

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El diseño y el comportamiento de los pavimentos flexibles han sido siempre un tema fundamental dentro de la ingeniería civil, dado que estas estructuras forman una parte esencial de la infraestructura vial urbana, facilitando el transporte seguro y eficiente de personas y mercancías. La durabilidad, capacidad estructural y el costo de mantenimiento de estas vías dependen directamente del diseño adecuado y de las condiciones de operación a las que son sometidas.

Un pavimento flexible está constituido por varias capas: subrasante, subbase y base, las cuales descansan sobre el terreno natural. Cada una de estas capas tiene funciones específicas, como resistir las cargas vehiculares, distribuir esfuerzos hacia las capas inferiores y proteger al pavimento de deformaciones y fallas. Sin embargo, uno de los factores más críticos que afecta negativamente su comportamiento mecánico es la variación del contenido de humedad en los materiales constituyentes.

Diversos estudios científicos han demostrado que el aumento del contenido de humedad en los suelos genera una reducción significativa en su capacidad portante. Esta capacidad se mide comúnmente mediante el índice CBR (California Bearing Ratio), el cual representa la resistencia del suelo a la penetración y compresión. A mayor humedad, menor es el valor CBR, lo que puede traducirse en deformaciones prematuras, agrietamientos, baches, hundimientos y otros tipos de deterioro visibles en la superficie de rodadura.

A nivel internacional, múltiples investigaciones han evidenciado la sensibilidad de los suelos y materiales granulares a los cambios en el contenido de humedad. Por ejemplo, Abu-Farsakh et al. (2004) estudiaron cómo la humedad afecta el CBR de suelos compactados, concluyendo que los valores CBR disminuyen drásticamente con el incremento de la humedad sobre el nivel óptimo de compactación. Asimismo, George

y Uddin (2000) subrayan que las capas de subrasante y subbase saturadas presentan pérdida de rigidez estructural, incrementando la susceptibilidad a la fatiga del pavimento flexible. Además, Montero (2014), en un estudio sobre estabilización de suelos en condiciones húmedas, destaca que los proyectos viales en zonas tropicales requieren diseños adaptados a la estacionalidad de las lluvias.

En Bolivia, la importancia del estudio de suelos para proyectos viales ha sido reconocida por diversas instituciones, aunque aún existen vacíos respecto al comportamiento de los materiales bajo condiciones variables de humedad. El Servicio Nacional de Caminos (SNC) y la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) han establecido normas para el diseño de pavimentos flexibles, pero rara vez se incluyen análisis detallados del efecto de la humedad en el valor soporte de las capas.

Investigaciones como la de Villarroel (2018), desarrollada en la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), demostraron que, en suelos arcillosos típicos del altiplano, el valor CBR disminuye hasta en un 50% cuando el contenido de humedad supera el óptimo. Por otro lado, Gonzales (2020), en su estudio sobre la red vial de Santa Cruz, observó que las vías construidas con materiales locales no estabilizados presentaron deformaciones graves tras una temporada de lluvias, señalando la necesidad de considerar la humedad en el diseño.

En la ciudad de Tarija, donde la variabilidad climática incluye una marcada época de lluvias, se han ejecutado numerosos proyectos de pavimentos flexibles en barrios urbanos y periféricos. No obstante, muchos de ellos han presentado deterioros prematuros, especialmente en zonas con suelos arcillosos o limosos que retienen humedad.

Reportes técnicos del Gobierno Autónomo Municipal de Tarija (GAMT, 2022) destacan que gran parte de las vías urbanas requieren mantenimientos recurrentes debido a la pérdida de capacidad portante de las capas estructurales durante y después de la temporada lluviosa.

En ese contexto, el presente proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar experimentalmente el impacto de la variación del contenido de humedad sobre el valor soporte (CBR) de las capas subrasante, subbase y base en una zona representativa de la ciudad de Tarija. Se busca generar información útil y contextualizada para mejorar el diseño de pavimentos flexibles, considerando simulaciones reales en laboratorio con variaciones controladas de humedad y los materiales disponibles en la región.

Con los resultados obtenidos, se pretende aportar recomendaciones prácticas a ingenieros y autoridades responsables de obras viales, con el fin de mejorar la durabilidad y eficiencia de las calles urbanas, reduciendo la necesidad de intervenciones frecuentes y costosas.

1.2 Situación problemática

1.2.1 Problema

¿Cómo influye la variación de la humedad en el valor soporte (CBR) de las capas subrasante, subbase y base de un pavimento flexible con aplicación a vías urbanas en la ciudad de Tarija?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Radica en su impacto directo sobre la vida útil de las vías urbanas, la seguridad vial y los costos de mantenimiento. Este estudio es factible debido a la disponibilidad de materiales, acceso a laboratorios de ensayo, y la existencia de tramos viales representativos que permiten la toma de muestras en condiciones reales. Además, se cuenta con la colaboración técnica y académica necesaria para llevar a cabo el análisis experimental.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

El presente estudio se lleva a cabo en el departamento de Tarija, provincia Cercado, específicamente en la ciudad de Tarija, en el tramo urbano comprendido entre los barrios Miraflores – San Blas y El puente Temporal-San Jacinto. Esta zona fue

seleccionada debido a sus características topográficas, suelos con alta presencia de humedad y su importancia como vía de tránsito urbano, donde se evidencian problemas de deterioro prematuro en pavimentos flexibles. Las muestras representativas para el análisis del valor soporte (CBR) de las capas de subrasante, subbase y base fueron tomadas directamente de este sector, garantizando la validez local de los resultados obtenidos.

La investigación se desarrolló durante el periodo comprendido entre marzo y noviembre de 2021, abarcando las etapas de levantamiento de información de campo, ejecución de ensayos de laboratorio bajo diferentes condiciones de humedad, análisis e interpretación de resultados, y redacción del trabajo de grado. Este marco temporal incluye tanto la temporada seca como la húmeda, permitiendo observar con mayor claridad la variación en el comportamiento del suelo frente a los cambios de humedad, factor clave para la evaluación del valor soporte en condiciones reales de la vía urbana estudiada.

1.3 Justificación

La presente investigación es necesaria porque aborda una problemática recurrente en las vías urbanas de Tarija: la pérdida de capacidad estructural del pavimento debido a la variabilidad de humedad en sus capas. Este fenómeno es poco considerado en los diseños convencionales, lo que compromete la durabilidad de las obras viales.

Al identificar y cuantificar el impacto de la humedad sobre el valor soporte de los materiales locales, se busca proporcionar información técnica que sirva como base para mejorar los criterios de diseño y mantenimiento de pavimentos urbanos. Además, el estudio puede ser replicado en otras regiones con condiciones similares, aportando al desarrollo de una infraestructura vial más sostenible y segura.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de la variación de la humedad en el valor soporte (CBR) de las capas subrasante, subbase y base de un pavimento flexible, aplicado a vías urbanas de la ciudad de Tarija.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima de los materiales que componen las capas subrasante, subbase y base mediante ensayos de laboratorio.
- Evaluar el valor soporte (CBR) de cada capa en distintas condiciones de humedad (óptima, por debajo y por encima del óptimo).
- Analizar comparativamente los resultados obtenidos para identificar la relación entre el contenido de humedad y el valor CBR.
- Formular recomendaciones para el diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles en función de los resultados.

1.5 Hipótesis

“La variación del contenido de humedad influye significativamente en el valor soporte (CBR) de las capas subrasante, subbase y base de un pavimento flexible en vías urbanas de Tarija”

1.6 Operacionalización de las variables

Para llevar a cabo esta investigación, se definieron claramente las variables que intervienen en el estudio, identificando sus dimensiones, indicadores y formas de medición, a fin de garantizar la objetividad y confiabilidad de los datos obtenidos.

1.6.1 Variable independiente

Es la humedad del suelo, la cual se mide como porcentaje mediante un ensayo de laboratorio que determina cuánta agua contiene el suelo en distintos estados: humedad natural, humedad óptima y humedad por encima del óptimo.

X_1 = % Porcentaje de humedad.

1.6.2 Variable dependiente

Es el valor soporte (CBR), que indica la capacidad del suelo para resistir cargas. Este valor se obtiene con el ensayo CBR, un procedimiento estándar que mide qué tanto esfuerzo necesita un pistón para penetrar el suelo compactado.

Y_1 = Valor de soporte (CBR).

Ambas variables se analizaron en las tres capas del pavimento flexible: subrasante, subbase y base.

1.7 Identificación del tipo de investigación

El presente estudio se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, con un propósito aplicado, un diseño experimental y un alcance explicativo.

En primer lugar, se trata de una investigación cuantitativa, ya que se utilizarán datos numéricos obtenidos a través de ensayos de laboratorio (como el valor CBR) para analizar objetivamente el comportamiento de las capas del pavimento bajo distintas condiciones de humedad. Este enfoque permite medir variables, formular hipótesis y probarlas mediante procedimientos estadísticos.

Respecto a su propósito, la investigación es aplicada, porque busca dar solución a un problema concreto relacionado con el desempeño estructural de las capas subrasante, subbase y base en vías urbanas, contribuyendo así al diseño más eficiente y duradero de pavimentos flexibles.

En cuanto al diseño metodológico, se adopta un enfoque experimental, ya que se manipulará deliberadamente la variable independiente “humedad del suelo” para observar su efecto sobre la variable dependiente, que es el valor soporte (por ejemplo, el CBR). El estudio se desarrollará en condiciones controladas, siguiendo procedimientos que permitan establecer relaciones confiables entre las variables.

Finalmente, el alcance de la investigación es explicativo, dado que no solo se pretende describir o correlacionar los datos, sino también explicar la causa del cambio en el valor soporte en función de la variación de la humedad, identificando relaciones de tipo causa-efecto. En este caso, la causa es la variación de la humedad en las capas del pavimento, y el efecto es la alteración del valor soporte del suelo.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1 Unidades de estudio

Las unidades de estudio están conformadas por los suelos utilizados en las capas subrasante, subbase y base de un pavimento flexible ubicado en vías urbanas de la ciudad de Tarija. Las muestras fueron recolectadas en tramos seleccionados que reflejan condiciones típicas de los proyectos viales locales.

1.8.2 Población

La población está constituida por todos los suelos que conforman las capas subrasante, subbase y base de pavimentos flexibles en vías urbanas de la ciudad de Tarija, especialmente aquellos que se utilizan habitualmente en proyectos viales de la región. Esta población incluye la variedad de materiales que presentan diferentes características físicas y mecánicas, bajo diversas condiciones de humedad natural del entorno.

1.8.3 Muestra

La muestra está compuesta por 21 especímenes de suelo, obtenidos a partir de 3 tipos de suelo representativos de las capas estructurales del pavimento flexible (subrasante,

subbase y base), y cada uno de ellos ensayado bajo 7 diferentes condiciones de humedad.

Estas muestras fueron seleccionadas y analizadas en laboratorio con el fin de evaluar la influencia de la variación de humedad en el valor soporte (CBR) de cada tipo de capa.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia e intencional, debido a la accesibilidad de las zonas de estudio y la representatividad técnica de los tramos seleccionados. La elección se fundamentó en criterios de localización urbana, historial de deterioro y facilidad de extracción de muestras.

1.9 Métodos y técnicas empleadas

1.9.1 Metodología para la evaluación de la variación de humedad en el laboratorio

Con el objetivo de analizar cómo influye el contenido de humedad en la capacidad de soporte de las capas del pavimento (subrasante, subbase y base), se diseñó un procedimiento experimental en laboratorio. Este consistió en aplicar diferentes niveles de humedad a muestras compactadas de suelo y determinar su resistencia mediante el ensayo CBR. La metodología fue desarrollada de manera secuencial, permitiendo un control riguroso y sistemático de cada etapa del proceso.

En primera instancia, se determinaron los valores de referencia del suelo mediante el ensayo de compactación Proctor modificado (T-180), obteniendo la humedad óptima y la densidad seca máxima. Estos parámetros sirvieron como base para establecer las condiciones de variación de humedad a estudiar. A partir de la humedad óptima, se definieron seis niveles adicionales de contenido de agua: tres valores por debajo y tres por encima de dicho punto, con el fin de simular condiciones reales de campo, tanto en estado seco como en estado húmedo.

Para cada nivel de humedad establecido, se calculó la cantidad exacta de agua a incorporar por kilogramo de suelo seco. Este cálculo se realizó utilizando una fórmula que considera la diferencia entre la humedad deseada y la humedad inicial del suelo. Una vez añadido el volumen de agua correspondiente, las muestras fueron mezcladas manualmente hasta lograr una distribución homogénea de la humedad en toda la masa de suelo.

Posteriormente, las muestras fueron compactadas en moldes CBR siguiendo los parámetros del método Proctor Modificado, lo que implicó aplicar un número específico de golpes por capa, distribuidas en cinco capas. Luego de la compactación, se procedió a la saturación de las muestras durante varios días, con el fin de replicar condiciones de campo donde el suelo puede verse afectado por lluvias o mal drenaje.

Finalmente, se realizaron los ensayos CBR en cada muestra utilizando la prensa de penetración, lo que permitió determinar el valor de soporte correspondiente a cada nivel de humedad. Con los resultados obtenidos, se elaboró una curva de comportamiento CBR en función del contenido de humedad, observándose que el valor de soporte aumenta a medida que la humedad se aproxima al valor óptimo, y disminuye al superarlo, comportamiento típico de suelos con características arcillosas.

1.9.2 Técnicas

Para llevar a cabo el análisis de la influencia de la variación del contenido de humedad en la capacidad de soporte del suelo de las capas de subrasante, sub base y base, se aplicaron diversas técnicas estandarizadas en laboratorio, orientadas tanto a la caracterización física del suelo como a la evaluación de su comportamiento mecánico. A continuación, se detallan las principales técnicas utilizadas:

➤ Extracción y Preparación de Muestras

Técnica: Muestreo de suelos alterados en campo.

Descripción: Se extrajeron muestras representativas del material de cada capa estructural, las cuales fueron almacenadas en bolsas plásticas adecuadas para conservar sus propiedades iniciales y luego transportadas al laboratorio.

➤ **Determinación de Humedad Natural**

Técnica aplicada: Método del horno (Norma ASTM D2216).

Descripción: Se determinó el contenido de humedad natural de las muestras, secándolas en horno a 105 °C hasta alcanzar masa constante.

➤ **Caracterización Física del Suelo**

Técnicas utilizadas:

Granulometría mecánica (ASTM D422): Para determinar la distribución de tamaños de partículas.

Análisis por hidrometría: Aplicado especialmente a suelos finos.

