente la subrasante en el diseño de pavimentos flexibles.**

Es concluyente que la utilización de caucho en polvo como material alternativo mejoró significativamente la subrasante en el esbozo de pavimentaciones flexibles, los ensayos realizados evidenciaron que la capacidad portante del suelo, medida a través del CBR, se incrementando una mejora de un 79%, pasando de 4.3% a 7.7% cuando se integra caucho en polvo. Este aumento permitió optimizar el diseño estructural del pavimento, logrando una reducción de espesores hasta más de un 15%, lo cual se traduce en una economía de recursos, así como costes de mantenimiento. Además, emplearse este residuo reciclado contribuyó a la protección ambiental al disminuir el impacto negativo de los neumáticos desechados, consolidando al caucho en polvo como una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para la optimización de la subrasante en carreteras rurales.

- **Conclusión de la Hipótesis Específica: El uso del caucho en polvo influye significativamente el comportamiento del CBR del pavimento flexible.**

Los cálculos realizados evidenciaron que caucho en polvo generó un incremento progresivo de los valores de CBR de la subrasante. Mientras el suelo natural alcanzó un CBR de 4.3 al 95%, adicionándose 10% de caucho en polvo se obtuvo un 7.7%, con 15% se llegó a 5%, y con 20% se alcanzó un valor máximo de 3.3%. Estos resultados confirmaron que el caucho reciclado optimizó las características mecánicas de dicha subrasante, favoreciendo la durabilidad del pavimento flexible ante las cargas dinámicas del flujo de vehículos. En consecuencia, se validó la hipótesis de que el caucho en polvo influyó significativamente sobre el comportamiento del CBR en la zona de estudio.

- **Conclusión de la Hipótesis Específica: El uso del caucho en polvo influye significativamente en los espesores del diseño del pavimento flexible.**

Los cálculos realizados en el diseño estructural del pavimento mostraron que un incremento del CBR repercutió directamente en la disminución de los espesores de las capas estructurales. En particular, con una incorporación del 10 % de caucho en polvo, los espesores del pavimento se redujeron hasta más del 15 % en comparación con el diseño sin adición de caucho, lo que representó un ahorro considerable en materiales como la sub-base y la base granular. Esta reducción, no comprometió la seguridad estructural de la vía, sino que permitió un diseño más eficiente y con menores requerimientos de mantenimiento futuro. Por lo tanto, se comprobó la hipótesis específica planteada.

- **Conclusión de la Hipótesis Específica: El uso del caucho en polvo incrementa significativamente en la relación beneficio-costos del mantenimiento del pavimento flexible.**

La utilización de caucho en polvo en la optimización de la subrasante de pavimentaciones flexibles incrementó significativamente la relación beneficio-costos del mantenimiento; resultó más económico que otros estabilizadores, y los beneficios obtenidos a mediano y largo plazo superaron con amplitud dicha inversión (tabla 26). En relación a los presupuestos indicados en la tabla 33, 34, 35 y 36 podemos determinar que el caucho en polvo, al ser un insumo reciclado, reduce los costos, como ejemplo podemos ver que la diferencia entre el presupuesto de pavimento flexible + 0% de caucho asciende a S/ 344,274.90 soles, mientras que el pavimento flexible +10% de caucho asciende a s/. 307,151.29 soles reduciendo su costo a s/. 37,123.61 soles, asimismo contribuye a una resistencia a largo plazo y genera un doble valor público: mejora vial y mitigación ambiental.

La elevación de la capacidad portante de la superficie y mejorar su resistencia frente a cargas repetitivas redujeron deformaciones y deterioros prematuros, lo que prolongó la vida útil de la vía, así como la disminución de los costes de conservación. En consecuencia, la alternativa con caucho se demostró técnica, económica y socialmente viable, además de ambientalmente sostenible, consolidándose como una opción integral para optimizar los recursos públicos en proyectos de pavimentación flexible.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomendó que el uso de caucho en polvo como material estabilizador de subrasantes se implemente prioritariamente en proyectos viales de ámbito rural y caminos departamentales con suelos de baja capacidad portante, como los identificados en la localidad de Ultupuquio. Esto debido a que la mejora del CBR de 4.3 % a 7.7 % evidenció un impacto directo en la resistencia del suelo, lo cual es crucial en zonas donde el transporte agrícola y local requiere vías más estables y duraderas.
- Aunque el presente estudio utilizó principalmente porcentajes de 10 %, 15 % y 20 %, se recomienda ampliar los ensayos a otros rangos de incorporación y variar la granulometría del caucho para identificar la mezcla más eficiente. De esta manera, se podrían definir estándares de dosificación que maximicen el beneficio estructural y económico.
- Se sugiere a los gobiernos locales y regionales establecer convenios con empresas recicladoras para garantizar el suministro constante de caucho en polvo derivado de llantas en desuso. De esta manera, se promueve una economía circular y se reduce esa impactación del medio ambiente negativa de las llantas abandonadas, aportando a la sostenibilidad de los proyectos viales.
- Se recomienda que el caucho en polvo sea utilizado como criterio de decisión en la priorización de proyectos. Con ello, se garantiza la selección de alternativas no solo técnicamente viables, sino también financieramente más rentables en el ciclo de vida del pavimento.
- Se aconseja implementar programas de capacitación dirigidos a ingenieros residentes, supervisores y proyectistas sobre el proceso de incorporación de caucho en polvo en suelos de subrasante. La correcta dosificación, mezcla y compactación son aspectos

técnicos claves que garantizarán el desempeño esperado en campo, replicando los resultados de laboratorio.

- Se recomienda continuar las investigaciones en otras localidades con distintos tipos de suelo (arenosos, limosos, expansivos) y bajo condiciones climáticas diversas (costa, sierra y selva). Esto permitirá validar la efectividad del caucho en polvo en diferentes escenarios, asegurando que su aplicación sea generalizable en todo el territorio nacional.
- Finalmente, se sugiere al MTC, evaluar la incorporación de lineamientos normativos regulantes y motivantes del empleo de caucho reciclado en los diseños de pavimentaciones flexibles. La evidencia técnica demuestra que su inclusión no solo mejora el desempeño mecánico del suelo, sino que también contribuye a la gestión ambiental responsable de residuos.

VIII. REFERENCIAS

- Abdulnaser, A.-S., Alharthai, M., Choon, Y., Izzi, N., Hazim, Z., & Munder, B. (2023). Una revisión del asfalto cauchutado para aplicaciones de pavimentos flexibles: producción, contenido, rendimiento, motivaciones y direcciones futuras. *Sostenibilidad*, 15(19), 6-14. <https://doi.org/10.3390/su151914481>
- Aboelkasim, D., Dongdong, G., Hashemi, M., Long, Z., Yang, X., You, L., & Zhanping, Y. (2022). Revisión del reciclaje de residuos plásticos en materiales de pavimentación asfáltica. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 742-764. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>
- Alfayez, S., Nehdi, M., & Suleiman, A. (2020). Reciclaje de caucho de neumáticos en pavimentos asfálticos: estado del arte. *Revista MDPI*, 12(21), 3-4. <https://doi.org/10.3390/su12219076>
- Alfonso, J., Lozano, E., & Ruiz, J. (2015). *Análisis del mejoramiento de un suelo de subrasante con un aditivo orgánico*. [Tesis de maestría, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Catolica de Colombia. <http://hdl.handle.net/10983/2977>
- Alvarez, N., & Gutierrez, J. (2020). *Estudio experimental del efecto en el comportamiento mecánico al adicionar caucho triturado en un suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa Llama Cajamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://doi.org/10.19083/tesis/652828>
- Amaro, Z., & Capcha, P. (2021). *Diseño de pavimento flexible ambientalmente sostenible con subrasante estabilizada mediante la adición de caucho triturado según AASHTO- 93 en el tramo Kimbiri capital - Kimbiri Alto*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Universidad Ricardo Palma. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/4726>

- Arias, J. (2020). *Técnicas e instrumentos de investigación científica*. Enfoques Consulting EIRL.
<https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26118w/Tecnicas%20e%20instrumentos.pdf>
- Balbin, R., & Chonchon, V. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica con material reciclado para la mejora del comportamiento mecánico del pavimento en el tramo KM 90+000 al KM 95+000 de la Carretera Canta Huayllay*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio Académico USMP.
<https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/6001>
- Barzola, D. (2023). *Caucho reciclado en comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en el Distrito de Yanahuanca Provincia de Daniel Alcides Carrión – 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2945>
- Bobadilla, J., Tesen, F., Tigre, J., & Muñoz, S. (2022). Uso de polímeros en asfalto. *Gaceta técnica*, 23(1), 4-7. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.7>
- Breña, L., Esenarro, D., & Rodríguez, C. (2021). *Las variables en la metodología de la investigación científica* (1 ed.). Área de Innovación y Desarrollo, S.L.
<https://doi.org/10.17993/IngyTec.2021.78>
- Bressette, T., Zhou, H., Stonex, A., & Hicks, G. (2012). Asphalt Rubber and Its Potential Use in China. *ASCE Library*, 7(2), 8-10. [https://doi.org/10.1061/40952\(317\)75](https://doi.org/10.1061/40952(317)75)
- Casimiro, V., & Melgarejo, K. (2022). *Suelo Cohesivo estabilizado con Caucho Granulado para mejorar las propiedades físico-mecánicas de una subrasante en zonas rurales*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Universidad Ricardo Palma. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/6097>
- Castro, L., & Díaz, C. (2017). *Implementación de grano de caucho reciclado (GCR) provenientes de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar*

- pavimentos sostenibles en Bogotá*. [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás. Bogotá]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás. <https://hdl.handle.net/11634/2633>
- Céspedes, A., & Remar, A. (2022). *Elaboración de mapas de PCI para la planificación del mantenimiento y conservación del pavimento, Av. Maestro Peruano km 0+000 a km 0+653, distrito de Comas*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Universidad Ricardo Palma. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/6002>
- Chasquero, A., & Jara La Torre, D. (2024). *Análisis y diseño estructural del pavimento flexible para mejorar la transitabilidad en el tramo de la carretera la Coipa – Tamborapa, del departamento de Cajamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional Digital UNJ. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/670>
- Chávez , A., Cuevas, T., Gómez, A., & De la Torre, E. (28 de febrero de 2022). *Granulometría de Suelos por Tamices*. [Diapositiva]. SCRIBD. <https://es.scribd.com/document/563034404/Actividad-3-1-Reporte-de-La-Practica-Granulometria-via-Tamices-Equipo-1>
- Chávez, R. (2018). *Diseño de pavimento flexible para la Av. Morales Duarez de la via expresa Línea Amarilla en la Ciudad de Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villareal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/2230>
- Cuya, D. (2021). *Supervisión y seguimiento para el proyecto creación del servicio de transitabilidad vehicular y peatonal La asociación los Suyos, Distrito de Carabayllo- Lima- 2019*”. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/29621>
- Dinesh , S., & Kirubakaran, K. (2019). Estabilización del suelo mediante el uso de caucho de neumáticos de desecho. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 6(10), 409-414.

https://www.researchgate.net/publication/337006611_Stabilization_of_Soil_by_Use_of_Waste_Tyre_Rubber

- Farfán, M., & Leonardo, E. (2018). El Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(3), 15-20. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000300241>
- Flores, P., Gatica, A., Sulca, V., & Trinidad, D. (2022). Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria. *Investigatio UEES*. 18(1), 34-49. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2022.18.2>
- García, J. (2013). *Evaluación de la resistencia a la fatiga en Mezclas Asfálticas*. [Tesis pregrado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio Institucional UMICH. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/7349/1/FIC-L-2013-0327.pdf
- Garnica, P., Rico, A., & Téllez, R. (1998). Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. *Instituto Mexicano del Transporte*. 104(2), 56-64. <https://trid.trb.org/View/963113>
- Giraldo, D., Peláez, G., & Velásquez, S. (2017). Aplicaciones del caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. <https://www.redalyc.org/journal/911/91150559002/html/>
- Giraldo, L., Maya, J., & Monsalve, L. (12 de julio de 2012). *Diseño de pavimento flexible y rígido*. [Diapositiva]. Slideshare. <https://es.slideshare.net/rosabeatrizvillaloboshuaman/diseo-de-pavimento-flexible-y-rigido>
- Goodyear. (29 de marzo de 2022). *Goodyear te enseña cómo se fabrica un neumático*. <https://www.goodyear.cl/goodyear-te-ense-a-c-mo-se-fabrica-un-neum-tico>

- Guerrero, O., Camargo, R., Dawd, I., Duque, J., Mendoza, R., Gálvis, J., Diaz, J., Daza, O., Cucunubá, J., Acosta, C. (2024). Implementación de caucho granulado (CR) en pavimentos de carreteras: una revisión exhaustiva de la literatura. *Infrastructures*, 9(12), 10-15. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9120223>
- Hernández, S., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* [Fotografía]. SCRIBD. <https://es.scribd.com/document/905292221/Metodologia-de-La-Investigacion-7ma-Ed-Hernandez-Sampieri-Bibliotecadelfriki-site-1>
- Hoyos, L., Muñoz, S., & Puicon, K. (2021). Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria. *Infraestructura Vial*, 23(41), 7-15. <http://dx.doi.org/10.15517/iv.v23i41.44410>
- Ing. Vías. (2020). *¿ Qué es un Pavimento?*. <https://construyored.com/noticias/2299-que-es-un-pavimento>
- Jara, R., & Vilca, R. (2024). *Mejoramiento de suelo para uso de subrasante en proyectos de tránsito menor en suelos cohesivos y no cohesivos, adicionando polvo de caucho reciclado*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/682811>
- Mejía , K., Reyes, C., & Sánchez, H. (2018). *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística* (Primera ed.). Universidad Ricardo Palma. <https://www.urp.edu.pe/pdf/id/13350/n/libro-manual-de-terminos-en-investigacion.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2014). *Manual de carreteras suelos Geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mtc%20normas/arch_pdf/man_7%20sggp-2014.pdf

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (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
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2021). *Neumáticos fuera de uso influyen significativamente en la generación de residuos sólidos*.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/543946-neumaticos-fuera-de-uso-influyen-significativamente-en-la-generacion-de-residuos-solidos>
- Mío, E., & Salirrosas, J. (22 de agosto de 2024). *Aprovechamiento del reciclado de caucho para mejorar la durabilidad del pavimento flexible*. [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS.
<https://hdl.handle.net/20.500.12802/13058>
- Montes, I. (2022). *Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres del distrito de Chavín de Huántar Provincia de Huairi Región Ancash 2022-2024*. Municipalidad Distrital de Chavín de Huántar.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4874602/PLAN%20DE%20PREVENCIÓN%20Y%20REDUCCIÓN%20DEL%20RIESGO%20DE%20DESASTRES%20-%20PPRRD%20CHH.pdf?v=1689868220>
- Mukhtar, A., & Cascada, M. (marzo de 2021). Caracterización geotécnica de residuos plásticos en aplicaciones de subrasantes de pavimentos. *Geotecnia del transporte*, 27(1), 24-28.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100472>
- Orejón, E. (2018). *Propuesta del mejoramiento de la subrasante de pavimentos flexibles usando las geomallas biaxiales en suelos de bajo valor de soporte california - distrito de Ahuac*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/5165>

- Padilha, L., Pais, J., Pereira, P., Palha, C., & Trichés, G. (2 de Diciembre de 2022). Contribución de las mezclas de asfalto y caucho a los pavimentos sostenibles mediante la reducción del espesor del pavimento. *Materials*, 15(23), 10-15. <https://doi.org/10.3390/ma15238592>
- Patiño, K. (2022). *Análisis de la posible correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia*. [Tesis de maestría, Universidad de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad de Caldas. <https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/18190>
- Quipuzcoa, G. (2021). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso adicionando hormigón en el sector Nuevo Barraza - Laredo - Trujillo, región La Libertad, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Trujillo]. Repositorio Dspace UPRIT. <http://repositorio.uprit.edu.pe/handle/UPRIT/494>
- Ross, D. (Enero de 2020). Uso de neumáticos usados en una economía circular. *Reuse Guidelines*, 38(1), 1-3. <https://doi.org/10.1177/0734242X19895697>
- Salcedo, A., & Santi, A. (2022). *Diseño de pavimento flexible con adición parcial de caucho reciclado en la avenida Pacasmayo, Lima, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/114496>
- Soberon, A. (2023). *Diseño del pavimento para el mejoramiento de la transitabilidad vehicular del pueblo joven Diego Ferré, distrito y provincia de Chiclayo, región Lambayeque*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional USAT. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/7000>
- Torres, A. (2025). *Análisis de las propiedades físico-mecánico de la subrasante en zonas no pavimentadas adicionando caucho reciclado y residuos de construcción y demolición en La Victoria-Chiclayo, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio

de Mogrovejo]. Repositorio Institucional USAT.