Límites de Atterberg (ASTM D4318): Para conocer el comportamiento plástico del suelo, incluyendo límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Desgaste de los ángeles: El ensayo de desgaste los ángeles: Para evaluar la resistencia al desgaste y abrasión de los agregados gruesos, principalmente los que se utilizan en las capas de subbase y base de un pavimento flexible.

➤ **Ensayo de Compactación**

Técnica aplicada: Ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557).

Descripción: Se determinó la curva de compactación del suelo mediante compactación en capas con energía estandarizada, obteniendo así la humedad óptima y la densidad seca máxima.

➤ Técnica de Variación de Humedad

Técnica desarrollada: Ajuste controlado del contenido de humedad en función de la curva de compactación.

Descripción: Se establecieron varios niveles de humedad alrededor de la humedad óptima (valores inferiores y superiores). Para cada nivel se calculó la cantidad de agua a adicionar por kilogramo de suelo seco, utilizando la siguiente fórmula:

$$Cant\ agua\ (cm^3) = \frac{(W_{Deseada} \pm W_{Inicial})}{100} * m$$

Donde:

$W_{Deseada}$ = Humedad deseada

$W_{Inicial}$ = Humedad inicial del suelo

m = Masa de suelo seco

Las muestras fueron homogeneizadas manualmente para asegurar una distribución uniforme de humedad.

Compactación en moldes CBR

Técnica aplicada: Compactación de muestras para ensayo CBR, en cinco capas.

Descripción: Se aplicaron golpes según el método Proctor modificado, asegurando la densificación adecuada antes del ensayo.

Saturación de las Muestras

Técnica aplicada: Inmersión en agua durante un periodo continuo.

Descripción: Las muestras compactadas fueron saturadas por cuatro días para simular condiciones de campo bajo presencia de agua o mal drenaje.

➤ **Ensayo CBR**

Técnica aplicada: Ensayo de penetración CBR (ASTM D1883).

Descripción: Se midió la resistencia del suelo a la penetración de un pistón estandarizado. Este valor se expresó como un porcentaje, representando la capacidad de soporte del suelo en relación con un material patrón.

1.9.3 Procedimiento de Aplicación

a) Reconocimiento de campo

- Ubicación de sectores de muestreo (subrasante, sub base y base)
- Levantamiento de información del terreno
- Coordinación logística para recolección de muestras

b) Extracción de muestras

- Toma de muestras alteradas y/o inalteradas
- Identificación, rotulado y transporte al laboratorio

c) Ensayos de caracterización del suelo y agregados

- Determinación de humedad natural (ASTM D-2216)
- Análisis granulométrico (ASTM D-422)
- Límites de Atterberg (ASTM D-4318)
- Clasificación del suelo (ASSTHO)
- Ensayo de Desgaste Los Ángeles (ASTM C-131)

d) Ensayo Proctor modificado (ASTM D-1557)

- Obtención de humedad óptima y densidad seca máxima

e) Diseño de variación de humedad

- Definición de rangos de humedad: $\pm$ por debajo y encima de la óptima
- Cálculo de cantidad de agua por cada muestra

f) Preparación de muestras con humedades variadas

- Mezclado y homogenización manual
- Compactación en moldes CBR (Proctor modificado)

g) Proceso de saturación

- Inmersión controlada de muestras (mínimo 4 días)

h) Ensayo CBR (ASTM D-1883)

- Prueba de penetración sobre cada muestra
- Obtención de valores de soporte (CBR %)

i) Análisis de resultados

- Elaboración de curva CBR vs. contenido de humedad
- Comparación del comportamiento entre capas (subrasante, sub base, base)

j) Redacción y construcción de conclusiones

- Análisis de influencia de la humedad en el soporte
- Recomendaciones para el diseño de pavimentos urbanos

1.10 Alcance de la investigación

El presente proyecto de grado tiene como finalidad evaluar la influencia de la variación del contenido de humedad en el valor soporte (CBR) de las capas que conforman un pavimento flexible: subrasante, subbase y base, con aplicación específica a vías urbanas de la ciudad de Tarija, Bolivia. Para ello, se desarrolló un estudio experimental en laboratorio que permitió someter muestras representativas de cada capa a diferentes

niveles de humedad, con el fin de observar y cuantificar cómo esta variable afecta la capacidad de soporte de los materiales.

El estudio abarca la recolección de muestras en un sector urbano representativo, la caracterización físico-mecánica de los materiales mediante ensayos normalizados (como granulometría, límites de Atterberg, humedad natural, Proctor modificado, desgaste Los Ángeles y CBR), así como la simulación de distintas condiciones de humedad que podrían presentarse en campo por efectos climáticos o problemas de drenaje.

Los resultados obtenidos permitirán construir curvas de comportamiento que relacionan el contenido de humedad con el valor de CBR en cada tipo de capa,

generando criterios técnicos que contribuyan al diseño, evaluación y mantenimiento de pavimentos flexibles urbanos en condiciones reales de humedad variable.

Este proyecto se limita al análisis en condiciones de laboratorio, por lo que no contempla pruebas de campo a escala real ni la evaluación de variables adicionales como el tránsito vehicular o la temperatura. Sin embargo, los datos generados servirán como base para futuras investigaciones y para la toma de decisiones técnicas en proyectos de infraestructura vial urbana.

CAPÍTULO II

INFLUENCIA DE LA

HUMEDAD EN

PAVIMENTOS

CAPÍTULO II

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN PAVIMENTOS

2.1 Pavimentos flexibles y su comportamiento estructural ante la humedad

Los pavimentos flexibles constituyen un sistema estructural formado por capas superpuestas que permiten distribuir progresivamente las cargas del tráfico vehicular hacia el terreno natural. Estas estructuras, al estar constituidas por materiales de comportamiento predominantemente elástico, resultan particularmente sensibles a los cambios en las condiciones ambientales, especialmente a la variación de la humedad. La estructura típica de un pavimento flexible comprende una capa de rodadura asfáltica, una base granular, una subbase opcional y la subrasante.

La presencia de humedad en el sistema afecta directamente la resistencia mecánica de los materiales que componen las distintas capas. Cuando se incrementa el contenido de agua en los suelos o agregados, se reduce el ángulo de fricción interna, disminuye la cohesión entre partículas y se generan deformaciones permanentes que, en conjunto, deterioran el comportamiento estructural del pavimento. Entre los principales daños observados se encuentran la fisuración por fatiga en la capa de rodadura, la deformación plástica en la trilla de rueda y la pérdida de capacidad de carga en las capas inferiores. Por lo tanto, resulta imprescindible considerar el efecto de la humedad tanto en el diseño como en la ejecución y mantenimiento de pavimentos flexibles, particularmente en entornos urbanos donde la presencia de agua por lluvias, fugas o deficiente drenaje superficial es frecuente.

2.2 Efectos hidrológicos de la impermeabilización en áreas urbanas

La expansión de las ciudades y el crecimiento del parque vehicular han conllevado un aumento progresivo de las superficies impermeables en los entornos urbanos, principalmente a través de la pavimentación masiva de calles, avenidas y zonas peatonales. Este fenómeno ha transformado el comportamiento hidrológico de las

cuencas urbanas, alterando el ciclo natural del agua y generando impactos significativos en la infraestructura vial.

La impermeabilización impide que el agua de lluvia se infiltre en el subsuelo, favoreciendo en cambio su escorrentía superficial. Esta escorrentía, en ausencia de sistemas adecuados de drenaje urbano, tiende a acumularse y saturar las capas estructurales del pavimento, especialmente la subbase y la subrasante. A su vez, el transporte de contaminantes urbanos por arrastre superficial puede generar procesos de colmatación, obstrucción de sumideros y deterioro de los materiales por acción química o física. La acumulación de agua y la saturación de las capas inferiores reducen su capacidad portante, generando un comportamiento no lineal del sistema estructural y acelerando la aparición de patologías. En consecuencia, la planificación urbana y el diseño vial deben incorporar medidas de control hidrológico que mitiguen estos efectos adversos.

2.3 Propiedades hidráulicas y comportamiento mecánico del pavimento

El comportamiento del sistema de pavimentación frente al agua depende en gran medida de las propiedades hidráulicas de los materiales que lo componen. Entre estas, destacan la porosidad, la permeabilidad, la infiltración y la capacidad de retención de humedad. Estas características determinan la forma en que el agua interactúa con las distintas capas del pavimento y condicionan su respuesta mecánica ante cargas cíclicas.

La porosidad, definida como la proporción de vacíos en un material, incide directamente en su resistencia. A mayor porosidad, mayor capacidad para permitir el paso del agua, pero también menor rigidez estructural. La permeabilidad, por su parte, expresa la facilidad con la que un fluido atraviesa el medio, siendo fundamental en la evacuación del agua infiltrada. Cuando los materiales no son suficientemente permeables, o cuando la porosidad se combina con un alto contenido de finos, el agua tiende a acumularse, generando presiones intersticiales que reducen la capacidad de soporte del sistema. Por otro lado, la infiltración superficial sin un control adecuado puede favorecer la migración de finos, la pérdida de adherencia entre capas y la

aparición de cavidades internas. Estas alteraciones modifican sustancialmente el comportamiento mecánico del pavimento, lo que demuestra la necesidad de seleccionar materiales que, además de cumplir con los criterios de resistencia, mantengan una adecuada capacidad de gestión hídrica.

2.4 El CBR como indicador de la influencia de la humedad

El valor soporte California (CBR) es un parámetro fundamental en el diseño de pavimentos, ya que permite estimar la capacidad de carga de suelos y materiales granulares bajo condiciones estandarizadas de humedad y compactación. El CBR es particularmente sensible a las variaciones de humedad, razón por la cual su determinación debe realizarse tanto en estado seco como en estado saturado.

La mayoría de los suelos, especialmente aquellos con alto contenido de finos o con comportamiento plástico, experimentan una disminución considerable en su valor CBR al aumentar el contenido de humedad más allá del óptimo de compactación. Esta reducción obedece a la pérdida de fricción entre partículas, al aumento de la presión de poros y a la desagregación de la estructura interna del suelo. En consecuencia, el valor CBR húmedo representa una condición de diseño crítica, ya que permite simular el comportamiento real del suelo en condiciones adversas, como en épocas de lluvia o en presencia de ascenso capilar. En proyectos de pavimentación urbana, la utilización del CBR húmedo como criterio de diseño resulta indispensable para evitar fallos prematuros causados por saturación o mal drenaje. Asimismo, en suelos críticos se recomienda complementar este índice con ensayos de corte directo o triaxiales en condiciones saturadas.

2.5 Implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)

La gestión eficiente del agua en entornos urbanos constituye un desafío creciente, especialmente ante el aumento de fenómenos climáticos extremos y la expansión de zonas impermeables. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) surgen como una alternativa integral que busca replicar el comportamiento hidrológico natural

mediante técnicas que permiten la retención, infiltración, almacenamiento y reutilización del agua pluvial.

Estos sistemas, que incluyen pavimentos permeables, zanjas de infiltración, cunetas verdes, jardines de lluvia y alcorques estructurales, contribuyen a disminuir la escorrentía superficial, mejorar la calidad del agua, reducir el riesgo de inundaciones y evitar la saturación de los sistemas de saneamiento. En el contexto del pavimento flexible, la implementación de SUDS permite mantener condiciones de humedad controladas en las capas estructurales, favoreciendo así su estabilidad y prolongando su vida útil. Asimismo, la integración paisajística y la multifuncionalidad de estos sistemas añaden valor social y ambiental al diseño vial urbano, promoviendo entornos más sostenibles y resilientes.

2.6 Comportamiento de la capa de base frente a la variación de la humedad

La capa de base en un pavimento flexible constituye el primer nivel de distribución de cargas desde la superficie hacia las capas inferiores. Esta capa, generalmente compuesta por materiales granulares triturados, debe poseer una elevada capacidad portante y una resistencia adecuada a las solicitaciones mecánicas inducidas por el tránsito vehicular. No obstante, su comportamiento puede verse comprometido cuando se produce un incremento del contenido de humedad.

El ingreso de agua en la base, ya sea por infiltración directa o por ascenso desde capas inferiores, ocasiona una reducción en el coeficiente de fricción interna de los agregados, disminuye su rigidez y facilita la aparición de deformaciones plásticas. En presencia de finos no plásticos, la saturación promueve procesos de bombeo y migración de partículas que debilitan la estructura. Por ello, es indispensable garantizar un adecuado confinamiento lateral, seleccionar materiales con buen drenaje y, en algunos casos, recurrir a técnicas de estabilización con cemento, cal o emulsiones asfálticas. El empleo de geotextiles, capas drenantes y subdrenes también puede mejorar significativamente el desempeño de la base frente a la humedad.

2.7 Comportamiento de la capa de subbase ante la humedad

La subbase constituye una capa intermedia entre la base y la subrasante, cuya función principal es colaborar en la distribución de cargas, favorecer el drenaje y prevenir la contaminación ascendente de la base por materiales finos. Al estar más próxima al nivel freático, la subbase se encuentra en una posición vulnerable frente a la saturación.

Cuando se presentan condiciones de humedad elevada, la subbase puede perder rigidez estructural, presentar asentamientos diferenciales o incluso inducir fallos por corte si no se ha considerado adecuadamente el tipo de material y su grado de compactación. En su diseño, se recomienda el uso de agregados no plásticos, bien graduados, con baja retención de humedad y alta permeabilidad. En caso de emplear materiales marginales, estos deben ser estabilizados químicamente o combinados con capas drenantes. Además, es aconsejable establecer barreras capilares o sistemas de drenaje longitudinal que minimicen el ascenso de agua hacia las capas superiores. De esta forma, se asegura un comportamiento adecuado de la subbase aún bajo condiciones de saturación.

2.8 Vulnerabilidad de la subrasante ante variaciones hídricas

La subrasante representa el soporte final de la estructura del pavimento y, por tanto, su condición mecánica y estabilidad son determinantes para el desempeño del sistema en su conjunto. La capacidad de carga de la subrasante se encuentra fuertemente influenciada por su tipo de suelo, contenido de humedad, índice de plasticidad y proximidad al nivel freático.

En suelos finos, particularmente aquellos con características expansivas, la variación de humedad puede desencadenar procesos de hinchamiento o contracción volumétrica, generando fisuras, levantamientos o subsidencias que comprometen la integridad estructural del pavimento. La saturación reduce el valor soporte y facilita la deformación permanente bajo cargas repetidas. Para mitigar estos efectos, se recomienda estabilizar la subrasante mediante aditivos hidráulicos, compactarla al contenido óptimo de humedad y, cuando sea necesario, implementar sistemas de

drenaje subterráneo o barreras impermeables. Asimismo, resulta fundamental realizar una caracterización geotécnica detallada que permita identificar zonas problemáticas y adoptar soluciones constructivas adecuadas desde la etapa de diseño.

2.9 Influencia de la humedad en la carpeta de rodamiento

La carpeta de rodamiento, ubicada en la parte superior del pavimento flexible, constituye la capa directamente expuesta a las condiciones climáticas y al tránsito vehicular. Esta capa, generalmente compuesta por mezclas asfálticas en caliente o en frío, cumple funciones esenciales como la distribución inicial de las cargas, la protección de las capas inferiores frente a la intemperie y la provisión de confort y seguridad al usuario mediante una superficie uniforme y con textura adecuada. No obstante, su exposición constante a la acción del agua de lluvia, la humedad ambiental y posibles infiltraciones superficiales puede comprometer significativamente su desempeño funcional y estructural.

El efecto de la humedad en la carpeta de rodamiento se manifiesta de diversas formas. En primer lugar, la presencia de agua en la superficie del pavimento puede reducir la fricción entre los neumáticos y el asfalto, aumentando el riesgo de deslizamiento y disminuyendo la seguridad vial. Por otro lado, si la mezcla asfáltica no posee una adecuada impermeabilidad o presenta micro fisuras, el agua puede infiltrarse a través de la estructura, debilitando el adhesivo bituminoso que une los agregados. Este fenómeno, conocido como despegue o "stripping", genera una pérdida progresiva de cohesión interna, favoreciendo el agrietamiento, el desgranamiento superficial y la deformación plástica bajo carga repetida.

Adicionalmente, las fluctuaciones de temperatura acompañadas de humedad pueden inducir ciclos de expansión y contracción que agravan las fisuras existentes o propician la aparición de nuevas grietas. En climas fríos, la acumulación de agua en cavidades internas puede congelarse, incrementando el volumen del agua y provocando la fractura del material por presión interna. Estos procesos aceleran el deterioro

superficial del pavimento, reducen su vida útil y aumentan los costos de mantenimiento.

Desde el punto de vista constructivo, es fundamental garantizar que la carpeta de rodamiento cuente con un contenido óptimo de vacíos, buena adhesión asfalto-agregado, y una compactación adecuada. Asimismo, el diseño debe incorporar pendientes transversales eficientes y sellado de juntas o grietas para evitar la penetración de humedad. En pavimentos urbanos, donde las solicitudes hídricas son más intensas debido a la esorrentía y a las redes de servicio subterráneo, el control de la humedad en la carpeta de rodamiento adquiere una importancia estratégica para preservar la integridad del sistema estructural en su conjunto.

2.10 Especificaciones técnicas mínimas de una subrasante

2.10.1 Cuerpo del terraplén

En la ejecución del cuerpo de los terraplenes se utilizarán suelos con CBR igual o mayor que 4% y expansión menor a 4%, en los que se requerirá una compactación de modo de alcanzar un 95 % de la densidad seca máxima del ensayo AASHTO T-180-D para suelos granulares con $IP < 6$, y 90% para suelos finos con IP mayor a 6.

La expansión será determinada tomando en el ensayo indicado (AASHTO T-193).

Cuando por motivos de orden económico el cuerpo del terraplén deba ser construido con materiales de soporte inferiores al indicado hasta el mínimo de 2%, se procederá al aumento del grado de compactación o sustitución del material de modo de obtener el CBR mínimo indicado en la tabla siguiente:

Este procedimiento también se aplica a los tramos en corte o de terraplenes existentes.

Tabla 1. CBR de cuerpo de subrasante.

Profundidad debajo de la subrasante (cm)	CBR mínimo requerido (%)
60 a 90	3
mayor a 90	2

Fuente: Manual de carreteras de la ABC.

El grado de compactación no debe ser mayor al 95% de la densidad seca máxima del ensayo AASHTO T-180-D para suelos que presenten expansión mayor o igual a 2%.

2.10.2 Capa final del terraplén

Los 30 cm. superiores de los terraplenes o de los cortes deben ser constituidos o presentar materiales con CBR mayor o igual a 8% y expansión menor a 2%, correspondiente al 95% de la densidad seca máxima del ensayo AASHTO T-180-D y para el ensayo AASHTO T-193.

El diseño podrá requerir el aumento del grado de compactación hasta el 100% de la densidad máxima del ensayo mencionado, cuando los materiales de los cortes y/o préstamos adyacentes no tengan el valor especificado para el CBR. Si aun así no cumplen con los requisitos, se procederá a la construcción de la capa superior de los terraplenes o a la sustitución de la capa superior equivalente de los cortes, de modo a obtener el CBR mínimo indicado en la tabla siguiente:

Tabla 2. CBR de capa final de la subrasante.

Profundidad debajo de la subrasante (cm)	CBR mínimo requerido (%)
0 a 20	8
20 a 40	6
40 a 60	4

Fuente: Manual de carreteras de la ABC.

2.11 Especificaciones técnicas mínimas de una capa sub base

Para la ejecución de subbases granulares constituidas de capas de suelo natural, mezclas de suelos naturales con gravas naturales o con agregados triturados o productos totales de materiales triturados, en conformidad con los espesores, alineamientos y sección transversal indicados en el diseño.

Se aplica también al relleno de la excavación debajo de la cota de la subrasante en los cortes en roca, cerrados, en espesor mínimo de 30 cm. correspondientes a la carpeta drenante.

2.11.1 Conformación de una capa subbase

Los materiales para emplear en la subbase deben presentar un índice de soporte de

California (CBR) igual o mayor a 40% y una expansión máxima de 2 %, siendo estos índices determinados por el ensayo AASHTO T-193 con la energía de compactación del ensayo AASHTOT-180-D y para la densidad seca correspondiente al 100 % de la máxima determinada en este ensayo.

La subbase será efectuada con materiales que cumplan con una de las siguientes granulometrías:

Tabla 3. Gradaciones para materiales subbase.

Tamiz	Tipo de gradación		
	Unidad		
	A	B	C
3"	100		
2"	-	100	
1 1/2"	-	-	100
1"	-	-	-
3/4"	-	-	-
3/8"	-	-	-
N.º 4	15-45	20-50	25-55

N.º 10	-	-	-
N.º 40	-	-	-
N.º 200	0-10	0-10	0-10

Fuente: Manual de carreteras de la ABC.

Cuando por motivos de orden económico de disponibilidad de materiales, el CBR mínimo indicado no es obtenido, se puede realizar una energía de compactación mayor del ensayo arriba indicado; si aun así el valor no es alcanzado, éste podrá ser reducido hasta el mínimo de 20 %, con la correspondiente revisión del diseño del pavimento.

El material de subbase deberá presentar un diámetro máximo igual o menor a 7,50 cm y un porcentaje máximo del 10 %, en peso de las partículas que pasen por el tamiz N° 200.

Un mínimo de 4 % en peso de las partículas, deberá pasar por el tamiz N° 200, cuando el material no presente plasticidad. Si el material presentara plasticidad, este porcentaje, será por lo menos de un 2 %. El coeficiente de uniformidad del material deberá ser mayor a 10 ($D_{60}/D_{10} > 10$).

El agregado retenido en el tamiz N° 10 debe estar constituido por partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados, así como de materiales orgánicos, terrones de arcilla u otras sustancias perjudiciales.

El material para subbase no deberá presentar índice de plasticidad mayor que 6 (IP menor o igual a 6) y el límite líquido mayor que 25 (LL menor o igual a 25). Podrá admitirse un IP menor o igual a 8, siempre que la equivalente arena sea mayor que 20.

2.12 Especificaciones técnicas mínimas de una capa base

Se debe regular la calidad y gradación de las mezclas; la ejecución y control de la capa base de material granular natural y/o triturado, que constituye una capa de la estructura del pavimento, con espesor constante en toda la sección transversal. Esta capa se colocará debidamente compactada y regularizada, respetando el alineamiento, perfil y

secciones transversales indicados en el proyecto. La base estabilizada granulométricamente está constituida por una capa granular colocada sobre la subbase, subrasante o sobre el refuerzo estructural compactada y regularizada. Esta capa será ejecutada con materiales previamente seleccionados

2.12.1 Conformación de una capa base

La base estabilizada será ejecutada con materiales que cumplan los siguientes requisitos:

- Poseer una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la siguiente tabla, recomendadas por la AASHTO M-147 de 1990.

Tabla 4. Gradaciones para materiales de base.

Tamiz	Tipo de gradación			
	Unidad			
	A	B	C	D
2"	100	100		
1"	-	75-95	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	50-80
Nº 4	25-55	30-60	35-65	35-65
Nº 10	15-40	20-45	25-50	25-30
Nº 40	8-20	15-30	15-30	10-30
Nº 200	2-8	5-15	5-15	0-15

Fuente: Manual de carreteras de la ABC.

- La fracción que pasa el tamiz Nº 40 deberá tener un límite líquido inferior o igual a 25 % y un índice de plasticidad inferior o igual a 6 %. Pasando de este límite, hasta 8 como máximo, el equivalente de arena deberá ser mayor que 30 %.

- La fracción fina de la capa base será arena triturada o natural. La fracción que pasa el Tamiz N° 200 de la serie U.S. Standard no debe ser mayor que dos tercios de la fracción que pasa el tamiz N° 40 de la misma serie
- El Índice Soporte de California (CBR) no deberá ser inferior a 90 % para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5 %, cuando sean determinados con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180D.
- El agregado retenido en el tamiz N°10 estará constituido de partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados y exentos de materia vegetal, terrones de arcilla y otras sustancias perjudiciales. Los agregados gruesos deberán tener un desgaste no superior a 40 a 500 revoluciones según lo determine el ensayo AASHTO T-96.
- El 50% de las partículas retenidas en el tamiz N° 4, de la serie U.S. Standard, para los agregados utilizados para capa base en pavimentos flexibles deben tener al menos una cara fracturada por trituración.

2.13 Drenaje en pavimentos

La humedad es una característica muy especial de los pavimentos, ya que esta reviste gran importancia sobre las propiedades de los materiales que forman la estructura de un pavimento y sobre el comportamiento de estos.

El drenaje de agua en los pavimentos debe ser considerado como parte importante en el diseño de carreteras. El exceso de agua combinado con el incremento de volúmenes de tránsito y cargas, se anticipan con el tiempo para ocasionar daño a las estructuras de pavimento.

2.14 Efectos del agua sobre el pavimento

Los efectos de esta agua (cuando está atrapada dentro de la estructura) sobre el pavimento son los siguientes:

- Reduce la resistencia de los suelos de la subrasante cuando está se satura y permanece en similares condiciones durante largos periodos.
- Succiona los finos de los agregados de las bases, haciendo que las partículas de suelo se desplacen con resultados de perdida de soporte por la erosión provocada.

Con menor frecuencia, se suceden problemas de agua incluida y atrapada, pero no se limitan a ello, tales como:

- Degradación de la calidad del material del pavimento por efecto de la humedad, creando desvestimiento de las partículas de este.
- Los diferenciales que se producen con el desplazamiento dado por el hinchamiento de los suelos.
- Por la expansión y contracción debida al congelamiento de los suelos.

2.15 Conclusiones de pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles, definitivamente, son capaces de soportar un alto flujo de tránsito y cargas bastante pesadas, gracias a su estructura basada en la formación de capas. Creando, de esta forma, todo un sistema unificado especialmente diseñado para resistir los tráficos más exigentes.

No es de extrañar que estos tipos de pavimentos se usen para actuar como los recubrimientos asfálticos de parkings, carreteras y aceras. Sobre todo, porque pueden ofrecer una vida útil de hasta dos décadas, lo que se traduce en ahorro de dinero a largo plazo y en un alto rendimiento garantizado.

2.16 Diseño estructural de un pavimento flexible

El diseño para el pavimento flexible según la AASHTO está basado en la determinación del Número Estructural “SN” que debe soportar el nivel de carga exigido por el proyecto.

A continuación, se describe las variables que se consideran en el método AASHTO:

2.16.1 Módulo de resiliencia

Durante el año se presentan variaciones en el contenido de humedad de la subrasante, las cuales producen alteraciones en la resistencia del suelo, para evaluar esta situación es necesario establecer los cambios que produce la humedad en el módulo resiliente.

Con este fin se obtienen módulos resilientes para diferentes contenidos de humedad que simulen las condiciones que se presentan en el transcurso del año, en base a los resultados se divide el año en periodos en los cuales el MR es constante.

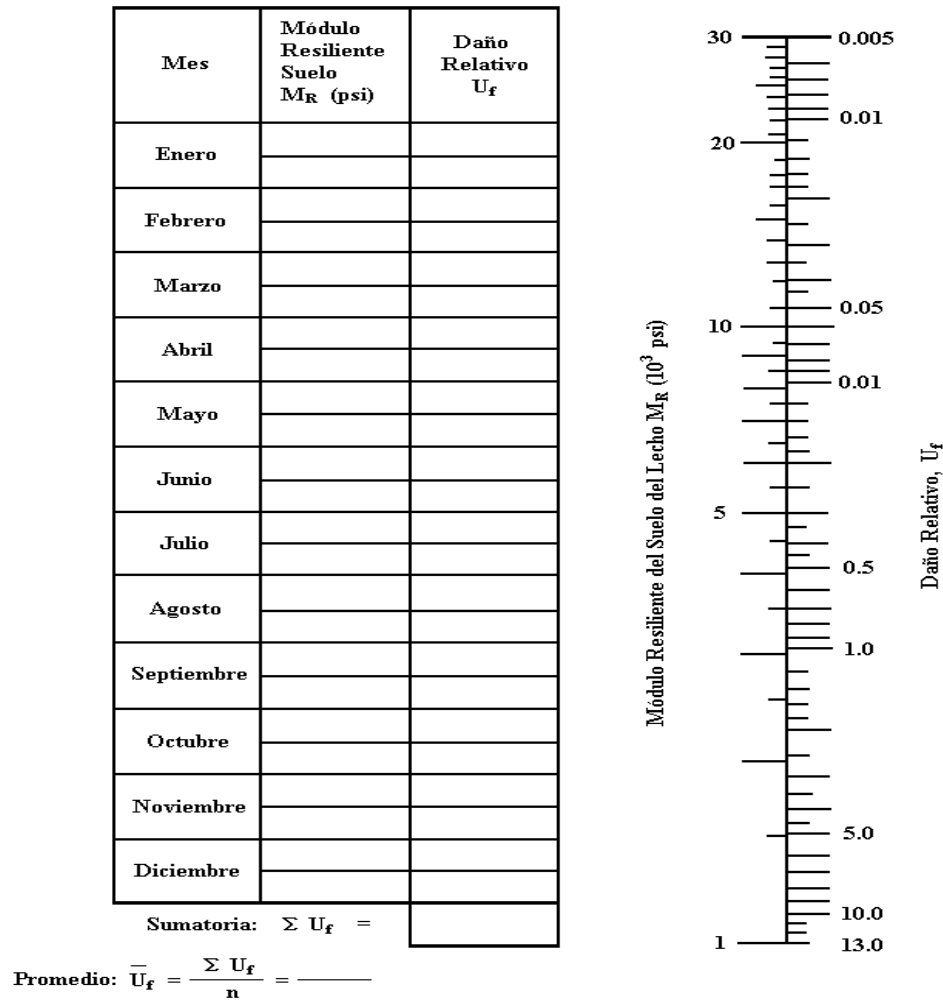
Para cada valor de MR se determina el valor del daño relativo, utilizando el ábaco de o la siguiente expresión:

$$U_f = 1,18 \cdot 10^8 \cdot M_R^{-2,32}$$

Donde:

U_f =Valor de daño relativo

M_R =Modulo resiliente

Gráfico 1. Abaco para la determinación del daño relativo

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Con los resultados de los daños relativos se obtiene el valor promedio anual. El módulo de resiliencia que corresponda al U_f promedio es el valor que se debe utilizar para el diseño. Si no se tiene la posibilidad de obtener esta información se puede estimar el valor del MR en función del CBR.