<http://hdl.handle.net/20.500.12423/9077>

Ucha, F. (13 de noviembre de 2013). *Definición de Neumáticos*. Significados.com

<https://www.definicionabc.com/general/neumaticos.php>

Vijay, S. (2018). Características de tensión-deformación y penetración de arcilla modificada

con caucho granulado. *Redalyc.org*. 27(49), 65-75.

<https://www.redalyc.org/journal/4139/413958019006/html/>

IX ANEXOS

Anexo A: Ensayos de Laboratorio



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales

Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (NORMA NTP 339.128)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-01

Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1

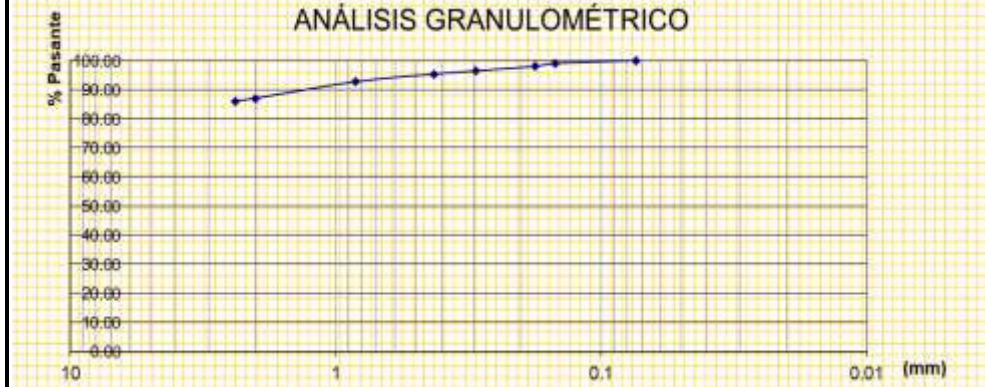
Muestra : C-01

Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

Tamiz	Abert. mm	Peso Retenido	% Ret. Parc	% Ret. Ac	% que pasa	Descripción de la muestra
3"	76.2					Limite liquido = 47.30%
2 1/2"	63.5					Limite Plástico = 23.70%
2"	50.8					Indice de Plasticidad = 23.80%
1 1/2"	38.11					Clasif. AASHTO = A-7-6 (23)
1"	25.4					Clasif. SUCS = CL
3/4"	19.1					
1/2"	12.7					Contenido de Humedad = 8.40%
3/8"	9.52					
1/4"	6.35					
#4	4.76					
#8	2.36					
#10	2					
#20	0.84	9.8	1.4	1.4	98.6	Descripción del suelo
#40	0.42	9.5	1.3	2.7	97.3	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad. Un 11% de arena grano fino fracción fina pasante la malla N° 200 en un 89% plástico a muy plástico (LL= 47.3%, IP= 23.6%), poco húmedo a húmedo.
#50	0.3	10.1	1.4	4.1	85.9	
#80	0.177	15	2.1	6.2	93.8	
#100	0.149	11.5	1.6	7.8	92.2	
#200	0.074	22.9	3.2	11	89	
<#200	Fondo	636.6	89	100		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO



Observaciones



Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



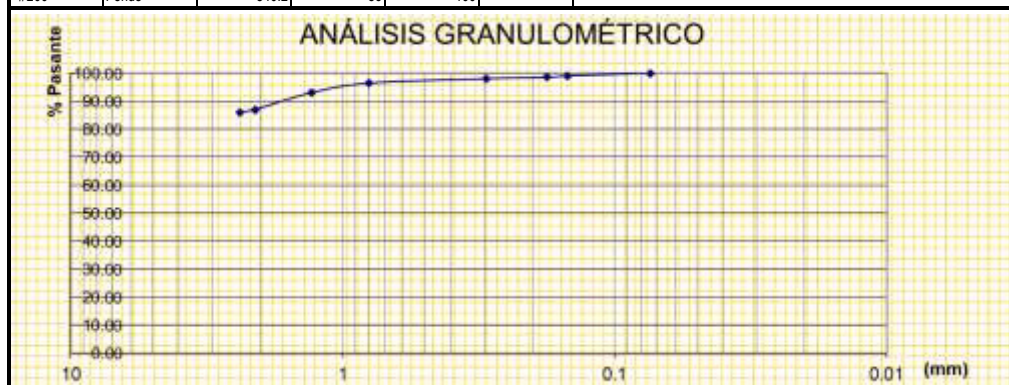
Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57900
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO

ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (NORMA NTP 339.128)	
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra :	M-02 Profundidad: 0.00 - 1.50
Calicata :	C-02
Fecha :	13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	2
Muestra :	C-02
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO						
Tamiz	Abert Min	Peso Retenido	% Ret Parc	% Ret Ac	% que pasa	Descripción de la muestra
3"	76.2					Límite líquido = 42.10%
2 1/2"	63.5					Límite Plástico = 22.70%
2"	50.8					Índice de Plasticidad = 19.40%
1 1/2"	38.11					Clasif. AASHTO = A-7-6 (17)
1"	25.4					Clasif. SUCS = CL
3/4"	19.1					
1/2"	12.7					Contenido de Humedad = 7.20%
3/8"	9.52					
1/4"	6.35					
#4	4.76					
#8	2.36				100	
#10	2	6.1	1	1	99	
#20	0.84	6.5	1	2	98	
#40	0.426	10.1	1.6	3.6	96.4	
#60	0.297	7.1	1.1	4.7	95.3	
#80	0.177	16.7	2.6	7.3	92.7	
#100	0.149	10.3	1.6	8.9	91.1	
#200	0.074	32.5	5.1	14	86	
<#200	Fondo	540.2	86	100		

Descripción del suelo
 Arcilla inorgánica de baja compresibilidad. Un 14% de arena grano fino fracción fina pasante la malla N° 200 en un 65% plástico a muy plástico (LL= 42.1% . IP= 19.4%), poco húmedo a húmedo.



Observaciones


 Ing. Oswaldo C. Tatur Trejo
 INGENIERO CIVIL
 CIP N° 73425




 Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
 INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
 Doctor en Ingeniería Civil
 Maestría en Ingeniería Geotécnica
 JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras
 Geolab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
 Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (NORMA NTP 339.128)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-03 Profundidad: 0.00 - 1.50

Calicata : C-03

Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 3

Muestra : C-03

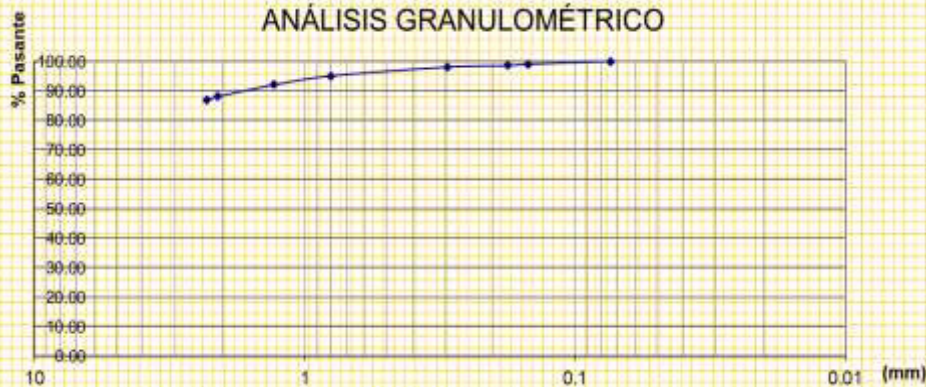
Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

Tamiz	Abert Min	Peso Retenido	% Ret. Parc	% Ret Ac	% que pasa	Descripción de la muestra
3"	76.2					Límite líquido = 45.50%
2 1/2"	63.5					Límite Plástico = 23.90%
2"	50.8					Índice de Plasticidad = 21.60%
1 1/2"	38.1					Clasif. AASHTO = A-7-6 (18)
1"	25.4					Clasif. SUCS = CL
3/4"	19.1					
1/2"	12.7					Contenido de H _u = 8.80%
3/8"	9.52					
1/4"	6.35					
#4	4.76					
#8	2.36				100	
#10	2	8.4	1.1	1.1	98.9	
#20	0.84	19.7	2.6	3.7	96.3	Descripción del suelo
#40	0.426	17.1	2.3	6	94	
#50	0.297	7.5	1	7	93	
#80	0.177	25.6	3.4	10.4	89.6	
#100	0.149	18.2	2.4	12.8	87.2	
#200	0.074	45.4	8	18.8	81	
<#200	Fondo	613.3	81.2	100		

Arcilla inorgánica de baja compresibilidad. Un 18.6% de arena grano fino fracción fina pasante la malla N° 200 en un 89% plástico a muy plástico (LL= 45.5% . IP= 21.6%), poco húmedo a húmedo.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO



Observaciones



Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
 INGENIERO CIVIL
 CIP: N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
 INGENIERO CIVIL CIP N° 57900
 Doctor en Ingeniería Civil
 Maestría en Ingeniería Geotécnica
 JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-01

Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1

Muestra : C-01

Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

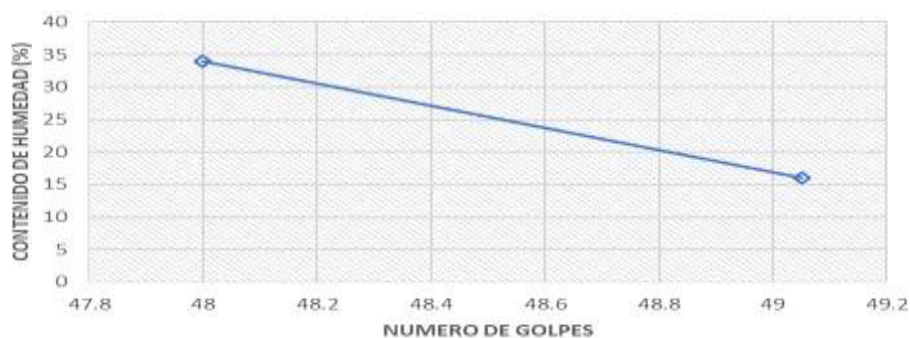
Límite Líquido

N° Tarro	16	23	33
Tarro + suelo Húmedo	28.76	31.51	30.72
Tarro + suelo Seco	23.54	25.65	25.69
Agua	5.22	5.86	5.03
Peso del tarro	12.9	13.33	14.77
Peso del suelo seco	10.64	12.32	10.92
% de Humedad	49.06	47.56	48
N° de Golpes	16	24	34

Límite Plástico

N° Tarro	27	11
Tarro + suelo Húmedo	21.7	20.71
Tarro + suelo Seco	20.12	19.27
Agua	1.58	1.44
Peso del tarro	13.46	13.17
Peso del suelo seco	6.66	6.1
% de Humedad	23.72	23.61
LL: 47.30%	LP: 23.70%	IP: 23.60%

% DE HUMEDAD A 25 GOLPES



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-01	Porcentaje de Caucho:	10%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	C-01
Muestra :	M-01 +10% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Límite Líquido			
N° Tarro	20	12	29
Tarro + suelo Húmedo	29.8	29.36	29.49
Tarro + suelo Seco	25.5	25.6	24.82
Agua	4.27	3.75	4.67
Peso del tarro	14.72	15.75	12.4
Peso del suelo seco	10.87	9.85	12.42
% de Humedad	39.28	38.07	37.6
N° de Golpes	16	26	33

Límite Plástico			
N° Tarro	2	30	
Tarro + suelo Húmedo	23.86	20.58	
Tarro + suelo Seco	21.69	18.69	
Agua	2.17	1.89	
Peso del tarro	14.46	12.44	
Peso del suelo seco	7.23	6.25	
% de Humedad	30.01	30.24	
LL:	38.20%	LP:	30.10%
		IP:	8.10%



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-01	Porcentaje de Caucho:	15%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	M-01 +15% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Límite Líquido			
N° Tarro	33	14	2
Tarro + suelo Húmedo	32.12	30.51	29.34
Tarro + suelo Seco	28.08	26.75	25.99
Agua	4.04	3.76	3.35
Peso del tarro	14.77	14.11	14.48
Peso del suelo seco	13.31	12.65	11.53
% de Humedad	30.35	29.75	29.05
N° de Golpes	15	23	35

Límite Plástico			
N° Tarro	12	10	
Tarro + suelo Húmedo	24.35	20.97	
Tarro + suelo Seco	22.55	19.37	
Agua	1.8	1.6	
Peso del tarro	15.75	13.31	
Peso del suelo seco	6.8	6.08	
% de Humedad	26.47	26.4	
LL:	29.60%	LP:	26.40%
		IP:	3.20%



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-01	Porcentaje de Caucho:	20%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	M-01 +20% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Limite Líquido			
N° Tarro	31	34	37
Tarro + suelo Húmedo	32.51	30.12	29.4
Tarro + suelo Seco	29.29	27.25	26.73
Agua	3.22	2.87	2.67
Peso del tarro	15.84	14.88	14.95
Peso del suelo seco	13.45	12.37	11.78
% de Humedad	23.94	23.2	22.67
N° de Golpes	15	23	33

Limite Plástico			
N° Tarro	-	-	-
Tarro + suelo Húmedo	-	-	-
Tarro + suelo Seco	-	-	-
Agua	-	-	-
Peso del tarro	-	-	-
Peso del suelo seco	-	-	-
% de Humedad	-	-	-
LL:	23.10%	LP:	NP
		IP:	NP



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)

INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57600
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras



Geolab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos

ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA

(NORMA NTP 339.129)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-02

Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1

Muestra : M-01

Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

Límite Líquido

N° Tarro	13	7	17
Tarro + suelo Húmedo	29.94	27.58	29.94
Tarro + suelo Seco	25.31	23.34	25.5
Agua	4.63	4.24	4.44
Peso del tarro	14.74	13.24	14.73
Peso del suelo seco	10.57	10.1	10.77
% de Humedad	43.8	41	41.23
N° de Golpes	15	26	33

Límite Plástico

N° Tarro	30	35
Tarro + suelo Húmedo	19.9	23.78
Tarro + suelo Seco	18.52	22.23
Agua	1.36	1.53
Peso del tarro	12.44	15.47
Peso del suelo seco	6.06	6.76
% de Humedad	22.7	22.63

LL: 42.10% LP: 22.70% IP: 19.40%



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



INGENIEROS DEL PERÚ

Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo

INGENIERO CIVIL

CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.