Relación C.B.R. – módulo de resiliencia

Con los valores del CBR se pueden obtener los módulos resilientes utilizando las relaciones siguientes:

- $CBR < 15\%$ (Shell)
- $M_R \text{ (MPa)} = 10 * CBR$ $K =$ Tiene una dispersión de valores de 4 a 25
- $M_R \text{ (psi)} = 1500 * CBR$ $K =$ Tiene una dispersión de valores de 750 a 3000
- $M_R \text{ (MPa)} = 17,6 * CBR^{0,64}$ (Powell et al)

El Instituto del Asfalto mediante ensayos de laboratorio realizados en 1982, obtuvo las relaciones siguientes:

Tabla 5. Relación entre CBR y modulo resiliente.

Tipo de Suelo	% CBR	M_R en (psi)
Arena	31	46500
Limo	20	30000
Arena magra	25	37500
Limo - arcilla	25	37500
Arcilla limosa	8	11400
Arcilla pesada	5	7800

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.2 Periodo de diseño

Se define como el tiempo elegido al iniciar el diseño, para el cual se determinan las características del pavimento, evaluando su comportamiento para distintas alternativas a largo plazo, con el fin de satisfacer las exigencias del servicio durante el periodo de diseño elegido, a un costo razonable.

Generalmente el periodo de diseño será mayor al de la vida útil del pavimento, porque incluye en el análisis al menos una rehabilitación o recrecimiento, por lo tanto, éste será superior a 20 años. Los periodos de diseño recomendados por la AASHTO se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Periodos de Diseño en Función del Tipo de Carretera

Tipo de Carretera	Periodo de Diseño (Años)
Urbana de tránsito elevado.	30 – 50
Interurbana de tránsito elevado	20 – 50
Pavimentada de baja intensidad de tránsito	15 – 25
De baja intensidad de tránsito, pavimentación con grava	10 – 20

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.3 Índice de serviciabilidad

Tabla 7. Índice de serviciabilidad

Índice de Serviciabilidad (<i>PSI</i>)	Calificación
5 – 4	Muy buena
4 – 3	Buena
3 – 2	Regular
2 – 1	Mala
1 – 0	Muy mala

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Se define el Índice de Serviciabilidad como la condición necesaria de un pavimento para proveer a los usuarios un manejo seguro y confortable en un determinado momento. Inicialmente esta condición se cuantificó a través de la opinión de los conductores, cuyas respuestas se tabulaban en la escala de 5 a 1 como se muestra en la tabla anterior.

Actualmente, una evaluación más objetiva de este índice se realiza mediante una ecuación matemática basada en la inventariación de fallas del pavimento:

$$p = 5,03 - 1,91 \cdot \log[1 + S_V] - 0,01 \cdot [C_f + P]^{0,5} - 1,38 \cdot RD^2$$

Donde:

S_V = Variación de las cotas de la rasante en sentido longitudinal en relación con la rasante inicial (Rugosidad en sentido longitudinal).

C_f = Suma de las áreas fisuradas en pies² y de las grietas longitudinales y transversales en pies lineales, por cada 1000 pies² de pavimento.

P = Área bacheada en pies² por cada 1000 pies² de pavimento.

RD = Profundidad media de ahuellamiento en pulgadas. Mide la rugosidad transversal.

Antes de diseñar el pavimento se deben elegir los índices de servicio inicial y final. El índice de servicio inicial p_o depende del diseño y de la calidad de la construcción. En los pavimentos flexibles estudiados por la AASHTO, el pavimento nuevo alcanzó un valor medio de $p_o = 4,2$.

El índice de servicio final p_t representa al índice más bajo capaz de ser tolerado por el pavimento, antes de que sea imprescindible su rehabilitación mediante un refuerzo o una reconstrucción. El valor asumido depende de la importancia de la carretera y del criterio del proyectista, se sugiere para carreteras de mayor tránsito un valor de $p_t \geq 2,5$ y para carreteras de menor tránsito $p_t = 2,0$.

2.16.4 Pérdida o disminución del índice de serviciabilidad

Los valores anteriormente descritos nos permiten determinar la disminución del índice de servicio, que representa una pérdida gradual de la calidad de servicio de la carretera, originada por el deterioro del pavimento. Por tanto:

$$\Delta PSI = p_o - p_t$$

donde:

PSI = Índice de Servicio Presente

ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado

p_o = Índice de servicio inicial

p_t = Índice de servicio final

2.16.5 Análisis de tráfico

Las cargas de los vehículos son transmitidas al pavimento mediante dispositivos de apoyo multiruedas para determinar la carga total sobre una superficie mayor, con el fin de reducir las tensiones y deformaciones que se producen al interior de la superestructura.

El tráfico es uno de los parámetros más importantes para el diseño de pavimentos. Para obtener este dato es necesario determinar el número de repeticiones de cada tipo de eje durante el periodo de diseño, a partir de un tráfico inicial medido en el campo a través de aforos. El número y composición de los ejes se determina a partir de la siguiente información:

- Periodo de diseño.
- Distribución de ejes solicitantes en cada rango de cargas.
- Tránsito medio diario anual de todos los vehículos TMDA o TPDA.
- Tasas de crecimiento anuales de cada tipo de vehículo.
- Sentido del tráfico.
- Número de carriles por sentido de tráfico.
- Porcentaje del tránsito sobre el carril más solicitado.
- Índice de serviciabilidad.
- Factores de equivalencia de carga.

2.16.6 Transito medio diario anual

El TMDA representa el promedio aritmético de los volúmenes diarios de tránsito aforados durante un año, en forma diferenciada para cada tipo de vehículo.

2.16.7 Clasificación de los vehículos

- Automóviles y camionetas
- Buses
- Camiones de dos ejes
- Camiones de más de dos ejes
- Remolques
- Semirremolques

2.16.8 Tasa de crecimiento

Representa el crecimiento promedio anual del TMDA. Generalmente las tasas de crecimiento son diferentes para cada tipo de vehículo.

2.16.9 Proyección del tránsito

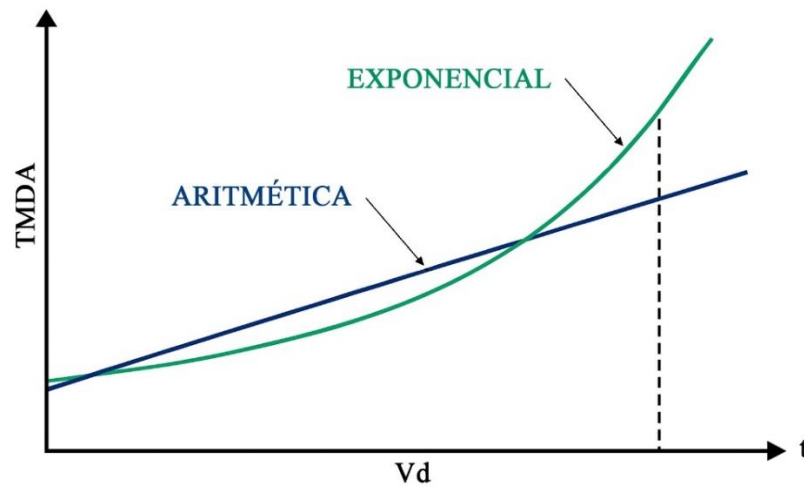
El tránsito puede proyectarse en el tiempo en forma aritmética con un crecimiento constante o exponencial mediante incrementos anuales.

2.16.10 Modelos de crecimiento

En el gráfico se observa que la proyección aritmética supone un crecimiento más rápido en el corto plazo y se subestima el tránsito en el largo plazo.

En base a las estadísticas es conveniente definir que curva se ajusta mejor al tránsito generado por una carretera.

Gráfico 2. Proyección aritmética del tránsito.



Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.11 Factor de crecimiento

Una forma sencilla de encontrar el factor de crecimiento es adoptar una tasa de crecimiento anual y utilizar el promedio del tráfico al principio y al final del periodo de diseño:

$$FC = 0,5 \cdot [1 + (1 + r)^P]$$

Donde:

r = tasa de crecimiento anual en decimales

P = periodo de diseño en años.

La Asociación del Cemento Portland utiliza el tráfico a la mitad del periodo de diseño:

$$FC = (1 + r)^{0,5 \cdot P}$$

La AASHTO recomienda calcular el factor de crecimiento para el tráfico de todo el periodo de diseño:

$$FC = \frac{(1 + r)^P - 1}{r}$$

Los valores del factor de crecimiento para diferentes tasas anuales y periodos de diseño se muestran en la tabla siguiente, de acuerdo al criterio de la AASHTO:

Tabla 8. Factores de crecimiento.

Período de diseño, años (n)	Tasa de crecimiento anual, g en porcentaje							
	Sin Crecimiento	2	4	5	6	7	8	10
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	2,0	2,02	2,04	2,05	2,06	2,07	2,08	2,10
3	3,0	3,06	3,12	3,15	3,18	3,21	3,25	3,31
4	4,0	4,12	4,25	4,31	4,37	4,44	4,51	4,64
5	5,0	5,20	5,42	5,53	5,64	5,75	5,87	6,11
6	6,0	6,31	6,63	6,80	6,98	7,15	7,34	7,72
7	7,0	7,43	7,90	8,14	8,39	8,65	8,92	9,49
8	8,0	8,58	9,21	9,55	9,90	10,26	10,64	11,44
9	9,0	9,75	10,58	11,03	11,49	11,98	12,49	13,58
10	10,0	10,95	12,01	12,58	13,18	13,82	14,49	15,94
11	11,0	12,17	13,49	14,21	14,97	15,78	16,65	18,53
12	12,0	13,41	15,03	15,92	16,87	17,89	18,98	21,38
13	13,0	14,68	16,63	17,71	18,88	20,14	21,50	24,52
14	14,0	15,97	18,29	19,18	21,01	22,55	24,21	27,97
15	15,0	17,29	20,02	21,58	23,28	25,13	27,15	31,77
16	16,0	18,64	21,82	23,66	25,67	27,89	30,32	35,95
17	17,0	20,01	23,70	25,84	28,21	30,84	33,75	40,55
18	18,0	21,41	25,65	28,13	30,91	34,00	37,45	45,60
19	19,0	22,84	27,67	30,54	33,76	37,38	41,45	51,16
20	20,0	24,30	29,78	33,06	36,79	41,00	45,76	57,28
25	25,0	32,03	41,65	47,73	54,86	63,25	73,11	98,35

30	30,0	40,57	56,08	66,44	79,06	94,46	113,28	164,49
35	35,0	49,99	73,65	90,32	111,43	138,24	172,32	271,02

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

A menos que existan consideraciones especiales, se considera una distribución del 50% del tránsito para cada dirección. En algunos casos puede variar de 0,3 a 0,7 dependiendo de la dirección que acumula mayor porcentaje de vehículos cargados.

2.16.12 Factor de distribución de carril

En una carretera de dos carriles, uno en cada dirección, el carril de diseño es uno de ellos, por lo tanto, el factor de distribución por carril es 100%. Para autopistas multicarriles el carril de diseño es el carril exterior y el factor de distribución depende del número de carriles en cada dirección que tenga la autopista. En la tabla siguiente se muestran los valores utilizados por la AASHTO:

Tabla 9. Factor de distribución por carril.

No. carriles en cada dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes de 18 kips en el carril de diseño (FC)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 ó más	50 – 75

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.13 Transito equivalente

Los resultados obtenidos por la AASHTO en sus tramos de prueba mostraron que el daño que producen distintas configuraciones de ejes y cargas, puede representarse por

un número equivalente de pasadas de un eje simple patrón de rueda doble de 18 kips (80 kN u 8,2 Ton.) que producirá un daño similar a toda la composición del tráfico.

La conversión del tráfico a un número de ESAL's de 18 kips (Equivalent Single Axis Loads) se realiza utilizando factores equivalentes de carga LEFs (Load Equivalent Factor). Estos factores fueron determinados por la AASHTO en sus tramos de prueba, donde pavimentos similares se sometieron a diferentes configuraciones de ejes y cargas, para analizar el daño producido y la relación existente entre estas configuraciones y cargas a través del daño que producen.

El factor equivalente de carga LEF es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad ocasionada por una determinada carga de un tipo de eje y la producida por el eje patrón de 18 kips.

$$LEF = \frac{\text{Nº de ESALs de 18 kips que producen una pérdida de serviciabilidad } \Delta PSI}{\text{Nº de ejes de X kips que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

2.16.14 Factor camión

Para expresar el daño que produce el tráfico, en términos del deterioro que produce un vehículo en particular, hay que considerar la suma de los daños producidos por cada eje de ese tipo de vehículo. De este criterio nace el concepto de Factor de Camión, que se define como el número de ESAL's por número de vehículo. Este factor puede ser calculado para cada tipo de camiones, o para todos los vehículos como un promedio de una determinada configuración de tráfico.

$$\text{Factor de Camión} = TF = \frac{\text{Nº ESALs}}{\text{Nº de camiones}}$$

Para el cálculo del tránsito, el método considera los ejes equivalentes simples de 18 kips (8,2 ton) acumulados durante el período de diseño, en el carril de diseño, utilizando la ecuación siguiente:

$$W_{18} = F_d \cdot F_C \cdot \overline{W}_{18}$$

Donde:

W_{18} = Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 18 Kips (8,2 ton), en el carril de diseño.

F_d = Factor de distribución direccional; (50% para la mayoría de las carreteras).

$\overline{W}_{18}$ = Ejes Equivalentes acumulados en ambas direcciones.

F_C = Factor de distribución por carril.

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año se deberá estimar, sobre la base de la tasa de crecimiento anual y del período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados, los cuales se multiplican por el factor de camión para obtener los ESAL's de diseño.

2.16.15 Número total de ejes simples equivalentes (ESAL'S)

$$ESALs' = \left(\sum_{i=1}^m p_i \cdot F_i \cdot P \right) \cdot (TPD) \cdot (FC) \cdot F_d \cdot F_c \cdot 365$$

Donde:

p_i = Porcentaje del total de repeticiones para el i-ésimo grupo de vehículos o cargas.

F_i = Factor de equivalencia de carga por eje, del i-ésimo grupo de eje de carga

P = Promedio de ejes por camión pesado.

TPD = Tránsito promedio diario.

FC = Factor de crecimiento para un período de diseño en años.

F_d = Factor direccional.

F_C = Factor de distribución por carril.

2.16.16 Nivel de confianza y desviación estándar

El nivel de confianza es uno de los parámetros importantes introducidos por la AASHTO al diseño de pavimentos, porque establece un criterio que está relacionado con el desempeño del pavimento frente a las solicitudes exteriores. La confiabilidad

se define como la probabilidad de que el pavimento diseñado se comporte de manera satisfactoria durante toda su vida de proyecto, bajo las solicitaciones de carga e intemperismo, o la probabilidad de que los problemas de deformación y fallas estén por debajo de los niveles permisibles.

Tabla 10. Nivel de confianza.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Carreteras de primer orden	80 – 99	75 – 95
Carreteras secundarias	80 – 95	75 – 95
Caminos vecinales	50 – 80	50 – 80

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

La esquematización del comportamiento real del pavimento y la curva de diseño propuesta por la AASHTO tienen la misma forma, pero no coinciden. La falta de coincidencia se debe a los errores asociados a la ecuación de comportamiento propuesta y a la dispersión de la información utilizada en el dimensionamiento del pavimento. Por esta razón la AASHTO adoptó un enfoque regresional para ajustar estas dos curvas. De esta forma los errores se representan mediante una desviación estándar S_o , para compatibilizar los dos comportamientos. El factor de ajuste entre las dos curvas se define como el producto de la desviación normal Z_R , por la desviación estándar S_o . Los factores de desviación normal Z_R se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Factores de desviación estándar.

Confiabilidad	Z _R	Confiabilidad	Z _R
50	0	92	-1,405
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327

Fuente: Guía para el Diseño y la Construcción de Pavimentos Rígidos Ing. Aurelio Salazar Rodríguez, 1998.

Si la construcción se va a realizar por etapas, la vida útil ha de ser menor al periodo de análisis (vida útil < periodo de análisis), en este caso se deben considerar las confiabilidades de todo el periodo de diseño, de donde resulta que:

$$R_{etapa} = (R_{total})^{1/n} \quad n = \text{número de etapas previstas}$$

Una vez elegido un nivel de confianza y obtenidos los resultados del diseño, éstos deberán ser corregidos por dos tipos de incertidumbre: la confiabilidad de los parámetros de entrada, y de las propias ecuaciones de diseño basadas en los tramos de prueba. Para este fin, se considera un factor de corrección que representa la desviación estándar, de manera reducida y simple, este factor evalúa los datos dispersos que configuran la curva real de comportamiento del pavimento.

El rango de desviación estándar sugerido por AASHTO se encuentra entre los siguientes valores:

$$0,40 \leq S_o \leq 0,50 \quad (S_o = \text{desviación estándar})$$

2.16.17 Coeficiente de drenaje C_d

El valor de este coeficiente depende de dos parámetros: la capacidad del drenaje, que se determina de acuerdo con el tiempo que tarda el agua en ser evacuada del pavimento, y el porcentaje de tiempo durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación, en el transcurso del año. Dicho porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje, la AASHTO define cinco capacidades de drenaje, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Capacidad del drenaje.

Calidad del Drenaje	Tiempo que tarda el agua en ser Evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	Agua no drena

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

De acuerdo con las capacidades de drenaje la AASHTO establece los factores de corrección m_2 (bases) y m_3 (sub-bases granulares sin estabilizar), los cuales están dados en la Tabla IV.7, en función del porcentaje de tiempo a lo largo de un año, en el cual la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

Tabla 13. Valores m_i para modificar los Coeficientes Estructurales.

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1 %	1 a 5 %	5 a 25 %	Más del 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
Malo	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy malo	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.18 Determinación del número estructural (SN)

El método está basado en el cálculo del Número Estructural “SN” sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplén. Para esto se dispone de la Figura IV.2 y de la ecuación siguiente:

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \frac{(\Delta PSI)}{4.2-1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log M_R - 8.07$$

Donde:

W_{18} = Tráfico equivalente o ESAL's.

Z_R = Factor de desviación normal para un nivel de confiabilidad R

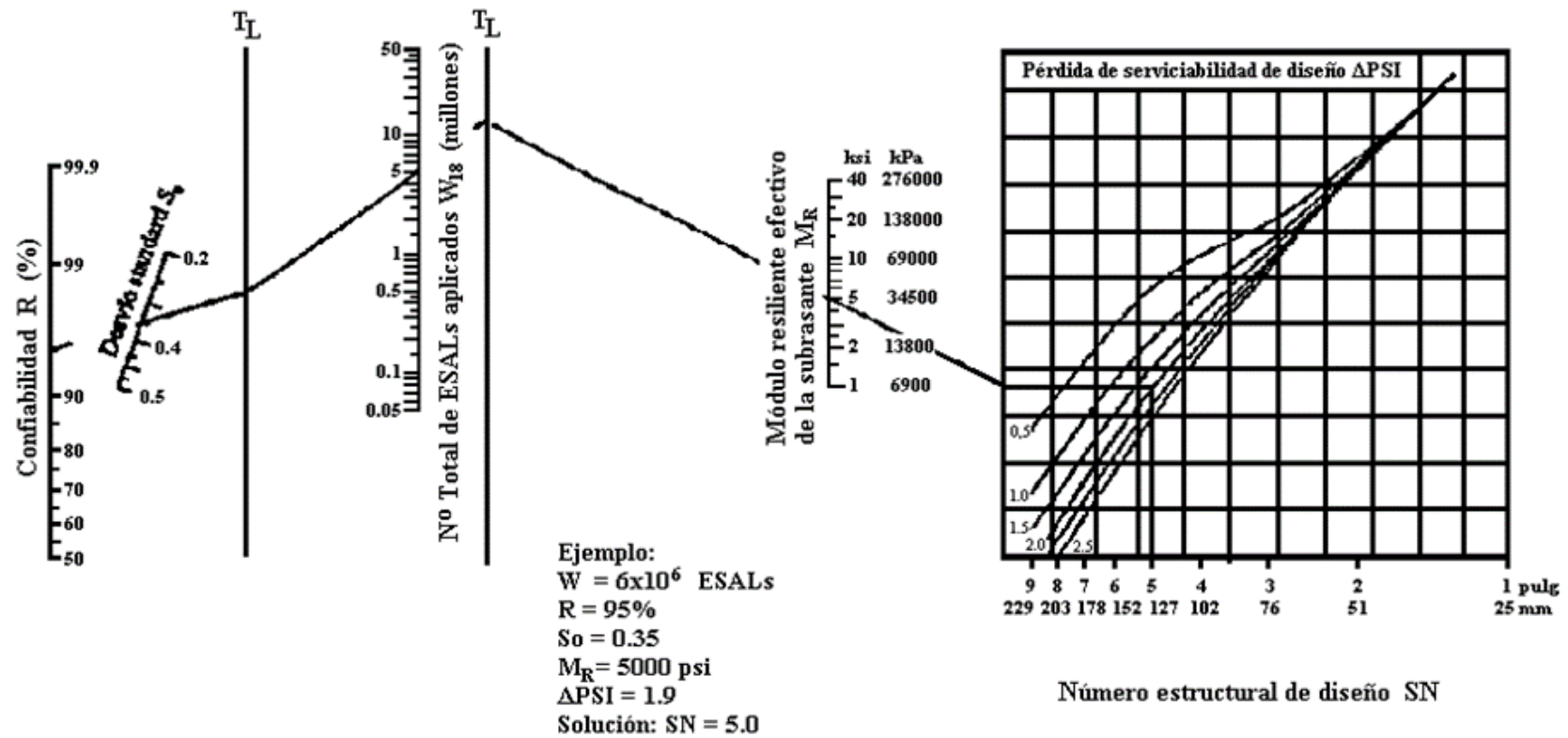
S_o = Desviación estándar

ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado

M_R = Módulo de resiliencia efectivo de la subrasante

SN = Número estructural

Gráfico 3. Numero estructural



Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.19 Determinación de espesores por capas

La estructura del pavimento flexible está formada por un sistema de varias capas, por lo cual debe dimensionarse cada una de ellas considerando sus características propias.

Una vez que el diseñador ha obtenido el Número Estructural SN para la sección estructural del pavimento, se requiere determinar una sección multicapa, que en conjunto provea una suficiente capacidad de soporte, equivalente al número estructural de diseño. Para este fin se utiliza la siguiente ecuación que permite obtener los espesores de la capa de rodamiento o carpeta, de la capa base y de la sub-base:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

Donde:

a_1 , a_2 y a_3 = Coeficientes estructurales de capa de carpeta, base y sub-base respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 = Espesor de la carpeta, base y sub-base respectivamente, en pulgadas.

m_2 y m_3 = Coeficientes de drenaje para base y sub-base, respectivamente.

De la misma manera se deberá obtener los coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica (a_1), de la capa base (a_2) y de la sub-base (a_3), utilizando los valores del módulo de resiliencia correspondientes a cada una de ellas.

Los coeficientes de capa a_1 , a_2 y a_3 se obtienen utilizando las correlaciones de valores de diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Resiliente, Texas Triaxial, Valor R y CBR, tal como se muestra en las siguientes figuras:

- Para carpeta asfáltica. (a₁) Gráfico 5.
- Para bases granulares. (a₂) Gráfico 6.
- Para subbases granulares. (a₃) Gráfico 7.
- Para bases estabilizadas con cemento Gráfico 8.
- Para bases estabilizadas con asfalto. Gráfico 9.

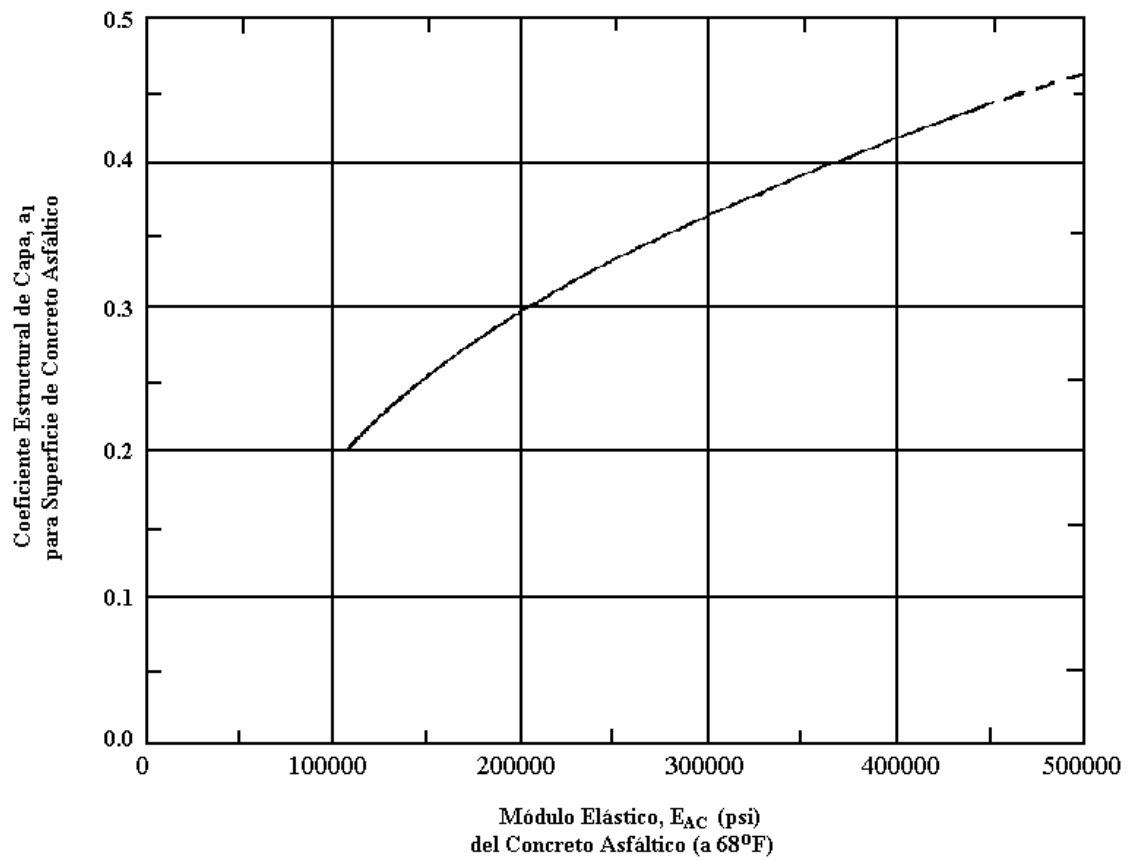
Para capas estabilizadas con cemento o asfalto y para la superficie de rodadura de concreto asfáltico, el método no considera una posible influencia de la calidad del drenaje, por lo que en la ecuación de diseño solo intervienen los valores de m_2 y m_3 .

Espesores Mínimos, en pulgadas, en Función de los Ejes Equivalentes

Tabla 14. Espesores mínimos.