INGENIERO CIVIL CIP N° 57900

Doctor en Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Geotécnica

JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-02	Porcentaje de Caucho:	10%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	C-02
Muestra :	M-01 +10% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Limite Líquido			
N° Tarro	20	12	29
Tarro + suelo Húmedo	30.04	29.47	29.6
Tarro + suelo Seco	25.59	25.6	24.82
Agua	4.45	3.87	4.78
Peso del tarro	14.72	15.75	12.4
Peso del suelo seco	10.87	9.85	14.42
% de Humedad	40.94	39.29	38.49
N° de Golpes	16	26	33

Limite Plástico			
N° Tarro	2	30	
Tarro + suelo Húmedo	23.9	20.6	
Tarro + suelo Seco	21.89	18.69	
Agua	2.21	1.91	
Peso del tarro	14.46	12.44	
Peso del suelo seco	7.23	6.25	
% de Humedad	30.57	30.56	
LL:	39.40%	LP:	30.60%
		IP:	8.80%



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra : M-01
Calicata : C-02 Porcentaje de Caucho: 15%
Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : C-02
Muestra : M-01 +15% de caucho en polvo
Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

Límite Líquido

N° Tarro	20	12	29
Tarro + suelo Húmedo	29.64	28.46	28.33
Tarro + suelo Seco	25.69	25.6	24.82
Agua	3.25	2.86	3.51
Peso del tarro	14.72	15.75	12.4
Peso del suelo seco	10.87	9.85	12.42
% de Humedad	29.6	29.04	28.2
N° de Golpes	16	23	34

Límite Plástico

N° Tarro	2	30
Tarro + suelo Húmedo	23.54	20.3
Tarro + suelo Seco	21.88	18.6
Agua	1.85	1.81
Peso del tarro	14.45	12.44
Peso del suelo seco	7.23	6.25
% de Humedad	25.59	25.7

LL: 28.90% LP: 25.70% IP: 3.20%

% DE HUMEDAD A 25 GOLPES



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



ING. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57600
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-01	Porcentaje de Caucho:	20%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	M-01 +20% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Limite Liquido			
N° Tarro	30	11	36
Tarro + suelo Húmedo	24.87	26.49	29.69
Tarro + suelo Seco	22.41	24.06	27.23
Agua	2.26	2.41	2.46
Peso del tarro	14.44	13.17	15.94
Peso del suelo seco	0.07	10.91	11.29
% de Humedad	22.67	22.09	21.79
N° de Golpes	16	24	33

Limite Plástico			
N° Tarro	-	-	-
Tarro + suelo Húmedo	-	-	-
Tarro + suelo Seco	-	-	-
Agua	-	-	-
Peso del tarro	-	-	-
Peso del suelo seco	-	-	-
% de Humedad	-	-	-
LL:	22.10%	LP:	NP
		IP:	NP



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



ING. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras



Geolab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos

ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-03

Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : C-03

Muestra : M-01

Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

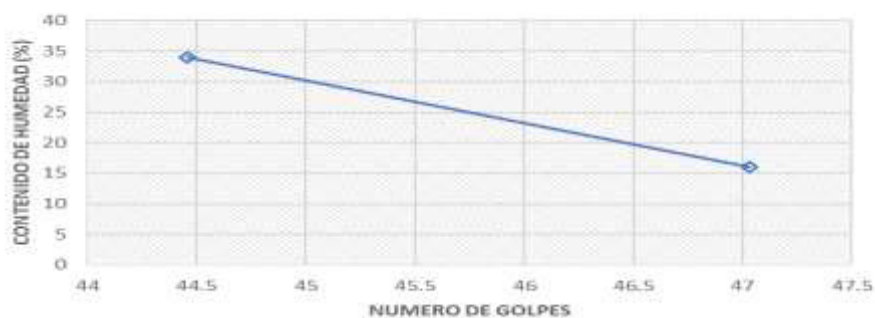
Límite Líquido

N° Tarro	15	37	8
Tarro + suelo Húmedo	55.44	30.7	28.96
Tarro + suelo Seco	29.18	25.78	23.54
Agua	6.26	4.92	5.42
Peso del tarro	15.87	14.95	11.35
Peso del suelo seco	13.31	10.83	12.19
% de Humedad	47.03	45.43	44.46
N° de Golpes	16	25	34

Límite Plástico

N° Tarro	15	13
Tarro + suelo Húmedo	21.48	23.13
Tarro + suelo Seco	19.89	21.51
Agua	1.65	1.62
Peso del tarro	12.9	14.74
Peso del suelo seco	6.93	6.77
% de Humedad	23.81	23.93
LL: 45.50%	LP: 23.90%	IP: 21.60%

% DE HUMEDAD A 25 GOLPES



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)



COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ

Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo

INGENIERO CIVIL

CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.

INGENIERO CIVIL CIP N° 57800

Doctor en Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Geotécnica

JEFE DE LABORATORIO

ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-03	Porcentaje de Caucho:	10%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	C-03
Muestra :	M-01 +10% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Limite Liquido			
N° Tarro	20	12	29
Tarro + suelo Húmedo	30.1	29.54	29.68
Tarro + suelo Seco	25.56	25.6	24.82
Agua	4.51	3.04	4.86
Peso del tarro	14.72	15.75	12.4
Peso del suelo seco	10.87	9.85	12.42
% de Humedad	41.4	40	39.13
N° de Golpes	16	26	33

Limite Plástico			
N° Tarro	2	30	
Tarro + suelo Húmedo	23.97	20.67	
Tarro + suelo Seco	21.69	18.69	
Agua	2.28	1.98	
Peso del tarro	14.45	12.44	
Peso del suelo seco	7.23	6.25	
% de Humedad	31.54	31.88	
LL:	40.10%	LP:	31.60%
		IP:	8.50%



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)


 Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
 INGENIERO CIVIL
 CIP. N° 73425




 Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
 INGENIERO CIVIL CIP N° 57600
 Doctor en Ingeniería Civil
 Maestría en Ingeniería Geotécnica
 JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico – Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación – Estudios Geotécnicos – Geotecnia Ambiental – Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)			
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"		
Solicitantes :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez		
Muestra :	M-01		
Calicata :	C-03	Porcentaje de Caucho:	20%
Fecha :	13 de junio del 2024		



DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	C-03
Muestra :	M-01 +15% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO			
Limite Líquido			
N° Tarro	20	12	29
Tarro + suelo Húmedo	28.84	28.48	28.33
Tarro + suelo Seco	25.59	25.6	24.82
Agua	3.25	2.86	3.51
Peso del tarro	14.72	15.75	12.4
Peso del suelo seco	10.87	9.85	12.42
% de Humedad	29.9	29.04	26.26
N° de Golpes	16	23	34

Limite Plástico			
N° Tarro	2	30	
Tarro + suelo Húmedo	23.54	20.3	
Tarro + suelo Seco	21.69	18.68	
Agua	1.85	1.61	
Peso del tarro	14.46	12.44	
Peso del suelo seco	7.23	6.25	
% de Humedad	25.59	25.76	
LL:	28.90%	LP:	25.70%
		IP:	3.20%



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)

INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tatur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales

Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA (NORMA NTP 339.129)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitantes : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-03 Porcentaje de Caucho: 20%

Fecha : 13 de junio del 2024



DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1

Muestra : M-01 +20% de caucho en polvo

Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

Límite Líquido

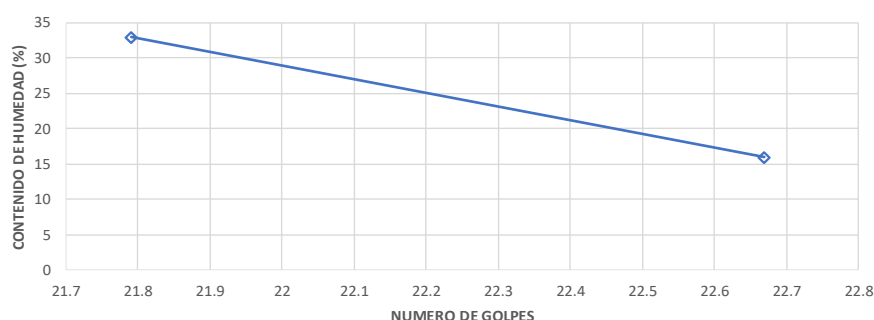
N° Tarro	30	11	36
Tarro + suelo Húmedo	24.87	28.49	29.69
Tarro + suelo Seco	22.41	24.08	27.23
Agua	2.26	2.41	2.46
Peso del tarro	12.44	13.17	15.94
Peso del suelo seco	9.97	10.91	11.29
% de Humedad	22.67	22.09	21.79
N° de Golpes	16	24	33

Límite Plástico

N° Tarro	-	-	-
Tarro + suelo Húmedo	-	-	-
Tarro + suelo Seco	-	-	-
Agua	-	-	-
Peso del tarro	-	-	-
Peso del suelo seco	-	-	-
% de Humedad	-	-	-

LL: 22.10% LP: NP IP: NP

% DE HUMEDAD A 25 GOLPES



OBSERVACIONES: Ensayo efectuado al material pasante la malla N° 40 (0.425 mm)

INGENIEROS DEL PERÚ

Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57900
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (NORMA NTP 339.141)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitante : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-01

Fecha : 02 de julio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

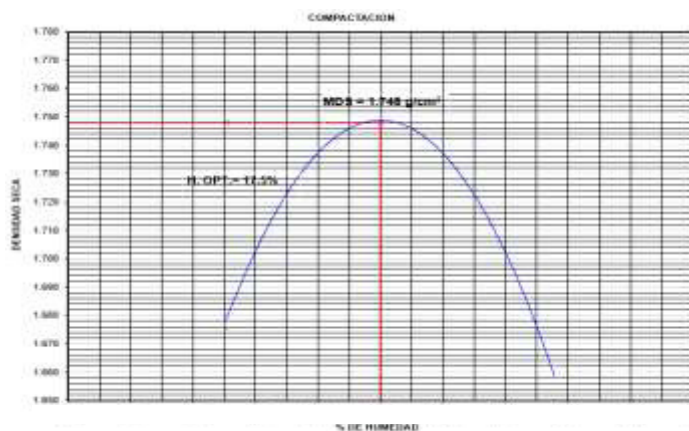
Calicata : 1

Muestra : C-01

Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

DENSIDAD VOLUMÉTRICA									
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE (g)	:	3455	3550	3588	3533				
PESO DEL MOLDE	:	1630	1639	1639	1639				
PESO SUELO + MOLDE	:	1816	1910	1947	1891				
PESO SUELO HÚMEDO COMPACTADO	:	645	945	945	945				
PESO VOLUMÉTRICO HÚMEDO	:	1.922	2.028	2.06	2.003				
TARRO N°									
PESO SUELO HÚMEDO + TARA (g)	:	452.3	485.6	450.6	478.8	428	455.2	457.4	419.8
PESO SUELO SECO + TARA (g)	:	418.2	649.8	422.3	438.8	294.1	413.6	446.7	380.5
PESO DEL AGUA (g)	:	34.1	38.8	37.3	38.7	34.5	41.8	51.7	39.3
PESO DE LA TARA (g)	:	187.4	234.8	196.8	205.4	206.8	188.8	193.2	185.7
PESO DEL SUELO SECO	:	230.8	245	225.5	234.4	187.3	224.8	252.5	191.8
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	:	14.78	14.59	16.54	16.51	18.42	18.91	20.48	20.49
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	:	14.7	16.5	16.5	16.5	18.5	18.5	20.5	20.5
PESO VOLUMÉTRICO SECO	:	1.678	1.741	1.741	1.741	1.728	1.728	1.662	1.662



RESULTADO DEL ENSAYO

Método de compactación	"A"
Máxima densidad seca (g/cm³)	1.748 g/cm³
Óptimo contenido de humedad (%)	17.50%



ING. OSWALDO C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57600
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales

Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (NORMA NTP 339.141)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"

Solicitante : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez

Muestra : M-01

Calicata : C-01 + 10% caucho en polvo

Fecha : 02 de julio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1

Muestra : C-01 + 10% caucho en polvo

Profundidad (m) : 0.0-1.50

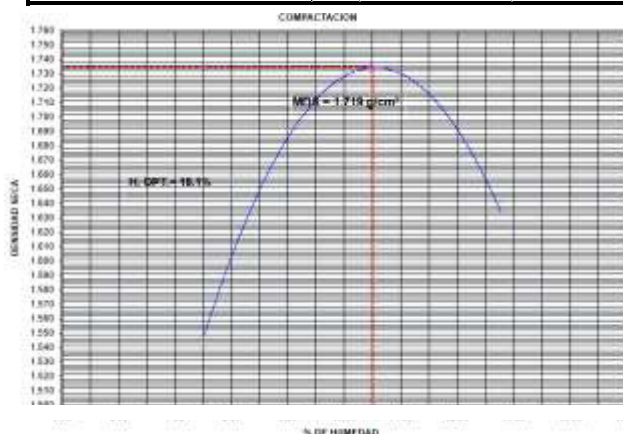
DATOS DEL ENSAYO

DENSIDAD VOLUMÉTRICA

PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE (g)	:	3424	3527	3563	3510
PESO DEL MOLDE	:	1638	1639	1639	1639
PESO SUELO + MOLDE	:	1785	1808	1924	1871
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO	:	945	945	945	345
PESO VOLUMÉTRICO HUMEDO	:	1.589	1.996	2.036	1.98

TARRO N°

PESO SUELO HÚMEDO + TARA (g)	:	540.3	536.5	581.7	531	549.5	537.8	570.2	576.5
PESO SUELO SECO + TARA (g)	:	495.8	509.7	526.8	483.6	493.8	482.2	507.3	509
PESO DEL AGUA (g)	:	44.5	46.8	54.9	47.4	55.7	56.8	62.8	67.2
PESO DE LA TARA (g)	:	203.1	186.8	204.9	204.6	200	188	204.5	184.3
PESO DEL SUELO SECO	:	292.7	320.9	321.9	279	293.8	294.2	302.8	325
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	:	15.2	15.21	17.06	16.99	18.96	18.9	20.77	20.68
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	:	15.2		17		18.9		20.7	
PESO VOLUMÉTRICO SECO	:	1.543		1.708		1.712		1.84	



RESULTADO DEL ENSAYO

Método de compactación	"A"
Máxima densidad seca (g/cm³)	1.719 g/cm³
Óptimo contenido de humedad (%)	18.10%



INGENIEROS DEL PERÚ

Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo

INGENIERO CIVIL

CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Rojas Roque, Msc. Dr.