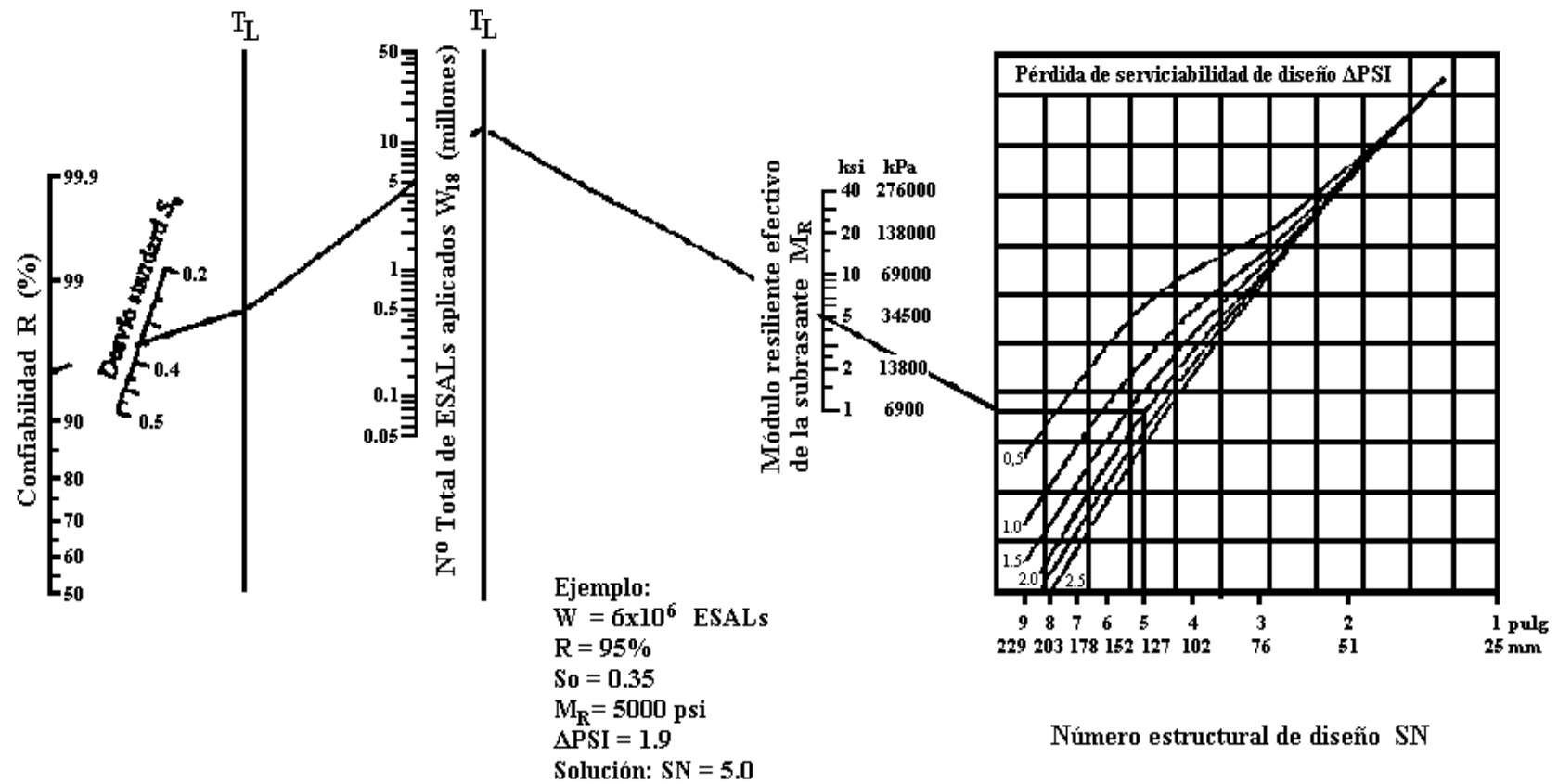
Tránsito (ESAL's) En Ejes Equivalentes	Carpetas De Concreto Asfáltico	Bases Granulares
Menos de 50,000	1,0 ó T.S.	4,0
50,001 – 150,000	2,0	4,0
150,001 – 500,000	2,5	4,0
500,001 – 2'000,000	3,0	6,0
2'000,001 – 7'000,000	3,5	6,0
Mayor de 7'000,000	4,0	6,0

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Gráfico 4. Abaco de diseño AASHTO para pavimentos

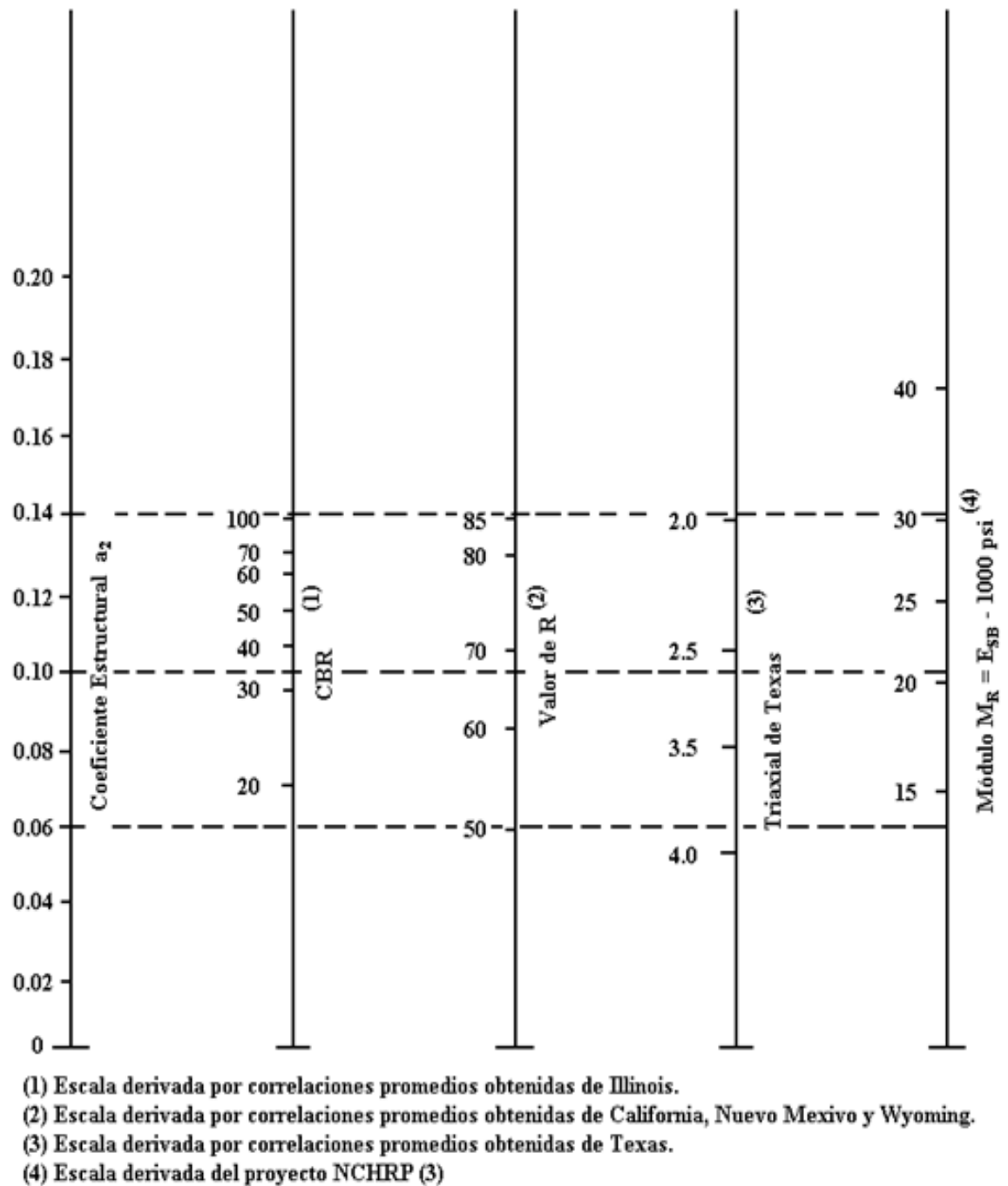
Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Gráfico 5. Abaco para estimar el numero estructural a_1 .



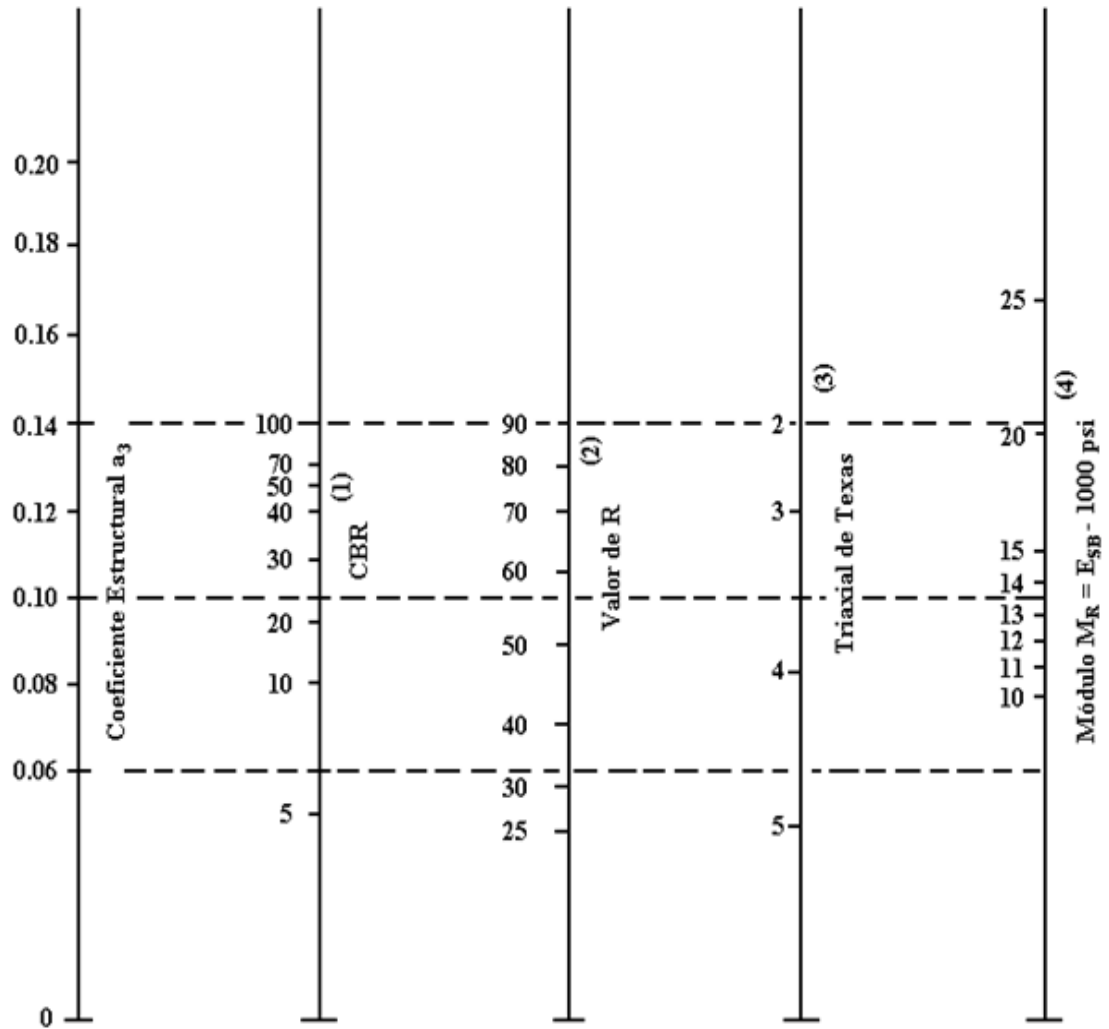
Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Gráfico 6. Abaco para estimar el numero estructural a_2 .



Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

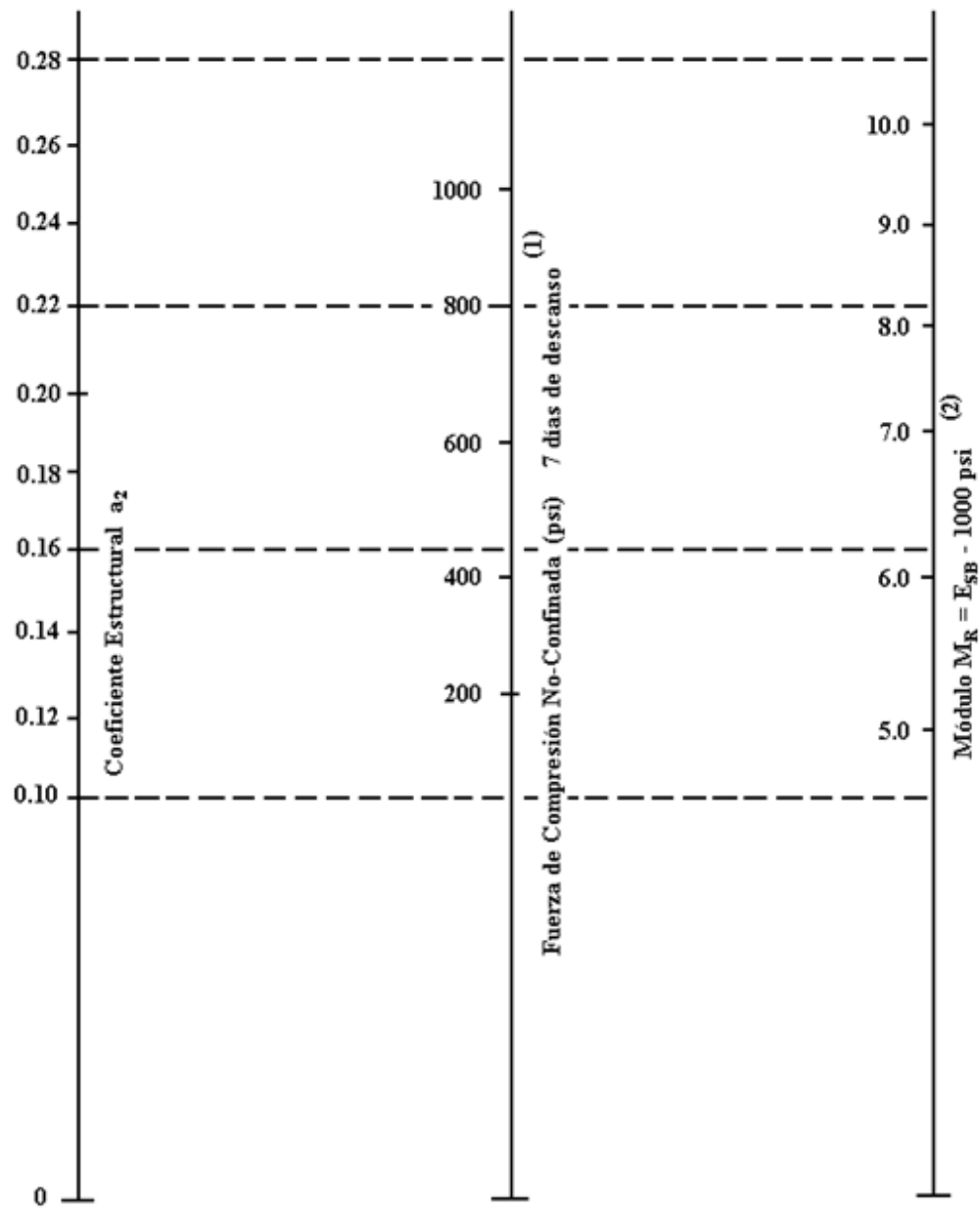
Gráfico 7. Abaco para estimar el numero



- (1) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Illinois.
 (2) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de California, Nuevo Mexico y Wyoming.
 (3) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Texas.
 (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Gráfico 8. Abaco para estimar el SN de la capa base con

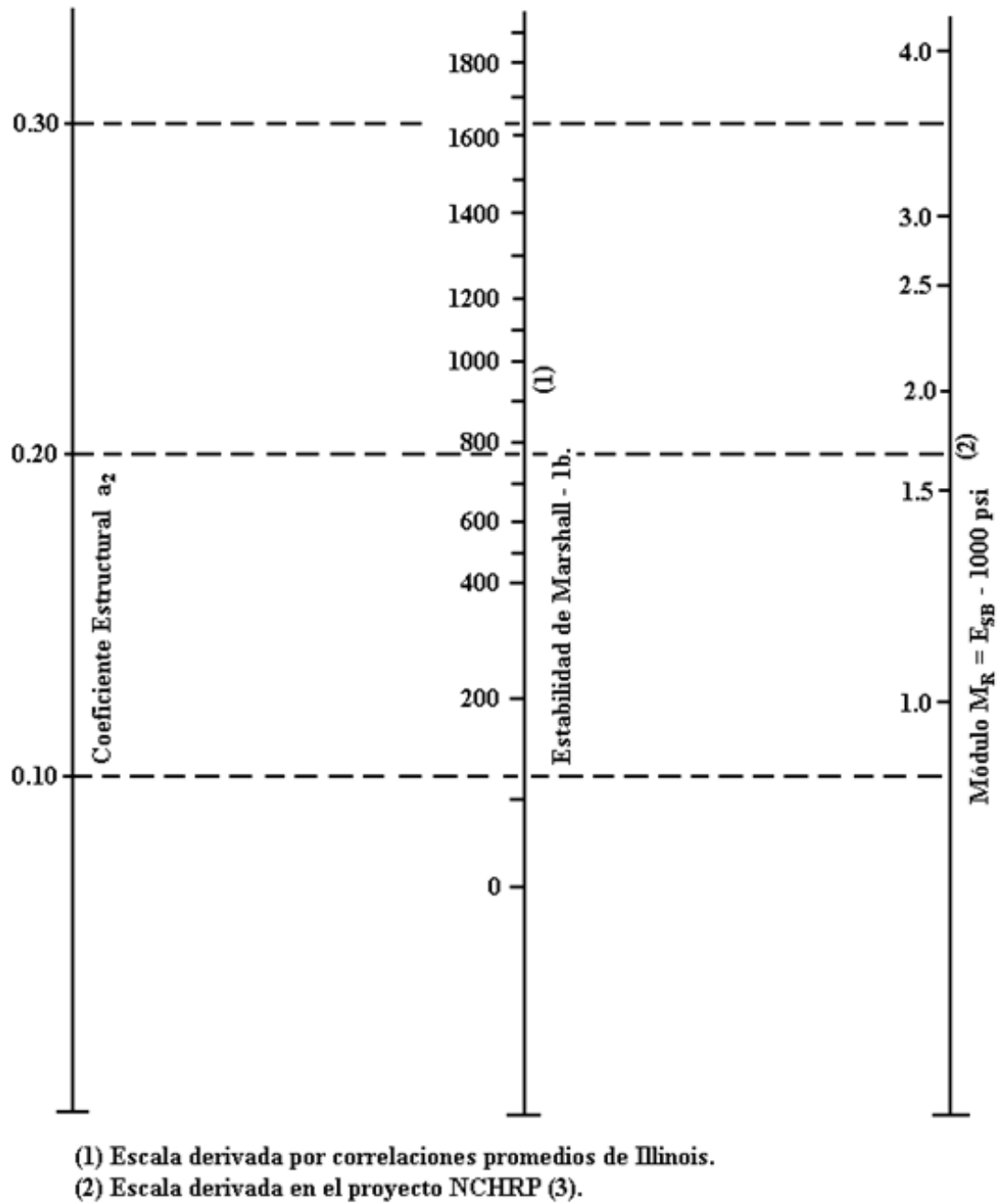


(1) Escala derivada por correlaciones promedios de Illinois, Louisiana y Texas.

(2) Escala derivada en el proyecto NCHRP (3).

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Gráfico 9. Abaco para estimar el SN de la capa base con



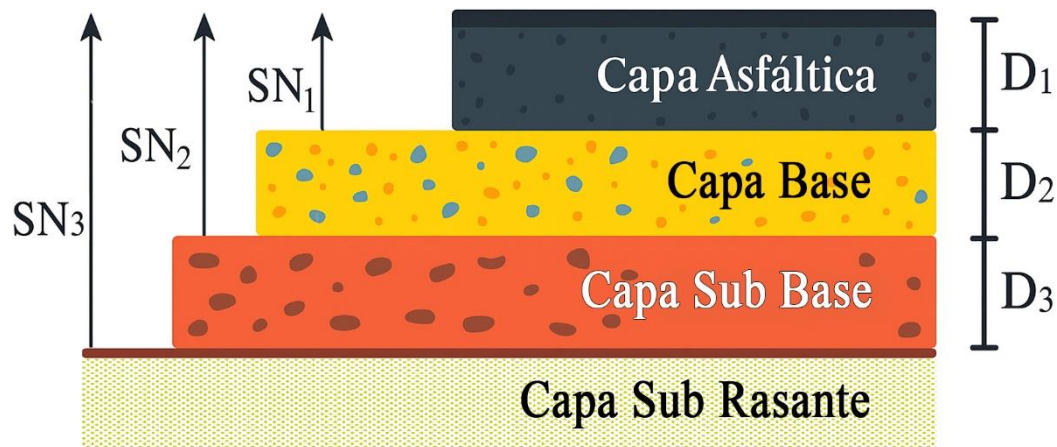
Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

2.16.20 Espesores mínimos en función del SN

En el control de los espesores D_1 , D_2 y D_3 , a través del SN, se busca dar protección a las capas granulares no tratadas, de las tensiones verticales excesivas que producirían deformaciones permanentes, como se muestra en el gráfico siguiente.

Los materiales son seleccionados para cada capa, de acuerdo con las recomendaciones del método, por tanto, se conocen los módulos resilientes de cada capa. Usando el ábaco del gráfico 4, se determinan los números estructurales requeridos para proteger cada capa no tratada, utilizando el módulo resiliente de la capa que se encuentra inmediatamente por debajo, por ejemplo, para sacar el espesor D_1 de la carpeta se considera el MR de la capa base y así se obtiene el SN_1 que debe ser soportado por la carpeta asfáltica, de donde:

Figura 1. Capas de pavimento flexible.



Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

Se adopta un espesor D_1 ligeramente mayor y el número estructural absorbido por esta capa será:

$$SN_1 = a_1 \cdot D_1$$

Para determinar el espesor mínimo de la capa base, se entra al ábaco con el MR de la sub-base, para obtener el número estructural SN2 que será absorbido por la carpeta y la capa base, de donde:

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \cdot m_2} \geq \frac{SN_b}{a_2 \cdot m_2}$$

Se adopta un espesor D2 ligeramente mayor y el número estructural absorbido será:

$$SN_b = a_2 \cdot m_2 \cdot D_2 \quad \quad SN_b = \text{Número estructural de la base}$$

Finalmente, para la sub-base se ingresa con el MR que corresponde a la subrasante y se obtiene SN3 = SN para todo el paquete estructural, por tanto el espesor será:

$$D_3 \geq \frac{SN - (SN_1 - SN_2)}{a_3 \cdot m_3} \geq \frac{SN_{sb}}{a_3 \cdot m_3}$$

Se adopta un espesor D3 ligeramente mayor y el número estructural absorbido por la sub-base será:

$$SN_3 = a_3 \cdot m_3 \cdot D_3 \quad \quad SN_{sb} = \text{Número estructural de la sub-base}$$

La suma de los números estructurales de las capas que constituyen el pavimento debe ser mayor o igual a:

$$SN_1 + SN_2 + SN_3 \geq SN$$

Este procedimiento no es aplicable para determinar espesores sobre capas que tengan un módulo resiliente mayor a 40.000 psi (280 MPa). En este caso los espesores se determinarán mediante criterios constructivos o de acuerdo a la relación costo-eficiencia.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Ubicación de la zona de aplicación

3.2 Ubicación de toma de muestras de subrasante

Se obtendrán muestras de la subrasante en la ciudad de Tarija, en el barrio San Blas en la entrada al velódromo y piscina olímpica, con las coordenadas siguiente:

Tabla 15. Coordenadas de extracción de subrasante.

Coordenadas de extracción de subrasante	
Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
322033.20 E	Latitud: 21°33'38.52"S
7614815.00 S	Longitud: 64°43'7.33"W

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 2. Ubicación de extracción de muestras de subrasante.



Fuente: Google Earth.

3.2.1 Ubicación de toma de muestras de base y subbase

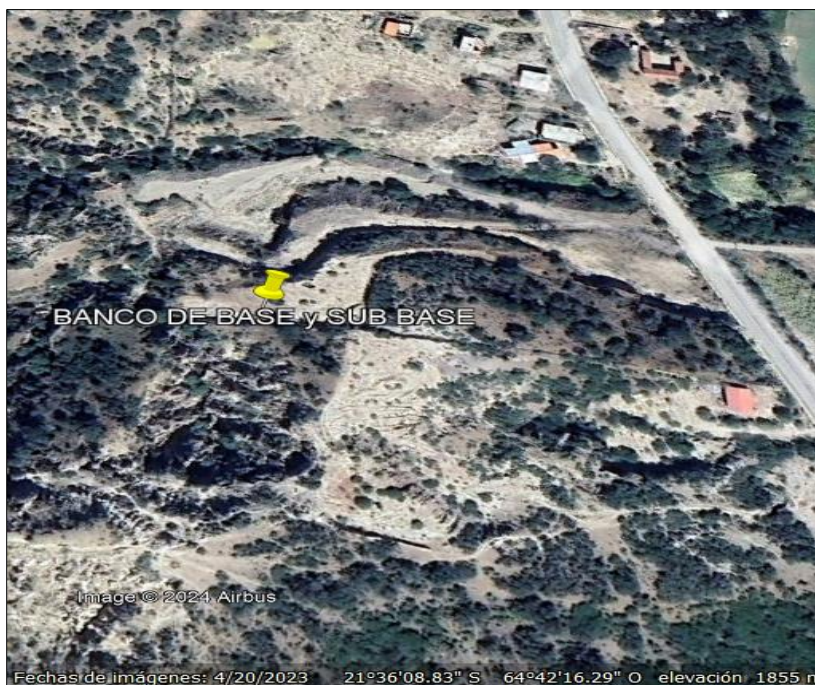
Para las muestras para la subbase y base también se obtendrán en la ciudad de Tarija, de la avenida San Jacinto Norte con las coordenadas siguientes:

Tabla 16. Coordenadas de extracción de subbase y base.

Coordenadas de extracción de subbase y base	
Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
323704,50 E	Latitud: 21°36'10,13"S
7610170,10 S	Longitud: 64°42'11,01"W

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3. Ubicación del banco de base y subbase.



Fuente: Google Earth.

3.2.2 Descripción de las características físicas y naturales de la zona

El municipio de Cercado se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, limita al norte con el municipio de San Lorenzo, al sur con el Municipio de Padcaya del Departamento de Tarija y la República Argentina, al este con el Municipio de O'Connor, y al oeste con el municipio de El Puente.

Su extensión territorial es 2.20 km², es un barrio de la ciudad de Tarija que se encuentra en crecimiento poblacional, los servicios básicos son de existencia intermedia, y es notable la erosión que se tiene en el lugar y en barrios aledaños como San Blas.

3.3 Caracterización de la capa subrasante

3.3.1 Ensayo de granulometría

Se realizó el ensayo de granulometría en la subrasante por el método del lavado ya que nuestro suelo es fino, entonces según ASTM D422 AASHTO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

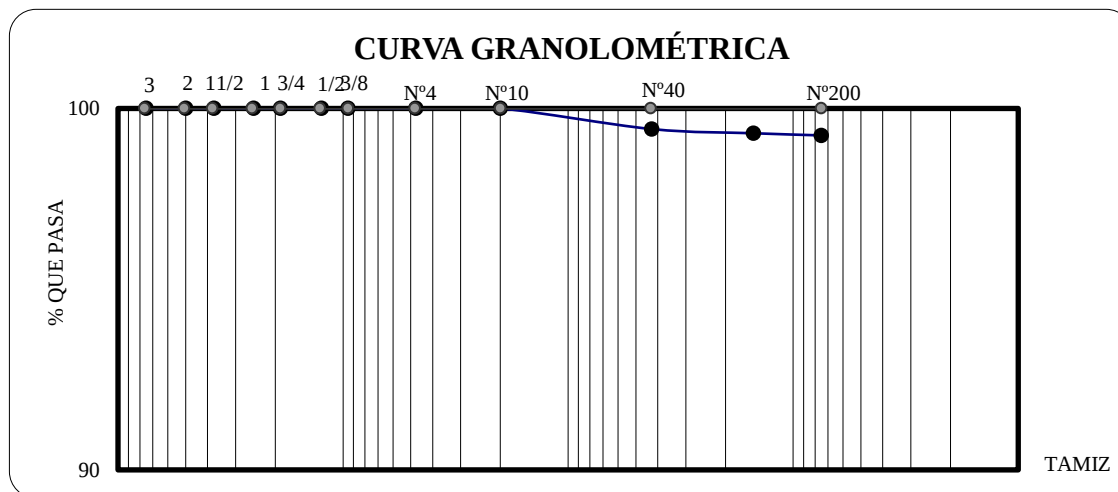
Tabla 17. Ensayo de granulometría subrasante.