INGENIERO CIVIL CIP N° 57600

Doctor en Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Geotécnica

JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (NORMA NTP 339.141)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitante : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra : M-01
Calicata : C-01 +15% caucho en polvo
Fecha : 02 de julio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1
Muestra : C-01 +15% caucho en polvo
Profundidad (m) : 0.0-1.50

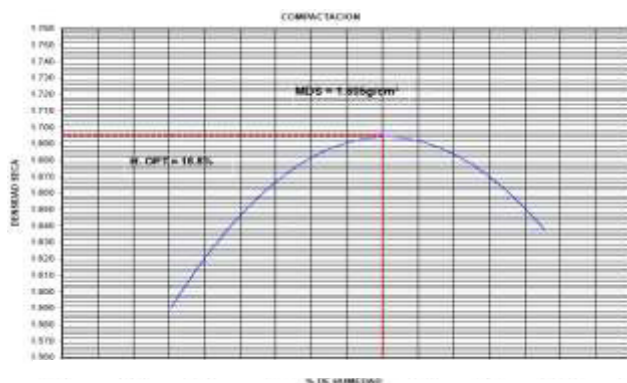
DATOS DEL ENSAYO

DENSIDAD VOLUMÉTRICA

PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE (g)	:	3384.9	3472	3543	3493
PESO DEL MOLDE	:	1639	1639	1639	1639
PESO SUELO + MOLDE	:	1745	1833	1934	1854
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO	:	945	945	945	945
PESO VOLUMÉTRICO HUMEDO	:	1.847	1.94	2.015	1.962

TARRO N°

PESO SUELO HÚMEDO + TARA (g)	:	532.5	559.7	574.4	618.8	552.6	534.1	558.9	581.6
PESO SUELO SECO + TARA (g)	:	458	520.8	519.5	471.4	436.9	478.5	496	514.4
PESO DEL AGUA (g)	:	44.5	48.8	54.9	47.4	55.7	55.8	62.9	67.2
PESO DE LA TARA (g)	:	195.3	200	197.8	182.4	203.1	184.3	139.2	189.4
PESO DEL SUELO SECO	:	292.7	320	321.8	279	293.8	294.2	302.8	325.8
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	:	15.2	15.21	17.06	15.9	18.96	18.9	20.77	20.66
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	:	15.2		17.8		18.8		20.7	
PESO VOLUMÉTRICO SECO	:	1.603		1.638		1.685		1.626	



RESULTADO DEL ENSAYO

Método de compactación	"A"
Máxima densidad seca (g/cm³)	1.695 g/cm³
Óptimo contenido de humedad (%)	18.80%



ING. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras



GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO (NORMA NTP 339.141)

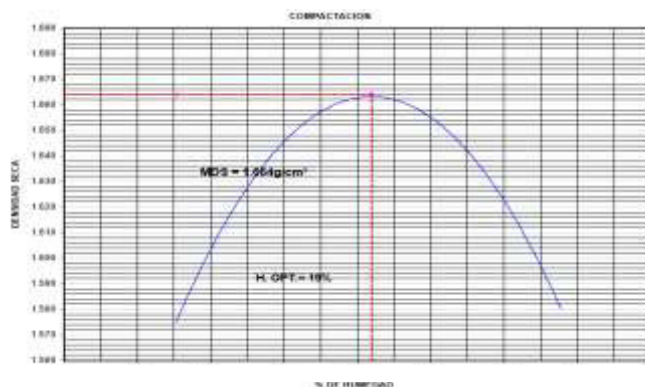
Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitante : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra : M-01
Calicata : C-01 + 20% de caucho en polvo
Fecha : 02 de julio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1
Muestra : C-01+ 20% de caucho en polvo
Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

DENSIDAD VOLUMÉTRICA									
PESO SUELO HÚMEDO + MOLDE (g)	:	:	3359	3475	3515	3533			
PESO DEL MOLDE	:	:	1639	1639	1639	1639			
PESO SUELO + MOLDE	:	:	1720	1836	1879	1829			
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO	:	:	945	945	945	945			
PESO VOLUMÉTRICO HUMEDO	:	:	1.82	1.943	1.985	1.935			
TARRO N°									
PESO SUELO HUMEDO + TARA (g)	:	:	537.2	579.5	513.4	558.3	563.4	538.2	545
PESO SUELO SECO + TARA (g)	:	:	492.1	525.5	484.8	502.4	504.6	480.8	482.5
PESO DEL AGUA (g)	:	:	44.5	53.3	48.8	55.9	58.8	55.8	82.5
PESO DE LA TARA (g)	:	:	206.8	184.3	183.4	187.4	205.4	197.5	192.4
PESO DEL SUELO SECO	:	:	285.8	342.2	275.2	315.8	299.2	283.6	290.1
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	:	:	15.57	15.58	17.73	17.75	19.65	19.65	21.57
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	:	:	15.6	17.7	19.6	21.6			
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	:	:	1.574	1.851	1.65	1.581			



RESULTADO DEL ENSAYO

Método de compactación	"A"
Máxima densidad seca (g/cm³)	1.664 g/cm³
Óptimo contenido de humedad (%)	19.00%



INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP. N° 73423



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)	
(NORMA NTP 339.145)	
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitante :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra :	M-01
Calicata :	C-1
Fecha :	13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	C-01
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO						
DENSIDAD VOLUMÉTRICA						
N° DEL MOLDE	1	2	3			
N° CAPA	5	5	5			
GOLPES POR CAPA N°	56	25	12			
CONO DE LA MUESTRA	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO	9312	9430	9223	9411	9663	9848
PESO DEL MOLDE	4991	4991	5079	5079	4579	4579
PESO DEL SUELO HÚMEDO	4321	4439	4144	4332	3784	4000
VOLUMEN DEL MOLDE	2104	2146.7	2102	2177	2121	2333.9
DENSIDAD HÚMEDA	2.054	2.089	1.971	1.93	1.784	1.737
DENSIDAD SECA	1.748	1.713	1.577	1.62	1.521	1.4
CONTENIDO DE HUMEDAD						
N° DE TARRO	1	2	4	6	5	17
TARRO + SUELO HÚMEDO (GR)	562.3	576.1	548.5	651.7	544.6	682.8
TARRO + SUELO SECO	507.1	511.6	497.5	584.9	494.8	570
PESO DEL AGUA	55.2	64.5	51	66.8	49.8	82.8
PESO DEL TARRO	192.4	199.5	206.9	194	206.2	194.3
PESO DEL SUELO SECO	314.7	321.1	290.6	380.8	268.6	305.2
% DE HUMEDAD	17.54	20.7	17.54	22.8	17.26	24.1
% DE PROMEDIO DE HUMEDAD	17.5	20.7	17.5	22.8	17.9	24.1

EXPANSIÓN											
FECHA	HORA	TIEMPO (HORA)	EXPANSIÓN			EXPANSIÓN			EXPANSIÓN		
			DIAL	mm	%	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%
13/01/2025	13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/01/2025	13:00	4	0.092	2.34	2.03	0.162	4.11	3.57	0.395	10.03	8.62

ABSORCIÓN			
MOLDE N°	1	2	3
PESO SUELO HÚMEDO + PLATO + MOLDE G	11594	11444	11149
PESO DEL PLATO + MOLDE G	7155	7112	7146
PESO SUELO HÚMEDO EMBEBIDO G	4439	4332	4005
PESO SUELO HÚM. SIN EMBEBER G	4321	4144	3764
PESO DE AGUA ABSORBIDA	118	185	219
PESO DEL SUELO SECO G	3677.4	3525.5	3225.9
ABSORCIÓN DE AGUA %	3.2	5.3	6.5

PENETRACIÓN										
PENETRACIÓN		MOLDE N° 1			MOLDE N° 1			MOLDE N° 1		
		DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2	DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2	DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2
pulg	CARGA STAND Kg/cm2									
0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.025	26.8	26.8	1.5	16.4	16.4	0.5	6.7	6.7	0.3
1.270	0.06	53.8	53.8	2.8	33	33	1.7	14.7	14.7	0.5
1.905	0.075	78	78	4.1	51.5	51.5	2.7	22.3	22.3	1.2
2.540	0.1	101	101	5.2	68.7	68.7	3.6	28.5	28.5	1.5
3.810	0.15	140.3	140.3	7.2	101.4	101.4	5.2	41.1	41.1	2.1
5.080	0.2	175.7	175.7	9.1	127.8	127.9	6.5	51.2	51.2	2.6
6.350	0.5	201.3	201.3	10.4	148.7	148.7	7.7	58.6	58.6	3.1
7.620	0.3	221.9	221.9	11.5	165.3	165.3	8.5	66.3	66.3	3.5
10.150	0.4	245.9	245.9	12.7	186.2	186.2	9.6	77	77	4
12.700	0.5	256.5	256.5	13.2	195	195	10.1	84.7	84.7	4.4



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras
 GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
 Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



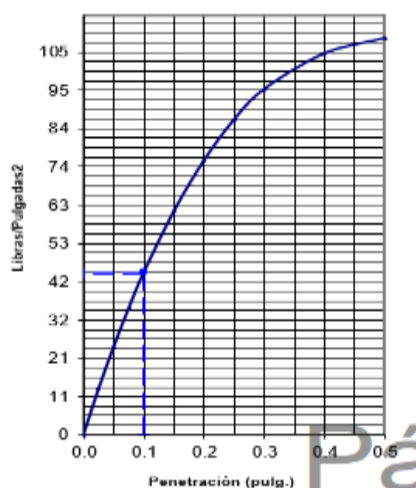
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) (NORMA NTP 339.145)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
 Localización : Direc: Av. Sol de Naranjal tramo Av. Paramonga y Av. Pacasmayo
 Muestra : Av. Sol de Naranjal tramo Paramonga
 Perforación : Cielo Abierto
 Fecha : 13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1
 Muestra : C-01
 Profundidad (m) : 0.0-1.50

GRÁFICO DE PENETRACIÓN DE CBR



RESULTADOS DE ENSAYO

Poctor Modificado (ASTM-D-1557)

Método de Compactación	"A"
Máxima Densidad Seca kg/cm²	1.748
Óptimo cont. De Humedad	17.5

CBR (ASTM D-1883)

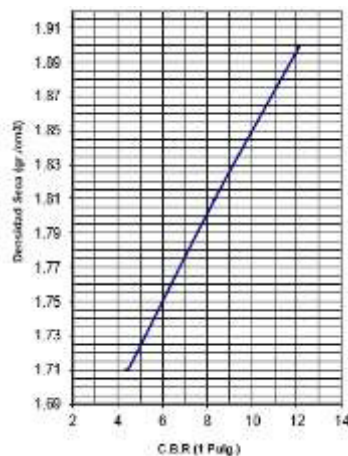
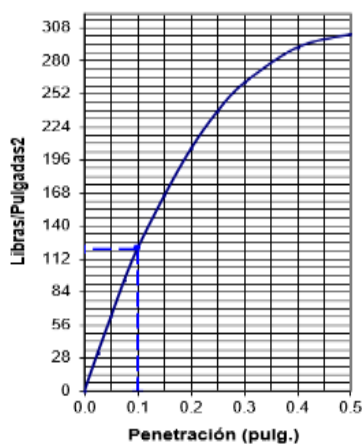
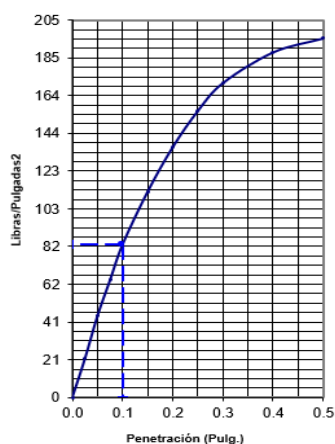
CBR a 2.5 mm (0.1") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	7.2
CBR al 95% de la MDS %	4.3
CBR a 5.06 mm (0.2") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	8.6
CBR al 95% de la MDS %	5.7

CBR (ASTM D-1883)

Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-7- 6(23)

OBSERVACIONES:

Material proporcionado por el solicitante



INGENIEROS DEL PERÚ
 Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
 INGENIERO CIVIL
 CIP: N° 73425

Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, MSc. Dr.
 INGENIERO CIVIL CIP N° 57800
 Doctor en Ingeniería Civil
 Maestro en Ingeniería Geotécnica
 JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

(NORMA NTP 339.145)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitante : Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra : M-01
Calicata : C-1
Fecha : 13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1
Muestra : C-01 + 10% de caucho en polvo
Profundidad (m) : 0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO

DENSIDAD VOLUMÉTRICA

N° DEL MOLDE	6	7	8
N° CAPA	5	5	5
GOLPES POR CAPA N°	54	24	13
CONO DE LA MUESTRA	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO	9074	9166.5	8097
PESO DEL MOLDE	4335.5	4935.5	4195
PESO DEL SUELO HÚMEDO	4136.5	4231	3962
VOLUMEN DEL MOLDE	2030	2081.7	2212
DENSIDAD HÚMEDA	2.03	2.032	1.764
DENSIDAD SECA	1.72	1.585	1.495

CONTENIDO DE HUMEDAD

N° DE TARRO	3	12	14	32	25	45
TARRO + SUELO HÚMEDO (GR)	562.3	578.1	548.5	545.8	544	657.4
TARRO + SUELO SECO	505.3	511.8	495	564.9	491.3	570
PESO DEL AGUA	57	66.5	53.5	80.9	52.3	67.4
PESO DEL TARRO	188.7	188.8	204.9	205.4	195.1	204.5
PESO DEL SUELO SECO	316.8	322.8	290.1	350.5	296.2	365.5
% DE HUMEDAD	18	20.5	18.43	22.5	17.99	23.9
% DE PROMEDIO DE HUMEDAD	18	20.8	18.4	22.5	18	23.9

EXPANSIÓN

FECHA	HORA	TIEMPO (HORA)	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%
13/01/2025	13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/01/2025	13:00	4	0.082	2.34	2.09	0.2	5.06	4.45	0.31	7.47	6.49

ABSORCIÓN

MOLDE N°	1	2	3
PESO SUELO HÚMEDO + PLATO + MOLDE G	11586	11308	11242
PESO DEL PLATO + MOLDE G	7159	7112	7146
PESO SUELO HÚMEDO EMBEBIDO G.	4231	4156	4096
PESO SUELO HUM. SIN EMBEBER G.	4138.5	4056	3902
PESO DE AGUA ABSORBIDA	92.5	140	194
PESO DEL SUELO SECO G	3507.2	3425.7	3306.5
ABSORCIÓN DE AGUA %	2.6	4.1	5.9

PENETRACIÓN

PENETRACIÓN	CARGA STAND Kg/cm2	DIAL	CARGA kg	kg/cm2	DIAL	CARGA kg	kg/cm2	DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2
0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.025	34.4	34.4	1.8	25	25	1.3	18.9	18.9	1
1.270	0.06	53.4	53.4	3.3	53.7	53.7	2.8	37.7	37.7	1.9
1.905	0.075	100	100	5.2	81.4	81.4	4.2	56.8	56.8	2.9
2.540	0.1	131.6	131.6	6.8	108.2	108.2	5.5	75.3	75.3	3.9
3.810	0.15	183.1	183.1	9.5	154.1	154.1	8	106.9	106.9	5.5
5.080	0.2	228	228	11.8	193.7	193.7	10	134.8	134.8	7
6.350	0.5	251	251	13	214.5	214.5	11.1	151.8	151.8	7.8
7.620	0.3	264.7	264.7	13.7	227.8	227.8	11.8	163.7	163.7	8.5
10.150	0.4	277.5	277.5	14.3	245.5	245.5	12.7	176.7	176.7	9.2
12.700	0.5	284.5	256.5	14.7	254.3	254.3	13.1	187	187	9.7



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

Geolab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



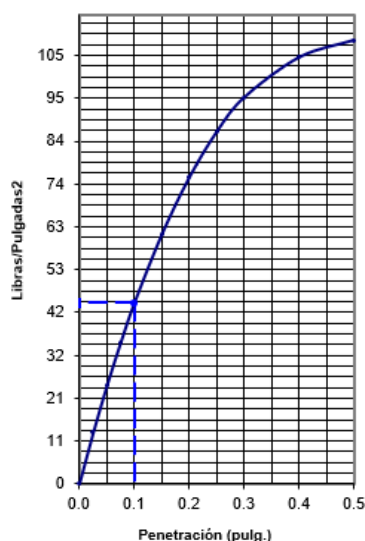
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) (NORMA NTP 339.145)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Localización : Direc: Av. Sol de Naranjal tramo Av. Paramonga y Av. Pacasmayo
Muestra : Av. Sol de Naranjal tramo Paramonga
Perforación : Cielo Abierto
Fecha : 13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1
Muestra : C-01 +10% caucho en polvo
Profundidad (m) : 0.0-1.50

GRÁFICO DE PENETRACIÓN DE CBR



RESULTADOS DE ENSAYO

Pactor Modificado (ASTM D-1557)

Método de Compactación	"A"
Máxima Densidad Seca kg/cm²	1.7819
Óptimo cont. De Humedad	18.1

CBR (ASTM D-1883)

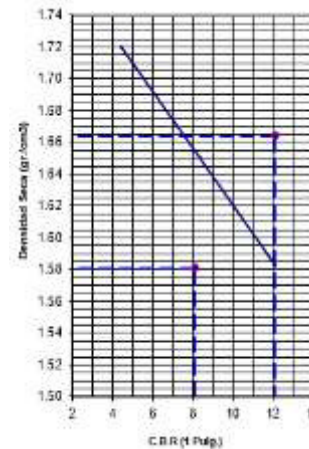
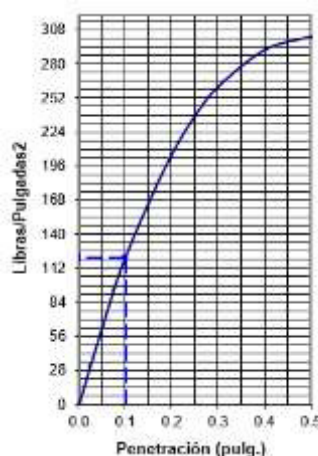
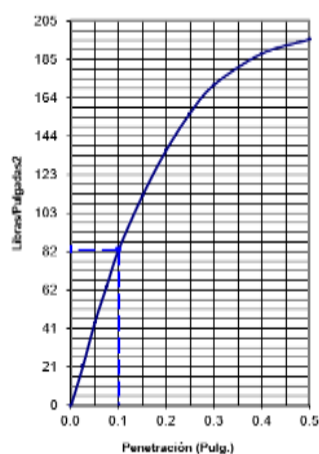
CBR a 2.5 mm (0.1") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	9.8
CBR al 95% de la MDS %	7.7
CBR a 5.06 mm (0.2") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	11.2
CBR al 95% de la MDS %	9

CBR (ASTM D-1883)

Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-7-4(23)

OBSERVACIONES:

Material proporcionado por el solicitante



Ing. Oswaldo C. Tator Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP. N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, Msc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57900
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)	
(NORMA NTP 339.145)	
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitante :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra :	M-01
Calicata :	C-1
Fecha :	13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	C-01 + 15% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO							
DENSIDAD VOLUMÉTRICA							
N° DEL MOLDE	6			7		8	
N° CAPA	5			5		5	
GOLPES POR CAPA N°	54			24		13	
CONO DE LA MUESTRA	NO SATURADO			SATURADO		NO SATURADO	
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO	9031		9172.5	8829	9048	8062	8316
PESO DEL MOLDE	4935.5		4935.5	4832	4832.8	4135	4195
PESO DEL SUELO HÚMEDO	4055.5		4237	3997	4216	3867	4121
VOLUMEN DEL MOLDE	2038		2230.5	2075	2352.9	2212	2675.2
DENSIDAD HÚMEDA	2.009		1.9	1.926	1.792	1.748	1.54
DENSIDAD SECA	1.694		1.548	1.527	1.435	1.474	1.219
CONTENIDO DE HUMEDAD							
N° DE TARRO	4	34	11	12	24	42	
TARRO + SUELO HÚMEDO (GR)	570.3	625.7	513.9	584.4	571.5	603.2	
TARRO + SUELO SECO	513.4	548	463.2	565.6	513.5	516.3	
PESO DEL AGUA	56.9	79.7	50.7	58.8	58	60.9	
PESO DEL TARRO	296.9	193.2	187.4	188.8	200.8	167.1	
PESO DEL SUELO SECO	306.5	352.8	275.8	306.9	312.7	329.2	
% DE HUMEDAD	16.56	22.5	16.36	24.9	18.55	26.4	
% DE PROMEDIO DE HUMEDAD	18.6	22.7	18.4	24.9	18.5	26.4	

EXPANSIÓN											
FECHA	HORA	TIEMPO (HORA)	EXPANSIÓN			EXPANSIÓN			EXPANSIÓN		
			DIAL	mm	%	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%
13/01/2025	13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27/01/2025	13:00	4	0.3	10.5	9.39	0.6	15.24	13.39	1	25.4	20.94

ABSORCIÓN			
MOLDE N°	1	2	3
PESO SUELO HÚMEDO + PLATO + MOLDE G	11392.8	11326	11267
PESO DEL PLATO + MOLDE G	7155	7112	7146
PESO SUELO HÚMEDO EMBEBIDO G	4237	4216	4121
PESO SUELO HÚM. SIN EMBEBER G	4095.5	3997	3867
PESO DE AGUA ABSORBIDA	141.5	219	254
	3453.2	3375.9	3280.5
ABSORCIÓN DE AGUA %	4.1	6.5	7

PENETRACIÓN										
PENETRACIÓN	CARGA STAND Kg/cm2	MOLDE N° 1			MOLDE N° 1			MOLDE N° 1		
		DIAL	CARGA kg	kg/cm2	DIAL	CARGA kg	kg/cm2	DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2
0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.025	21.3	21.3	1.1	18.4	18.4	1	11	11	0.6
1.270	0.06	43.6	43.6	2.3	37.3	37.3	1.9	22.6	22.6	1.2
1.905	0.075	53.8	53.8	3.3	55.1	55.1	2.8	34.4	34.4	1.8
2.540	0.1	85.6	85.6	4.4	72	72	3.7	45.6	45.6	2.4
3.810	0.15	122.6	122.6	6.3	101.4	101.4	5.2	66.4	66.4	3.4
5.080	0.2	154.3	154.3	8	124.8	124.8	6.4	83.8	83.8	4.3
6.350	0.5	180.2	180.2	9.3	143.4	143.4	7.4	100.1	100.1	5.2
7.620	0.3	199.2	199.2	10.3	159.1	159.1	8.2	114.8	114.8	5.9
10.150	0.4	224.8	224.8	11.5	179.7	179.7	9.3	137.9	137.9	7.1
12.700	0.5	238.4	238.4	12.3	186.5	186.5	9.7	148.2	148.2	7.7



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) (NORMA NTP 339.145)	
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Localización :	Dircc: Av. Sol de Naranjal/ tramo Av. Paramonga y Av. Pacasmayo
Muestra :	Av. Sol de Naranjal tramo Paramonga
Perforación :	Cielo Abierto
Fecha :	13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	C-01+ 15% caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

GRÁFICO DE PENETRACIÓN DE CBR	
-------------------------------	--

RESULTADOS DE ENSAYO

Pactor Modificado (ASTM D-1557)

Método de Compactación	"A"
Máxima Densidad Seca kg/cm ²	1.695
Óptimo cont. De Humedad	18.8

CBR (ASTM D-1883)

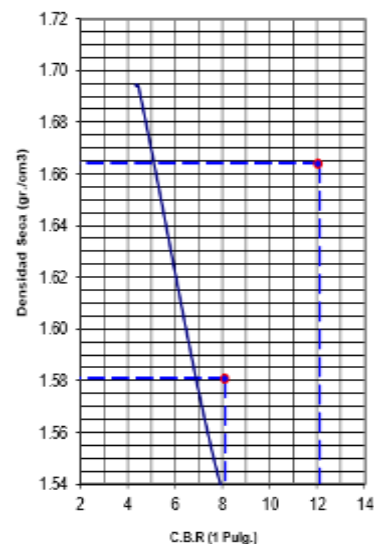
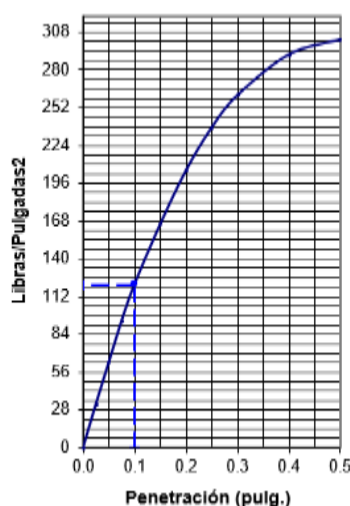
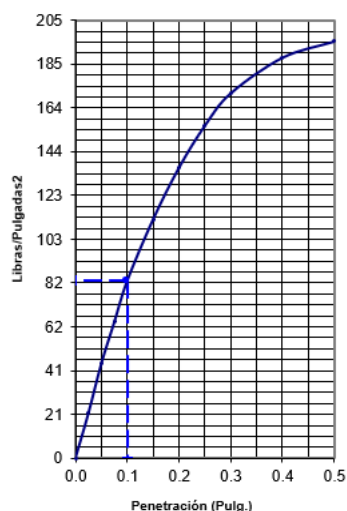
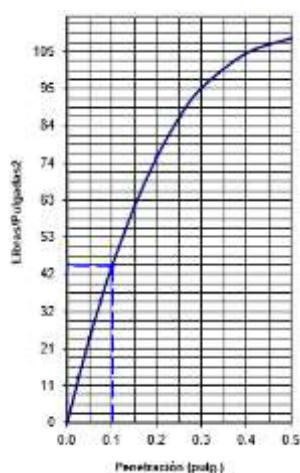
CBR a 2.5 mm (0.1") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	6.4
CBR al 95% de la MDS %	5
CBR a 5.06 mm (0.2") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	7.6
CBR al 95% de la MDS %	5.8

CBR (ASTM D-1883)

Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-7-6(23)

OBSERVACIONES:

Material proporcionado por el solicitante



INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tafur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP: N° 73425

3R GEOINGENIERIA S.A.C.
LABORATORIO GEOTECNICO
Ing. Reynaldo M. Rojas Riquelme, MSc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57900
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
JEFE DE LABORATORIO



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)	
(NORMA NTP 339.145)	
Proyecto :	"Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Solicitante :	Javier Gustavo, Cajaleón Gómez
Muestra :	M-01
Calicata :	C-1
Fecha :	13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO	
Calicata :	1
Muestra :	C-01 +20% de caucho en polvo
Profundidad (m) :	0.0-1.50

DATOS DEL ENSAYO							
DENSIDAD VOLUMÉTRICA							
N° DEL MOLDE	1		2		3		
N° CAPA	5		5		5		
GOLPES POR CAPA N°	56		25		12		
CONO DE LA MUESTRA	NO SATURADO		SATURADO		NO SATURADO		SATURADO
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO	8576		9064.5		8772		8931
PESO DEL MOLDE	4935.5		4935.5		4832		4185
PESO DEL SUELO HÚMEDO	4040.5		4129		3940		4099
VOLUMEN DEL MOLDE	2039		2073.8		2075		2140
DENSIDAD HÚMEDA	1.962		1.991		1.899		1.915
DENSIDAD SECA	1.864		1.536		1.597		1.545
CONTENIDO DE HUMEDAD							
N° DE TARRO	1		2		4		6
TARRO + SUELO HÚMEDO (GR)	598.4		587.8		542.8		692.4
TARRO + SUELO SECO	534.5		516.5		488.6		597.5
PESO DEL AGUA	63.9		71.3		54		94.8
PESO DEL TARRO	200		188		203.1		197.6
PESO DEL SUELO SECO	334.5		328.5		285.5		400
% DE HUMEDAD	19.1		21.7		18.91		23.7
% DE PROMEDIO DE HUMEDAD	18.1		21.7		18.9		23.7

EXPANSIÓN											
FECHA	HORA	TIEMPO (HORA)	EXPANSIÓN			EXPANSIÓN			EXPANSIÓN		
			DIAL	mm	%	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%
13/01/2025	13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/01/2025	13:00	4	0.075	1.91	1.71	0.141	3.58	3.15	0.225	5.72	4.72

ABSORCIÓN			
MOLDE N°	1	2	3
PESO SUELO HÚMEDO + PLATO + MOLDE G	11264	11211	11243
PESO DEL PLATO + MOLDE G	7156	7112	7146
PESO SUELO HÚMEDO EMBEBIDO G	4128	4000.5	4097
PESO SUELO HÚM. SIN EMBEBER G	4040.5	3940	3878
PESO DE AGUA ABSORBIDA	88.5	159	219
PESO DEL SUELO SECO G	3382.5	3513.7	3267.1
ABSORCIÓN DE AGUA %	2.6	4.8	6.7

PENETRACIÓN										
PENETRACIÓN										
CARGA pulg	STAND Kg/cm2	MOLDE N° 1			MOLDE N° 1			MOLDE N° 1		
		DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2	DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2	DIAL	CARGA kg	PRESIÓN kg/cm2
0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.025	15	15	0.8	12.8	12.8	0.7	9.3	9.3	0.5
1.270	0.06	29.8	29.8	1.5	25.1	25.1	1.3	19.9	19.9	1
1.905	0.075	44	44	2.3	37.7	37.7	1.9	28.2	28.2	1.5
2.540	0.1	57.3	57.3	3	48.3	48.3	2.5	35.1	35.1	1.8
3.810	0.15	80.8	80.8	4.2	67.9	67.9	3.5	49.3	49.3	2.5
5.080	0.2	98.3	98.3	5.1	83.5	83.5	4.3	61.4	61.4	3.2
6.350	0.5	112.1	112.1	5.8	95.3	95.3	4.9	68.5	68.5	3.5
7.620	0.3	122.5	122.5	6.3	103.8	103.8	5.4	74.5	74.5	3.8
10.150	0.4	137	137	7.1	116.2	116.2	6	83.3	83.3	4.3
12.700	0.5	144.6	144.6	7.5	120	120	6.2	89	89	4.6



3R GeoIngeniería S.A.C.

Servicios Geotécnicos e Ingeniería Especializada en Obras Civiles y Mineras

GeoLab Laboratorio Geotécnico — Laboratorio de Mecánica de Suelos y Control de Calidad de Materiales
Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación — Estudios Geotécnicos — Geotecnia Ambiental — Gestión de Riesgos Geotécnicos y Geológicos



CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) (NORMA NTP 339.145)

Proyecto : "Uso de caucho en polvo para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles"
Localización : Direc: Av. Sol de Naranjal/ tramo Av. Paramonga y Av. Pacasmayo
Muestra : Av. Sol de Naranjal tramo Paramonga
Perforación : Cielo Abierto
Fecha : 13 de junio del 2024

DATOS DEL ENSAYO

Calicata : 1
Muestra : C-01+ 20% caucho en polvo
Profundidad (m) : 0.0-1.50

GRÁFICO DE PENETRACIÓN DE CBR

RESULTADOS DE ENSAYO

Pactor Modificado (ASTMD-1557)

Método de Compactación	"A"
Máxima Densidad Seca kg/cm ²	1.664
Óptimo cont. De Humedad	19

CBR (ASTM D-1883)

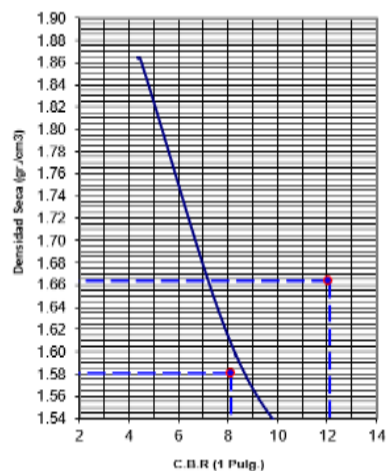
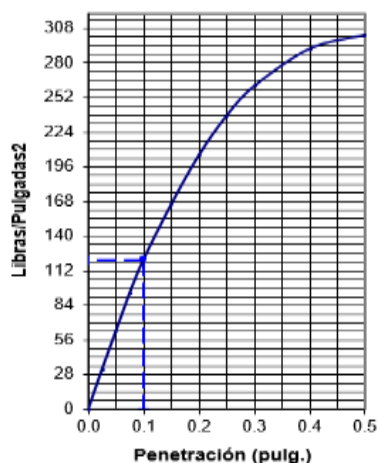
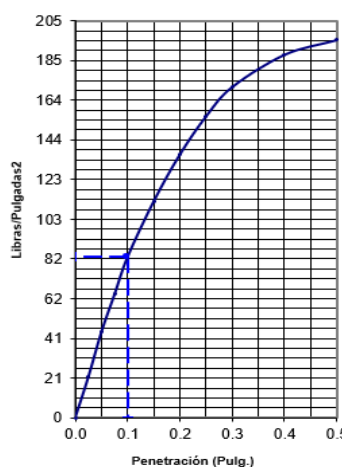
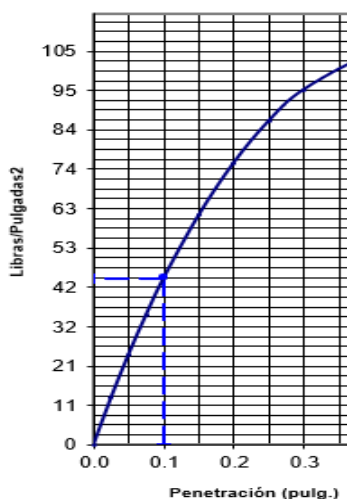
CBR a 2.5 mm (0.1") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	4.3
CBR al 95% de la MDS %	3.3
CBR a 5.06 mm (0.2") de Penetración	
CBR al 100% de la MDS %	48
CBR al 95% de la MDS %	3.9

CBR (ASTM D-1883)

Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-7- 6(23)

OBSERVACIONES:

Material proporcionado por el solicitante



INGENIEROS DEL PERÚ
Ing. Oswaldo C. Tatur Trejo
INGENIERO CIVIL
CIP: N° 73425



Ing. Reynaldo M. Reyes Roque, MSc. Dr.
INGENIERO CIVIL CIP N° 57900
Doctor en Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Geotécnica
RFE DE LABORATORIO

Anexo B: Diseño de Pavimento Flexible

Para CBR 4.3%

DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

PROYECTO:	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES
AUTOR	JAVIER GUSTAVO CAJALEÓN GOMEZ

MÉTODO AASTHO -93

Es uno de los métodos mas utilizados y de mayor utilización a nivel internacional para el diseño de pavimentos rígidos.

FORMULACIÓN DE DISEÑO

La ecuación básica de diseño a la que llegó AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, desde un desarrollo analítico, se encuentra plasmada también en monogramas de cálculo, éstos esencialmente basados en los resultados obtenidos de la prueba experimental de la carretera AASHTO. La ecuación de diseño para pavimentos rígidos modificada para la versión actual es la que a continuación se presenta:

FORMULA GENERAL AASTHO

$$\log_{10}(WB) = Z_r \times S_o + 9.36 + \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{0.01}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M) - 8.07$$

Donde:

SN	= Número Estructural
W18	= Tráfico (Número de ESAL's)
Zr	= Desviación Estándar Normal
So	= Error Estándar Combinado de la predicción del Tr
ΔPSI	= Diferencia de Serviciabilidad (Po-Pt)
Po	= Serviciabilidad Inicial
Pt	= Serviciabilidad Final
Mr	= Módulo de Resiliencia

VARIABLES DEL DISEÑO

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

En base a este número estructural, se identifican y determinan un conjunto de espesores de cada capa de la estructura del pavimento, que deben ser construidas sobre la subrasante para soportar las cargas vehiculares con aceptable serviciabilidad durante el periodo establecido en el proyecto.

1.- ESTUDIO DE TRANSITO

1.1.- Transito (demanda)

Probablemente, la variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento, por un eje simple de dos ruedas cargado con 8.2 ton de peso, con neumáticos con presión de 80 lb./pulg².

Cálculo de tasas de crecimiento y la proyección

Se puede calcular el crecimiento de tránsito utilizando una fórmula simple:

$$T_n = T_o (1 + i)^{n-1}$$

Donde:

T_n = Tránsito proyectado al año "n" en veh/día.

T_o = Tránsito actual (año base o) en veh/día.

n = Años del periodo de diseño.

i = Tasa anual de crecimiento del tránsito que se define en correlación con la dinámica de crecimiento socio-económico(*) normalmente entre 2% y 6% a criterio del equipo del estudio.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento.

1.2.- Determinación del tránsito existente.

El volumen existente en el tramo, considera el promedio diario anual del total de vehículos (ligeros y pesados) en ambos sentidos.

Para la obtención de la demanda de tránsito que circula en cada sub tramo en estudio, se requerirá como mínimo la siguiente información:

a. El tránsito promedio semanal (TPDS) mediante conteos de tránsito en cada sub tramo (incluyendo un sábado o un domingo) por un periodo consecutivo de 7 días (5 día de semana+Sábado+Domingo), como mínimo, de una semana que haya sido de circulación normal. Los conteos serán volumétricos y clasificados por tipo de vehículo. Así mismo en caso no hubiera información oficial, sobre pesos por eje, aplicable a la zona, se efectuara un censo de carga Vehicular durante 2 días consecutivos.

b. Número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados.

c. Con los datos obtenidos, se definirá el Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes (EE) para el periodo de diseño del pavimento.

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

1.1. CALCULO DE LOS EJES EQUIVALENTES ESAL'S(W1)

$$\text{ESAL's}(W18) = 4,529,400.00$$

$$\text{ESAL's}(W18) = 4.53E+06$$

2. CONFIABILIDAD:

Se denomina confiabilidad (R%) a la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. También se puede entender a la confiabilidad como un factor de seguridad, de ahí que su uso se debe al mejor de los criterios.

Cuadro 12.6
Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años) según rango de Tráfico

Nivel de Servicio	Trafico	Subestándar Combinado	Nivel de Confiabilidad (R)
Control de Baja Volumen de Tráfico	T_{10}	10,000	95%
	T_{20}	50,000	90%
	T_{30}	100,000	85%
	T_{40}	200,000	80%
	T_{50}	500,000	75%
Nivel de Servicio	T_{10}	1,000,000	90%
	T_{20}	5,000,000	85%
	T_{30}	10,000,000	80%
	T_{40}	20,000,000	75%
	T_{50}	50,000,000	70%

Cuadro 12.8
Coeficiente Institucional de la Dirección Estándar Normal (I_{DN})
Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años)
Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico

Nivel de Servicio	Trafico	Subestándar Combinado	Coeficiente Institucional (I _{DN})
Control de Baja Volumen de Tráfico	T_{10}	10,000	1.00
	T_{20}	50,000	1.00
	T_{30}	100,000	1.00
	T_{40}	200,000	1.00
	T_{50}	500,000	1.00
Nivel de Servicio	T_{10}	1,000,000	1.00
	T_{20}	5,000,000	1.00
	T_{30}	10,000,000	1.00
	T_{40}	20,000,000	1.00
	T_{50}	50,000,000	1.00

$$R(\%) = 85.00 \%$$

2.1. DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Z_r).

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad.

$$Z_r = -1.036$$

2.2. ERROR ESTÁNDAR COMBINADO (S_o):

AASHTO propuso los siguientes valores para seleccionar la Variabilidad o Error Estándar Combinado S_o, cuyo valor recomendado es:

Para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
En construcción nueva	0.45

$$S_o = 0.450$$

4. SERVICIABILIDAD (Δ PSI):

El Índice de Servicio Presente, es la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Su valor varía de 0 a 5. Un valor de 5 refleja la mejor comodidad teórica (difícil de alcanzar) y por el contrario un valor de 0 refleja el peor. Cuando la condición de la vía decrece por deterioro, el PSI también decrece.

ÍNDICE DE SERVICIO	CALIFICACIÓN
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Entonces:

$$P_o = 4.3$$

$$P_t = 2.5$$

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

$$\Delta PSI = 1.80$$

5. MÓDULO RESILIENTE (M_r)

El módulo resiliente es una medida de la rigidez del suelo de sub rasante, el cual para su cálculo, deberá determinarse mediante el ensayo de resiliencia determinado de acuerdo a las recomendaciones del AASHTO

$$CBR = 4.3 \%$$

$$M_r = 6498.46 \text{ PSI}$$

$$\text{Número Estructural requerido SN} = 4.400$$

Cuadro 14.4
Índice de Servicio Presente (PSI)
Índice de Servicio Presente Final o Terminal (P_t)
Coeficiente de Servicio Presente (C_{SP})

Nivel de Servicio	Trafico	Subestándar Combinado	Índice de Servicio Presente (PSI)	Índice de Servicio Presente Final o Terminal (P _t)	Coeficiente de Servicio Presente (C _{SP})
Control de Baja Volumen de Tráfico	T_{10}	10,000	4.3	4.3	1.00
	T_{20}	50,000	4.3	4.3	1.00
	T_{30}	100,000	4.3	4.3	1.00
	T_{40}	200,000	4.3	4.3	1.00
	T_{50}	500,000	4.3	4.3	1.00
Nivel de Servicio	T_{10}	1,000,000	4.3	4.3	1.00
	T_{20}	5,000,000	4.3	4.3	1.00
	T_{30}	10,000,000	4.3	4.3	1.00
	T_{40}	20,000,000	4.3	4.3	1.00
	T_{50}	50,000,000	4.3	4.3	1.00

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Haciendo tanteos de espesor hasta que (Ecuación I) Sea aproximadamente Igual a (Ecuación II):

$$\log_{10}(WB) - Z_r \times S_o + 0.20 + 8.07$$

15.392 ... Ecuación I

$$9.36 \times \log_{10}(SN+1) + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-15}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M^+)$$

15.394 ... Ecuación II

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

$$SN = a1 \times d1 + a2 \times d2 \times m2 + a3 \times d3 \times m3$$

SN	=	Número Estructural.
a1,2,3	=	Coefficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase.
d1,2,3	=	Espesores (en cm) de las capas: superficial, base y subbase.
m2,3	=	Coefficiente de drenaje para las capas: superficial, base y subbase.

a1 = 0.17 /cm

a2 = 0.052 /cm

a3 = 0.047 /cm

CALIDAD DE DRENAJE

Calidad de Drenaje	% de tiempo del año en que el pavimento está expuesto a niveles de 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
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

m2 = 1.15

m3 = 1

Espesor de capa Superficial D1 = 5.00 Cm

Espesor de Base D2 = 20.00 Cm

Espesor de Subbase D3 = 55.00 Cm

Número Estructural requerido SN = 4.400

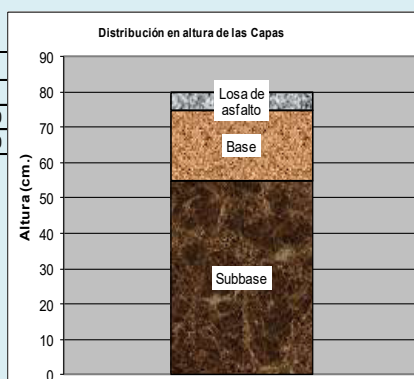
Número Estructural calculado SN = 4.631

Comparando ambos "SN"

CUMPLE

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

	Pulg.	Cm.
Losa de C° Asfáltico	e= 0.020	5.00
Base Granular	e= 0.079	20.00
Subbase granular	e= 0.217	55.00



PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Para CBR mejorado al 7.7 %

DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

PROYECTO:	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES
AUTOR	JAVIER GUSTAVO CAJALEÓN GOMEZ

MÉTODO AASTHO -93

Es uno de los métodos mas utilizados y de mayor utilización a nivel internacional para el diseño de pavimentos rígidos.

FORMULACIÓN DE DISEÑO

La ecuación básica de diseño a la que llegó AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, desde un desarrollo analítico, se encuentra plasmada también en monogramas de cálculo, éstos esencialmente basados en los resultados obtenidos de la prueba experimental de la carretera AASHTO. La ecuación de diseño para pavimentos rígidos modificada para la versión actual es la que a continuación se presenta:

FORMULA GENERAL AASTHO

$$\log_{10}(WB) = Z_r \times S_o + 9.36 + \log_{10}(S_N - 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(S_N - 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M^*) - 8.07$$

Donde:

SN	= Número Estructural
W18	= Tráfico (Número de ESAL's)
Zr	= Desviación Estándar Normal
So	= Error Estándar Combinado de la predicción del Tr
ΔPSI	= Diferencia de Serviciabilidad (Po-Pt)
Po	= Serviciabilidad Inicial
Pt	= Serviciabilidad Final
Mr	= Módulo de Resiliencia

VARIABLES DEL DISEÑO

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

En base a este número estructural, se identifican y determinan un conjunto de espesores de cada capa de la estructura del pavimento, que deben ser construidas sobre la subrasante para soportar las cargas vehiculares con aceptable serviciabilidad durante el periodo establecido en el proyecto.

1.- ESTUDIO DE TRANSITO

1.1.- Transito (demanda)

Probablemente, la variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento, por un eje simple de dos ruedas cargado con 8.2 ton de peso, con neumáticos con presión de 80 lb./pulg².

Cálculo de tasas de crecimiento y la proyección

Se puede calcular el crecimiento de tránsito utilizando una fórmula simple:

$$T_n = T_o (1 + i)^{n-1}$$

Donde:

T_n = Tránsito proyectado al año "n" en veh/día.

T_o = Tránsito actual (año base o) en veh/día.

n = Años del periodo de diseño.

i = Tasa anual de crecimiento del tránsito que se define en correlación con la dinámica de crecimiento socio-económico(*) normalmente entre 2% y 6% a criterio del equipo del estudio.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento.

1.2.- Determinación del tránsito existente.

El volumen existente en el tramo, considera el promedio diario anual del total de vehículos (ligeros y pesados) en ambos sentidos.

Para la obtención de la demanda de tránsito que circula en cada sub tramo en estudio, se requerirá como mínimo la siguiente información:

a. El tránsito promedio semanal (TPDS) mediante conteos de tránsito en cada sub tramo (incluyendo un sábado o un domingo) por un periodo consecutivo de 7 días (5 día de semana+Sábado+Domingo), como mínimo, de una semana que haya sido de circulación normal. Los conteos serán volumétricos y clasificados por tipo de vehículo. Así mismo en caso no hubiera información oficial, sobre pesos por eje, aplicable a la zona, se efectuara un censo de carga Vehicular durante 2 días consecutivos.

b. Número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados.

c. Con los datos obtenidos, se definirá el Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes (EE) para el periodo de diseño del pavimento.

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

1.1. CALCULO DE LOS EJES EQUIVALENTES ESAL'S(W1)

$$\text{ESAL's}(W18) = 4,529,400.00$$

$$\text{ESAL's}(W18) = 4.53E+06$$

2. CONFIABILIDAD:

Se denomina confiabilidad (R%) a la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. También se puede entender a la confiabilidad como un factor de seguridad, de ahí que su uso se debe al mejor de los criterios.

Cuadro 12.6
Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años) según rango de Tráfico

Nivel de Confiabilidad	Tráfico	Subestándar Combinado	Rango de Tráfico
Excelente de Bajo Volumen de Tráfico	T_{10}	95.00	100,000
	T_5	90.00	200,000
	T_3	85.00	300,000
	T_1	80.00	400,000
Buena de Volumen de Tráfico	T_{10}	90.00	1,000,000
	T_5	85.00	2,000,000
	T_3	80.00	3,000,000
	T_1	75.00	4,000,000
Regular de Volumen de Tráfico	T_{10}	85.00	5,000,000
	T_5	80.00	10,000,000
	T_3	75.00	15,000,000
	T_1	70.00	20,000,000
Mala de Volumen de Tráfico	T_{10}	80.00	25,000,000
	T_5	75.00	30,000,000
	T_3	70.00	35,000,000
	T_1	65.00	40,000,000

Cuadro 12.8
Coeficiente de Variación de la Desviación Estándar Normal (Zr)
Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años)
Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico

Nivel de Confiabilidad	Tráfico	Subestándar Combinado	Coeficiente de Variación (Zr)
Excelente de Bajo Volumen de Tráfico	T_{10}	95.00	1.00
	T_5	90.00	1.00
	T_3	85.00	1.00
	T_1	80.00	1.00
Buena de Volumen de Tráfico	T_{10}	90.00	1.00
	T_5	85.00	1.00
	T_3	80.00	1.00
	T_1	75.00	1.00
Regular de Volumen de Tráfico	T_{10}	85.00	1.00
	T_5	80.00	1.00
	T_3	75.00	1.00
	T_1	70.00	1.00
Mala de Volumen de Tráfico	T_{10}	80.00	1.00
	T_5	75.00	1.00
	T_3	70.00	1.00
	T_1	65.00	1.00

$$R(\%) = 85.00 \%$$

2.1. DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Zr).

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad.

$$Zr = -1.036$$

2.2. ERROR ESTÁNDAR COMBINADO (So):

AASHTO propuso los siguientes valores para seleccionar la Variabilidad o Error Estándar Combinado So, cuyo valor recomendado es:

Para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
En construcción nueva	0.45

$$So = 0.450$$

4. SERVICIABILIDAD (Δ PSI):

El Índice de Servicio Presente, es la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Su valor varía de 0 a 5. Un valor de 5 refleja la mejor comodidad teórica (difícil de alcanzar) y por el contrario un valor de 0 refleja el peor. Cuando la condición de la vía decrece por deterioro, el PSI también decrece.

ÍNDICE DE SERVICIO	CALIFICACIÓN
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Entonces:

$$Po = 4.3$$

$$Pt = 2.5$$

$$\Delta PSI = Po - Pt$$

$$\Delta PSI = 1.80$$

5. MÓDULO RESILIENTE (Mr)

El módulo resiliente es una medida de la rigidez del suelo de sub rasante, el cual para su cálculo, deberá determinarse mediante el ensayo de resiliencia determinado de acuerdo a las recomendaciones del AASHTO

$$CBR = 4.3 \%$$

$$Mr = 6498.46 \text{ PSI}$$

$$\text{Número Estructural requerido SN} = 4.400$$

Cuadro 14.4
Índice de Servicioabilidad Presente (PSI)
Índice de Servicioabilidad Final o Terminal (PT)
Diferencia de Servicioabilidad Según Rango de Tráfico

Nivel de Confiabilidad	Tráfico	Subestándar Combinado	Índice de Servicioabilidad Presente (PSI)	Índice de Servicioabilidad Final o Terminal (PT)	Diferencia de Servicioabilidad (Δ PSI)
Excelente de Bajo Volumen de Tráfico	T_{10}	95.00	4.30	2.50	1.80
	T_5	90.00	4.30	2.50	1.80
	T_3	85.00	4.30	2.50	1.80
	T_1	80.00	4.30	2.50	1.80
Buena de Volumen de Tráfico	T_{10}	90.00	4.30	2.50	1.80
	T_5	85.00	4.30	2.50	1.80
	T_3	80.00	4.30	2.50	1.80
	T_1	75.00	4.30	2.50	1.80
Regular de Volumen de Tráfico	T_{10}	85.00	4.30	2.50	1.80
	T_5	80.00	4.30	2.50	1.80
	T_3	75.00	4.30	2.50	1.80
	T_1	70.00	4.30	2.50	1.80
Mala de Volumen de Tráfico	T_{10}	80.00	4.30	2.50	1.80
	T_5	75.00	4.30	2.50	1.80
	T_3	70.00	4.30	2.50	1.80
	T_1	65.00	4.30	2.50	1.80

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Haciendo tanteos de espesor hasta que (Ecuación I) Sea aproximadamente Igual a (Ecuación II):

$$\log_{10}(WB) - Z_r \times S_o + 0.20 + 8.07$$

15.392 ... Ecuación I

$$9.36 \times \log_{10}(SN+1) + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 15}\right)}{0.4 + \frac{1}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M^r)$$

15.389 ... Ecuación II

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

$$SN = a1 \times d1 + a2 \times d2 \times m2 + a3 \times d3 \times m3$$

SN	=	Número Estructural.
a1,2,3	=	Coefficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase.
d1,2,3	=	Espesores (en cm) de las capas: superficial, base y subbase.
m2,3	=	Coefficiente de drenaje para las capas: superficial, base y subbase.

$$a1 = 0.17 \text{ /cm}$$

$$a2 = 0.052 \text{ /cm}$$

$$a3 = 0.047 \text{ /cm}$$

CALIDAD DE DRENAJE

Calidad de Drenaje	% de tiempo del año en que el pavimento está expuesto a niveles de 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
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

$$m2 = 1.15$$

$$m3 = 1$$

Espesor de capa Superficial $D1 = 5.00 \text{ Cm}$

Espesor de Base $D2 = 15.00 \text{ Cm}$

Espesor de Subbase $D3 = 45.00 \text{ Cm}$

Número Estructural requerido $SN = 3.850$

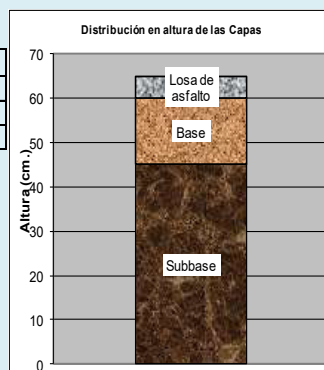
Número Estructural calculado $SN = 3.862$

Comparando ambos "SN"

CUMPLE

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

	Pulg.	Cm.
Losa de C° Asfáltico	e= 0.020	5.00
Base Granular	e= 0.059	15.00
Subbase granular	e= 0.177	45.00



PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Para CBR mejorado al 5 %

DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

PROYECTO:	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES
AUTOR	JAVIER GUSTAVO CAJALEÓN GOMEZ

MÉTODO AASTHO -93

Es uno de los métodos mas utilizados y de mayor utilización a nivel internacional para el diseño de pavimentos rígidos.

FORMULACIÓN DE DISEÑO

La ecuación básica de diseño a la que llegó AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, desde un desarrollo analítico, se encuentra plasmada también en monogramas de cálculo, éstos esencialmente basados en los resultados obtenidos de la prueba experimental de la carretera AASHTO. La ecuación de diseño para pavimentos rígidos modificada para la versión actual es la que a continuación se presenta:

FORMULA GENERAL AASTHO

$$\log_{10}(WB) = Z_r \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{0.01}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(Mr) - 8.07$$

Donde:

SN	= Número Estructural
W18	= Tráfico (Número de ESAL's)
Zr	= Desviación Estándar Normal
So	= Error Estándar Combinado de la predicción del Tráfico
ΔPSI	= Diferencia de Serviciabilidad (Po-Pt)
Po	= Serviciabilidad Inicial
Pt	= Serviciabilidad Final
Mr	= Módulo de Resiliencia

VARIABLES DEL DISEÑO

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

En base a este número estructural, se identifican y determinan un conjunto de espesores de cada capa de la estructura del pavimento, que deben ser construidas sobre la subrasante para soportar las cargas vehiculares con aceptable serviciabilidad durante el periodo establecido en el proyecto.

1.- ESTUDIO DE TRANSITO

1.1.- Transito (demanda)

Probablemente, la variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento, por un eje simple de dos ruedas cargado con 8.2 ton de peso, con neumáticos con presión de 80 lb./pulg².

Cálculo de tasas de crecimiento y la proyección

Se puede calcular el crecimiento de tránsito utilizando una fórmula simple:

$$T_n = T_o (1 + i)^{n-1}$$

Donde:

T_n = Tránsito proyectado al año "n" en veh/día.

T_o = Tránsito actual (año base o) en veh/día.

n = Años del periodo de diseño.

i = Tasa anual de crecimiento del tránsito que se define en correlación con la dinámica de crecimiento socio-económico(*) normalmente entre 2% y 6% a criterio del equipo del estudio.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento.

1.2.- Determinación del tránsito existente.

El volumen existente en el tramo, considera el promedio diario anual del total de vehículos (ligeros y pesados) en ambos sentidos.

Para la obtención de la demanda de tránsito que circula en cada sub tramo en estudio, se requerirá como mínimo la siguiente información:

a. El tránsito promedio semanal (TPDS) mediante conteos de tránsito en cada sub tramo (incluyendo un sábado o un domingo) por un periodo consecutivo de 7 días (5 día de semana+Sábado+Domingo), como mínimo, de una semana que haya sido de circulación normal. Los conteos serán volumétricos y clasificados por tipo de vehículo. Así mismo en caso no hubiera información oficial, sobre pesos por eje, aplicable a la zona, se efectuara un censo de carga Vehicular durante 2 días consecutivos.

b. Número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados.

c. Con los datos obtenidos, se definirá el Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes (EE) para el periodo de diseño del pavimento.

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

1.1. CALCULO DE LOS EJES EQUIVALENTES ESAL'S(W18)

$$\begin{aligned} \text{ESAL's(W18)} &= 4,529,400.00 \\ \text{ESAL's(W18)} &= 4.53\text{E}+06 \end{aligned}$$

2. CONFIABILIDAD:

Se denomina confiabilidad (R%) a la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. También se puede entender a la confiabilidad como un factor de seguridad, de ahí que su uso se debe al mejor de los criterios.

Cuadro 12.6
Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años) según rango de Tráfico

Nivel de Calidad	Trafico	Subestructura (cm)	Nivel de Confiabilidad (R)
Control de Rop. Volumen de Tráfico	T ₁	15,000	95%
	T ₂	50,000	90%
	T ₃	100,000	85%
	T ₄	150,000	80%
Ruido de Control	T ₁	150,000	95%
	T ₂	500,000	90%
	T ₃	1,000,000	85%
	T ₄	1,500,000	80%
	T ₅	2,000,000	75%
	T ₆	2,500,000	70%
	T ₇	3,000,000	65%
	T ₈	3,500,000	60%
	T ₉	4,000,000	55%
	T ₁₀	4,500,000	50%

Cuadro 12.8
Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Zr)
Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años)
Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico

Nivel de Calidad	Trafico	Subestructura (cm)	Desviación Estándar Normal (Zr)
Control de Rop. Volumen de Tráfico	T ₁	15,000	-1.65
	T ₂	50,000	-1.28
	T ₃	100,000	-1.04
	T ₄	150,000	-0.85
Ruido de Control	T ₁	150,000	-1.65
	T ₂	500,000	-1.28
	T ₃	1,000,000	-1.04
	T ₄	1,500,000	-0.85
	T ₅	2,000,000	-0.67
	T ₆	2,500,000	-0.48
	T ₇	3,000,000	-0.29
	T ₈	3,500,000	-0.10
	T ₉	4,000,000	0.09
	T ₁₀	4,500,000	0.28

$$R (\%) = 85.00 \%$$

2.1. DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Zr).

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad.

$$Z_r = -1.036$$

2.2. ERROR ESTÁNDAR COMBINADO (So):

AASHTO propuso los siguientes valores para seleccionar la Variabilidad o Error Estándar Combinado So, cuyo valor recomendado es:

Para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
En construcción nueva	0.45

$$S_o = 0.450$$

4. SERVICIABILIDAD (Δ PSI):

El Índice de Serviciabilidad Presente, es la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Su valor varía de 0 a 5. Un valor de 5 refleja la mejor comodidad teórica (difícil de alcanzar) y por el contrario un valor de 0 refleja el peor. Cuando la condición de la vía decrece por deterioro, el PSI también decrece.

ÍNDICE DE SERVICIO	CALIFICACIÓN
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Entonces:

$$\begin{aligned} P_o &= 4.3 \\ P_t &= 2.5 \end{aligned}$$

$$\Delta \text{PSI} = P_o - P_t$$

$$\Delta \text{PSI} = 1.80$$

5. MÓDULO RESILIENTE (Mr)

El módulo resiliente es una medida de la rigidez del suelo de sub rasante, el cual para su cálculo, deberá determinarse mediante el ensayo de resiliencia determinado de acuerdo a las recomendaciones del AASHTO

$$\text{CBR} = 5 \%$$

$$M_r = 7157.01 \text{ PSI}$$

$$\text{Número Estructural requerido} \quad \text{SN} = 4.250$$

Cuadro 14.4
Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)
Índice de Serviciabilidad Final o Terminal (PFI)
Grupos de Serviciabilidad Según Rango de Tráfico

Nivel de Calidad	Trafico	Subestructura (cm)	Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)	Índice de Serviciabilidad Final o Terminal (PFI)
Control de Rop. Volumen de Tráfico	T ₁	15,000	4.30	4.30
	T ₂	50,000	4.30	4.30
	T ₃	100,000	4.30	4.30
	T ₄	150,000	4.30	4.30
Ruido de Control	T ₁	150,000	4.30	4.30
	T ₂	500,000	4.30	4.30
	T ₃	1,000,000	4.30	4.30
	T ₄	1,500,000	4.30	4.30
	T ₅	2,000,000	4.30	4.30
	T ₆	2,500,000	4.30	4.30
	T ₇	3,000,000	4.30	4.30
	T ₈	3,500,000	4.30	4.30
	T ₉	4,000,000	4.30	4.30
	T ₁₀	4,500,000	4.30	4.30

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Haciendo tanteos de espesor hasta que (Ecuación I) Sea aproximadamente Igual a (Ecuación II):

$$\log_{10}(WB) - Z_r \times S_o + 0.20 + 8.07$$

15.392 ... Ecuación I

$$9.36 \times \log_{10}(SN+1) + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 15}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_r)$$

15.390 ... Ecuación II

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

$$SN = a1 \times d1 + a2 \times d2 \times m2 + a3 \times d3 \times m3$$

SN	=	Número Estructural.
a1,2,3	=	Coefficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase.
d1,2,3	=	Espesores (en cm) de las capas: superficial, base y subbase.
m2,3	=	Coefficiente de drenaje para las capas: superficial, base y subbase.

$$a1 = 0.17 \text{ /cm}$$

$$a2 = 0.052 \text{ /cm}$$

$$a3 = 0.047 \text{ /cm}$$

CALIDAD DE DRENAJE

Calidad de Drenaje	% de tiempo del año en que el pavimento está expuesto a niveles de 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
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

$$m2 = 1.15$$

$$m3 = 1$$

Espesor de capa Superficial $D1 = 5.00 \text{ Cm}$

Espesor de Base $D2 = 20.00 \text{ Cm}$

Espesor de Subbase $D3 = 50.00 \text{ Cm}$

Número Estructural requerido $SN = 4.250$

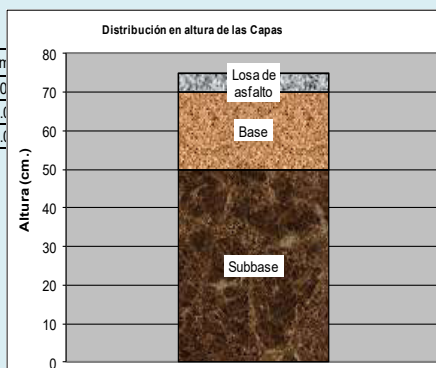
Número Estructural calculado $SN = 4.396$

Comparando ambos "SN"

CUMPLE

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

	Pulg.	Cm
Losa de Cº Asfáltico	e= 0.020	5.0
Base Granular	e= 0.079	20.0
Subbase granular	e= 0.197	50.0



PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Para CBR mejorado al 3.3 %

DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

PROYECTO:	USO DE CAUCHO EN POLVO PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES
AUTOR	JAVIER GUSTAVO CAJALEÓN GOMEZ

MÉTODO AASTHO -93

Es uno de los métodos mas utilizados y de mayor utilización a nivel internacional para el diseño de pavimentos rígidos.

FORMULACIÓN DE DISEÑO

La ecuación básica de diseño a la que llegó AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, desde un desarrollo analítico, se encuentra plasmada también en monogramas de cálculo, éstos esencialmente basados en los resultados obtenidos de la prueba experimental de la carretera AASHTO. La ecuación de diseño para pavimentos rígidos modificada para la versión actual es la que a continuación se presenta:

FORMULA GENERAL AASTHO

$$\log_{10}(WB) = Z_r \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN_i - 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 16}\right)}{0.4 + \frac{1}{(SN_i - 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_r) - 8.07$$

Donde:

SN	= Número Estructural
W18	= Tráfico (Número de ESAL's)
Zr	= Desviación Estándar Normal
So	= Error Estándar Combinado de la predicción del Tráfico
ΔPSI	= Diferencia de Serviciabilidad (Po-Pt)
Po	= Serviciabilidad Inicial
Pt	= Serviciabilidad Final
Mr	= Módulo de Resiliencia

VARIABLES DEL DISEÑO

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

En base a este número estructural, se identifican y determinan un conjunto de espesores de cada capa de la estructura del pavimento, que deben ser construidas sobre la subrasante para soportar las cargas vehiculares con aceptable serviciabilidad durante el periodo establecido en el proyecto.

1.- ESTUDIO DE TRANSITO

1.1.- Transito (demanda)

Probablemente, la variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento, por un eje simple de dos ruedas cargado con 8.2 ton de peso, con neumáticos con presión de 80 lb./pulg².

Cálculo de tasas de crecimiento y la proyección

Se puede calcular el crecimiento de tránsito utilizando una fórmula simple:

$$T_n = T_o (1 + i)^{n-1}$$

Donde:

T_n = Tránsito proyectado al año "n" en veh/día.

T_o = Tránsito actual (año base o) en veh/día.

n = Años del periodo de diseño.

i = Tasa anual de crecimiento del tránsito que se define en correlación con la dinámica de crecimiento socio-económico(*) normalmente entre 2% y 6% a criterio del equipo del estudio.

La demanda o volumen de tráfico (IMDA ó TPD), requiere ser expresado en términos de Ejes Equivalentes acumulados para el periodo de diseño. Un eje equivalente (EE) equivale al efecto de deterioro causado sobre el pavimento.

1.2.- Determinación del tránsito existente.

El volumen existente en el tramo, considera el promedio diario anual del total de vehículos (ligeros y pesados) en ambos sentidos.

Para la obtención de la demanda de tránsito que circula en cada sub tramo en estudio, se requerirá como mínimo la siguiente información:

a. El tránsito promedio semanal (TPDS) mediante conteos de tránsito en cada sub tramo (incluyendo un sábado o un domingo) por un periodo consecutivo de 7 días (5 día de semana+Sábado+Domingo), como mínimo, de una semana que haya sido de circulación normal. Los conteos serán volumétricos y clasificados por tipo de vehículo. Así mismo en caso no hubiera información oficial, sobre pesos por eje, aplicable a la zona, se efectuara un censo de carga Vehicular durante 2 días consecutivos.

b. Número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados.

c. Con los datos obtenidos, se definirá el Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes (EE) para el periodo de diseño del pavimento.

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

1.1. CALCULO DE LOS EJES EQUIVALENTES ESAL'S(W18)

$$\begin{aligned} \text{ESAL's(W18)} &= 4,529,400.00 \\ \text{ESAL's(W18)} &= 4.53\text{E}+06 \end{aligned}$$

2. CONFIABILIDAD:

Se denomina confiabilidad (R%) a la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. También se puede entender a la confiabilidad como un factor de seguridad, de ahí que su uso se debe al mejor de los criterios.

Cuadro 12.6
Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años) según rango de Tráfico

Nivel de Calidad	Trafico	Subíndice de Confiabilidad	Nivel de Confiabilidad (%)
Control de Rep. Volumen de Tráfico	T ₁	75,000	90.00
	T ₂	75,001 - 100,000	85.00
	T ₃	100,001 - 150,000	80.00
	T ₄	150,001 - 250,000	75.00
	T ₅	250,001 - 500,000	70.00
Ruido de Control	T ₁	1,000,001 - 1,500,000	85.00
	T ₂	1,500,001 - 2,000,000	80.00
	T ₃	2,000,001 - 2,500,000	75.00
	T ₄	2,500,001 - 3,000,000	70.00
	T ₅	3,000,001 - 3,500,000	65.00
	T ₆	3,500,001 - 4,000,000	60.00
	T ₇	4,000,001 - 4,500,000	55.00
	T ₈	4,500,001 - 5,000,000	50.00
	T ₉	5,000,001 - 5,500,000	45.00
	T ₁₀	5,500,001 - 6,000,000	40.00

Cuadro 12.8
Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Zr)
Para una sola etapa de diseño (10 a 20 años)
Según el Nivel de Confiabilidad seleccionado y el Rango de Tráfico

Nivel de Calidad	Trafico	Subíndice de Confiabilidad	Desviación Estándar Normal (Zr)
Control de Rep. Volumen de Tráfico	T ₁	75,000	-1.28
	T ₂	75,001 - 100,000	-1.35
	T ₃	100,001 - 150,000	-1.43
	T ₄	150,001 - 250,000	-1.51
	T ₅	250,001 - 500,000	-1.59
Ruido de Control	T ₁	1,000,001 - 1,500,000	-1.28
	T ₂	1,500,001 - 2,000,000	-1.35
	T ₃	2,000,001 - 2,500,000	-1.43
	T ₄	2,500,001 - 3,000,000	-1.51
	T ₅	3,000,001 - 3,500,000	-1.59
	T ₆	3,500,001 - 4,000,000	-1.67
	T ₇	4,000,001 - 4,500,000	-1.75
	T ₈	4,500,001 - 5,000,000	-1.83
	T ₉	5,000,001 - 5,500,000	-1.91
	T ₁₀	5,500,001 - 6,000,000	-1.99

$$R (\%) = 85.00 \%$$

2.1. DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Zr).

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad.

$$Z_r = -1.036$$

2.2. ERROR ESTÁNDAR COMBINADO (So):

AASHTO propuso los siguientes valores para seleccionar la Variabilidad o Error Estándar Combinado So, cuyo valor recomendado es:

Para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
En construcción nueva	0.45

$$S_o = 0.450$$

4. SERVICIABILIDAD (Δ PSI):

El Índice de Serviciabilidad Presente, es la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Su valor varía de 0 a 5. Un valor de 5 refleja la mejor comodidad teórica (difícil de alcanzar) y por el contrario un valor de 0 refleja el peor. Cuando la condición de la vía decrece por deterioro, el PSI también decrece.

ÍNDICE DE SERVICIO	CALIFICACIÓN
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Entonces:

$$\begin{aligned} P_o &= 4.3 \\ P_t &= 2.5 \end{aligned}$$

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

$$\Delta PSI = 1.80$$

5. MÓDULO RESILIENTE (Mr)

El módulo resiliente es una medida de la rigidez del suelo de sub rasante, el cual para su cálculo, deberá determinarse mediante el ensayo de resiliencia determinado de acuerdo a las recomendaciones del AASHTO

$$CBR = 3.3 \%$$

$$M_r = 5485.80 \text{ PSI}$$

$$\text{Número Estructural requerido } SN = 4.660$$

Cuadro 14.4
Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)
Según el Índice de Serviciabilidad Final o Terminal (P_t)
El Factor de Serviciabilidad Presente o Terminal (P_t)
Según el Rango de Tráfico

Nivel de Calidad	Trafico	Subíndice de Confiabilidad	Índice de Serviciabilidad Presente o Terminal (P _t)	Índice de Serviciabilidad Presente o Terminal (P _t)
Control de Rep. Volumen de Tráfico	T ₁	75,000	4.30	4.30
	T ₂	75,001 - 100,000	4.30	4.30
	T ₃	100,001 - 150,000	4.30	4.30
	T ₄	150,001 - 250,000	4.30	4.30
	T ₅	250,001 - 500,000	4.30	4.30
Ruido de Control	T ₁	1,000,001 - 1,500,000	4.30	4.30
	T ₂	1,500,001 - 2,000,000	4.30	4.30
	T ₃	2,000,001 - 2,500,000	4.30	4.30
	T ₄	2,500,001 - 3,000,000	4.30	4.30
	T ₅	3,000,001 - 3,500,000	4.30	4.30
	T ₆	3,500,001 - 4,000,000	4.30	4.30
	T ₇	4,000,001 - 4,500,000	4.30	4.30
	T ₈	4,500,001 - 5,000,000	4.30	4.30
	T ₉	5,000,001 - 5,500,000	4.30	4.30
	T ₁₀	5,500,001 - 6,000,000	4.30	4.30

PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Haciendo tanteos de espesor hasta que (Ecuación I) Sea aproximadamente Igual a (Ecuación II):

$$\log_{10}(WB) - Z_r \times S_o + 0.20 + 8.07$$

15.392 ... Ecuación I

$$9.36 \times \log_{10}(SN+1) + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-15}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_r)$$

15.393 ... Ecuación II

NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$

SN	=	Número Estructural.
a _{1,2,3}	=	Coefficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase.
d _{1,2,3}	=	Espesores (en cm) de las capas: superficial, base y subbase.
m _{2,3}	=	Coefficiente de drenaje para las capas: superficial, base y subbase.

a₁ = 0.17 /cm

a₂ = 0.052 /cm

a₃ = 0.047 /cm

CALIDAD DE DRENAJE

Calidad de Drenaje	% de tiempo del año en que el pavimento está expuesto a niveles de 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
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

m₂ = 1.15

m₃ = 1

Espesor de capa Superficial D₁ = 5.00 Cm

Espesor de Base D₂ = 20.00 Cm

Espesor de Subbase D₃ = 65.00 Cm

Número Estructural requerido SN = 4.660

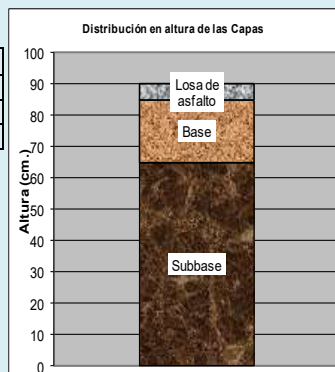
Número Estructural calculado SN = 5.101

Comparando ambos "SN"

CUMPLE

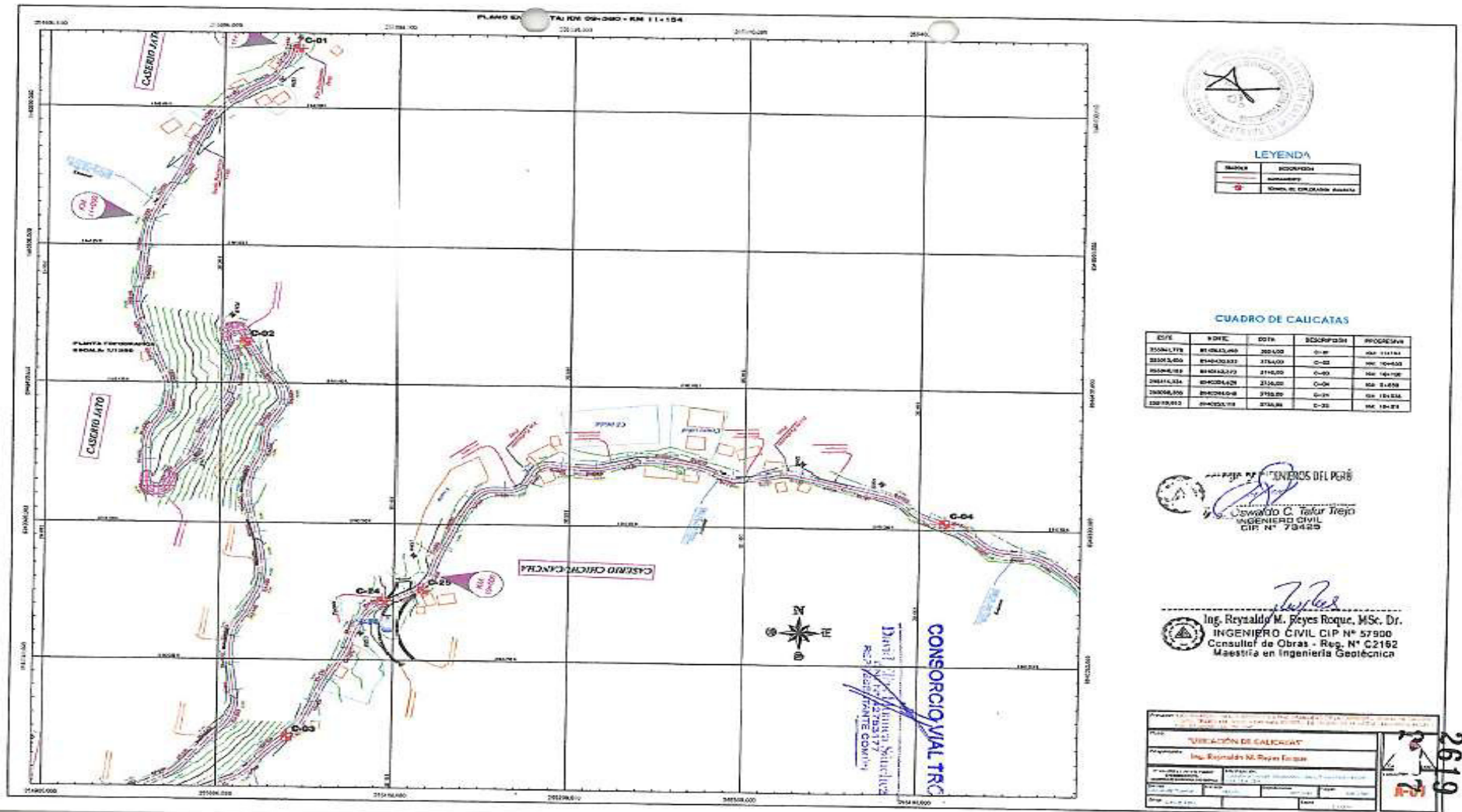
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

	Pulg.	Cm.
Losa de C° Asfáltico	e = 0.020	5.00
Base Granular	e = 0.079	20.00
Subbase granular	e = 0.256	65.00

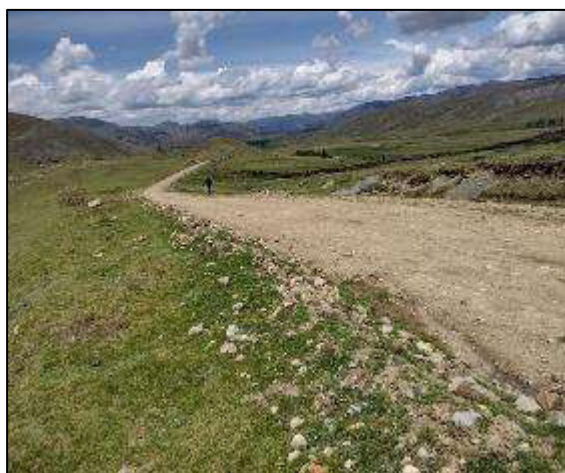


PAUL MARTIN
CALDERON GONZALES
Ingeniero Civil
CIP N° 332105

Anexo C: Planos del Distrito de Utulpuquio- Huaraz



Anexo D: Panel Fotográfico



Ubicación: Dirigiendo a Ultupuquio - Huaraz



Calicata N° 01 Km 11+154



Calicata N° 02 Km 11+650



Calicata N° 03 Km 10+150



Localidad de Ultupuquio- Huaraz



Ubicación para extracción de muestras c-1



Realización de trabajos para extracción C-2



Ubicación para trabajos C-3



Muestras para granulometría



Ensayo limite plastico



Ensayo de Casagrande- LL y LP



Ensayo de CBR

Anexo E: Matriz de Consistencia

Tabla 39:*Matriz de Consistencia*

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología de la Investigación
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente			Diseño
¿De qué manera el uso de caucho en polvo como material alternativo puede contribuir al mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles?	Evaluar el uso de caucho en polvo como alternativa para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles	El uso de caucho en polvo como material alternativo mejora significativamente la subrasante en el diseño de pavimentos flexibles.	Caucho en Polvo	% de dosificación	Diseño de pavimento flexible (Sin adición) 10%, 15%, 20%, de caucho en polvo	Experimental
						Nivel
						Explicativo
						Tipo
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable Dependiente			Aplicada
a. ¿Cuál es el comportamiento del del CBR en la subrasante mejorada con caucho en polvo	a. Determinar el comportamiento del del CBR en la subrasante mejorada con caucho en polvo	a. El uso del caucho en polvo incrementará el comportamient o del CBR del	Alternativa sostenible para el mejoramiento de la subrasante en pavimentos flexibles.	Resistencia	CBR	
						Se encuentra determinada en la

de pavimento flexible?	de pavimento flexible	pavimento flexible			localidad de Ultupuquio que consta de km 000+2000 distrito de Chavín de Huántar
b. ¿De qué manera el uso del caucho en polvo reduce los espesores el diseño de pavimento flexible?	b. Determinar en qué medida el uso del caucho en polvo reduce los espesores el diseño de pavimento flexible	b. El uso del caucho en polvo reducirá los espesores del diseño del pavimento flexible		Número de cargas repetidas	Números de ejes equivalentes hasta la falla (ensayo triaxial o modelos)
					Muestra
c. ¿Cuál es la influencia del uso de caucho en polvo en el costo del diseño de pavimento flexible?	c. Determinar la influencia del uso de caucho en los costos del diseño de pavimento flexible	c. El uso del caucho en polvo reducirá en los costos del diseño del pavimento flexible		Costo de Mantenimiento	Metrados
					A.C.U
					Dosificación de caucho en polvo en diferentes proporciones en las 3 calicatas.

Fuente: Elaboración Propia