Peso Total (gr.)			1000	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Nº40	0,425	5,70	5,70	0,57	99,43
Nº100	0,15	1,16	6,86	0,69	99,31
Nº200	0,075	0,60	7,46	0,75	99,25

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10. Curva granulométrica subrasante.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Ensayo de hidrómetro

Se realizó el ensayo de granulometría por el método del hidrómetro para suelos finos, entonces según el “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

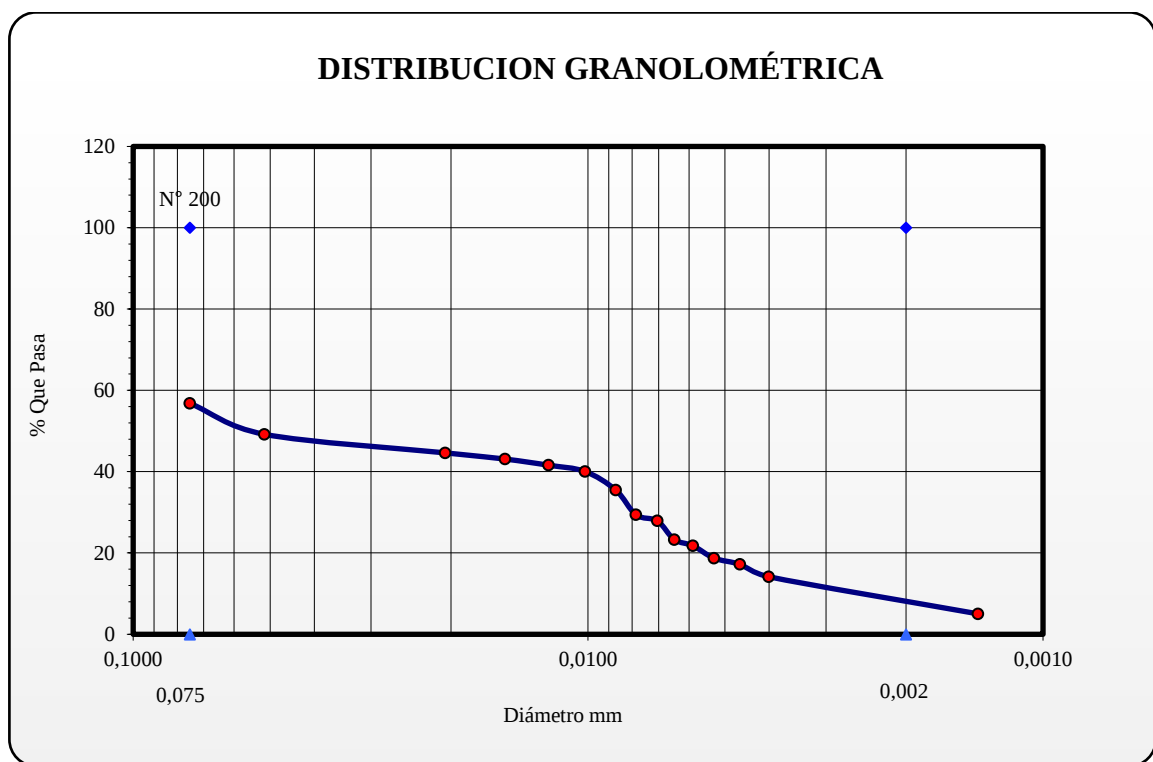
Tabla 18. Ensayo de hidrómetro.

Hora de Lectura	Tiempo min.	Temp. °c.	Lectura	Lectura	Prof.	Constante	L/t	Ct	Lectura	Diam.	%
			Real	Correg	Efec.	K			Correg	Partícula	Mas
			R'.	R.	L	Tabla			Rc.	mm	Fino
10:20	0	19	37	38	13,5	0,0140	0	-0,70	37,30	0,075	56,81
10:21	1	19	32	33	13,5	0,0140	13,500	-0,70	32,30	0,0514	49,20
17:22	3	19	29	30	6,5	0,0140	2,167	-0,70	29,30	0,0206	44,63
10:23	6	19	28	29	7,1	0,0140	1,183	-0,70	28,30	0,0152	43,10
10:24	10	19	27	28	7,6	0,0140	0,760	-0,70	27,30	0,0122	41,58

10:25	15	19	26	27	7,9	0,0140	0,527	-0,70	26,30	0,0102	40,06
10:26	21	19	23	24	8,1	0,0140	0,386	-0,70	23,30	0,0087	35,49
10:27	28	19	19	20	8,8	0,0140	0,314	-0,70	19,30	0,0078	29,40
10:28	36	19	18	19	9,1	0,0140	0,253	-0,70	18,30	0,0070	27,87
10:29	45	19	15	16	9,6	0,0140	0,213	-0,70	15,30	0,0065	23,30
10:30	55	19	14	15	9,7	0,0140	0,176	-0,70	14,30	0,0059	21,78
10:40	75	19	12	13	10,7	0,0140	0,143	-0,70	12,30	0,0053	18,73
10:50	105	19	11	12	11,5	0,0140	0,110	-0,70	11,30	0,0046	17,21
18:00	145	19	9	10	11,9	0,0140	0,082	-0,70	9,30	0,0040	14,16
17:20	1585	19	3	4	15,6	0,0140	0,010	-0,70	3,30	0,0014	5,03

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11. Distribución granulométrica por hidrómetro.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Ensayo de humedad natural y clasificación

Tabla 19. Tabla de humedad natural

Humedad natural			
Cápsula=	1C	2C	3C
Peso de suelo húmedo + Cápsula=	46,86	70,03	59,36
Peso de suelo seco + Cápsula=	45,76	66,10	54,66
Peso de cápsula=	12,61	12,93	13,07
Peso de suelo seco=	33,15	53,17	41,59
Peso del agua=	1,1	3,93	4,70
Contenido de humedad=	3,32	7,39	11,30
Promedio=	7,34 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Clasificación de suelo de subrasante.

Clasificación del suelo		Descripción
AASHTO:	A-4(8)	Suelo limoso

Fuente: Elaboración propia.

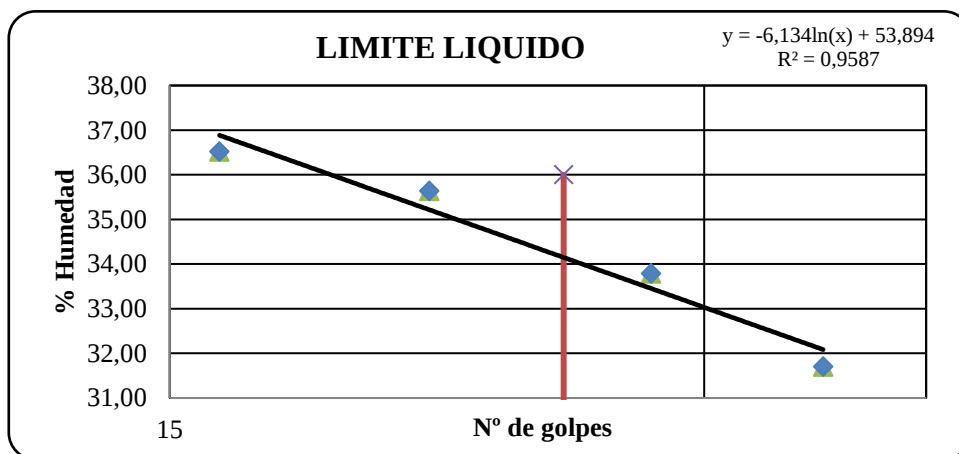
3.3.4 Límites líquido de la subrasante

Se realizó el ensayo de límite líquido según ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 21. Limite liquido de la subrasante.

Capsula N°=	1LL	2LL	3LL	4LL
N° de golpes=	16	21	28	35
Suelo Húmedo + Cápsula=	24,67	30,59	33,08	32,97
Suelo Seco + Cápsula=	21,46	25,74	27,84	28,5
Peso del agua=	3,21	4,85	5,24	4,47
Peso de la Cápsula=	12,67	12,13	12,33	14,4
Peso Suelo seco=	8,79	13,61	15,51	14,1
Porcentaje de Humedad=	36,52	35,64	33,78	31,70

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12. Limite líquido.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5 Límite plástico de la subrasante

El ensayo de limite plástico se realizó de acuerdo con la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 22. Limite plástico de la subrasante.

Cápsula=	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula=	18,65	19,85	16,92
Peso de suelo seco + Cápsula=	17,66	18,47	16,12
Peso de cápsula=	13,62	12,81	12,66
Peso de suelo seco=	4,04	5,66	3,46
Peso del agua=	0,99	1,38	0,80
Contenido de humedad=	24,50	24,38	23,12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Resumen de resultados.

Límite Líquido (LL) = 34
Límite Plástico (LP) = 24
Índice de plasticidad (IP) = 10
Índice de Grupo (IG) = 8

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6 Ensayo de compactación de la subrasante

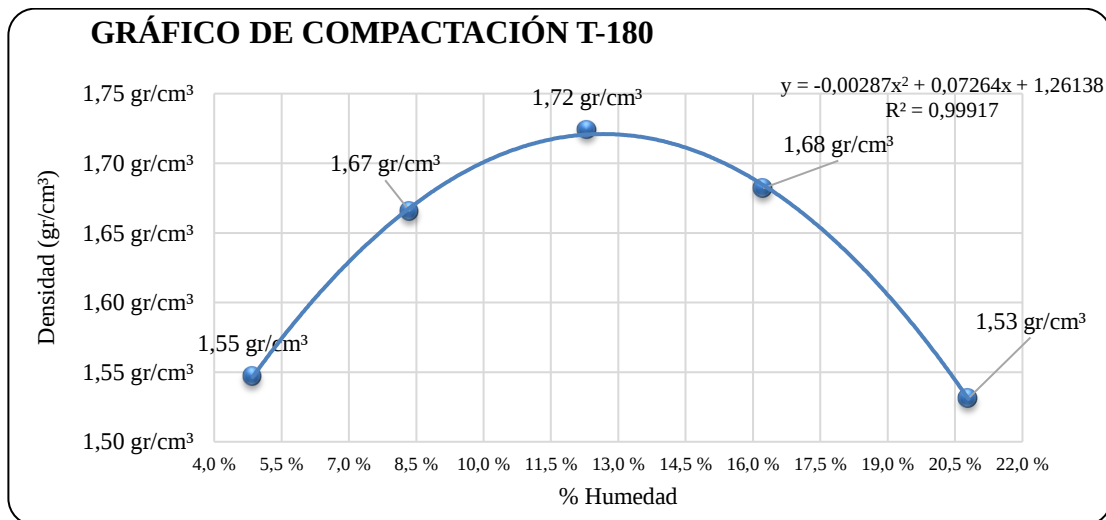
Tabla 24. Ensayo de compactación T-180.

Muestra: Única		Volumen=	2078,16 cm ³		
Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	9829,8	10209,2	10482,7	10521,6	10302,7
Peso del molde	6458,7	6458,7	6458,7	6458,7	6458,7
Peso suelo húmedo	3371,1	3750,5	4024	4062,9	3844

Volumen de la muestra	2078,2	2078,2	2078,2	2078,2	2078,2
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1,62	1,80	1,94	1,96	1,85
Cápsula N°	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula	89,03	95,85	125,45	110,16	131,16
Peso suelo seco + cápsula	85,49	89,45	113,14	96,56	110,77
Peso del agua	3,54	6,4	12,31	13,60	20,390
Peso de la cápsula	12,58	12,86	13,09	12,74	12,73
Peso suelo seco	72,91	76,59	100,05	83,82	98,04
Contenido de humedad (%)	4,8 6%	8,3 6%	12,3 %	16,2 3%	20,8 %
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1,55 gr/cm ³	1,67 gr/cm ³	1,72 gr/cm ³	1,68 gr/cm ³	1,53 gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 13. Curva de compactación.



Densidad máxima	1,72	gr/cm ³
Humedad optima	12,66	%

Fuente: Elaboración propia.

3.3.7 Ensayo de California Bearing Ratio de la sub rasante

Se realizo el ensayo de CBR para nuestro suelo de acuerdo a nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (305.59 * x) + 0.9293$$

Donde:

Y = Carga (kg)

x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga = 19,3548 cm²

3.3.8 Resultados de CBR en subrasante

3.3.8.1 Resultados CBR patrón a una humedad optima

Tabla 25. Resultados de CBR_{CHO} patrón.

CBR 100 % D. Max.
6,83 %
CBR 95 % D. Max.
6,39 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resultados de expansión patrón.

EXP. 100 % D. Max.
3,67 %
EXP. 95 % D. Max.
4,05 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.2 Resultados CBR 5,00 % de humedad

Tabla 27. Resultados CBR 5,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
4,25 %
CBR 95 % D. Max.
3,91 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultados expansión 5,00 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
3,89 %
EXP. 95 % D. Max.
6,01 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.3 Resultados CBR 7,50 % de humedad

Tabla 29. Resultados CBR 7,50 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
4,84 %
CBR 95 % D. Max.
3,32 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Resultados expansión 7,50 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
3,84 %
EXP. 95 % D. Max.
4,58 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.4 Resultados CBR 10,00 % de humedad

Tabla 31. Resultados CBR 10,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
5,50 %
CBR 95 % D. Max.
5,13 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Resultados expansión 10% de humedad.

EXP. 100 % D. Max
3,69 %
EXP. 95 % D. Max.
4,65 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.5 Resultados CBR 15,00 % de humedad

Tabla 33. Resultados CBR 15,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max
5,35 %
CBR 95 % D. Max.
4,44 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Resultados expansión 15,00 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max
2,30 %
EXP. 95% D. Max.
3,13 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.6 Resultados CBR 17.50 % de humedad

Tabla 35. Resultados CBR 17.50% de humedad.

CBR 100 % D. Max
4,36 %
CBR 95 % D. Max.
3,70 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Resultados expansión 17,50% de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
1,12 %
EXP. 95 % D. Max.
1,62 %

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.7 Resultados CBR 20,00 % de humedad

Tabla 37. Resultados CBR 20,00% de humedad.

CBR 100 % D. Max.
3,39 %
CBR 95 % D. Max.
2,84 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Resultados expansión 20,00 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
1,07 %
EXP. 95 % D. Max.
1,47 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Caracterización de la capa subbase

3.4.1 Ensayo de granulometría AASHTO T-11 y 27

Tabla 39. Humedad higroscópica de la muestra sub base.

HUMEDAD HIGROSCÓPICA		
Suelo Húmedo + Capsula = P1=	329,49	gr.
Suelo Seco + Capsula = P2 =	322,5	gr.
Peso del Agua = Pa = (P1-P2) =	6,99	gr.
Peso de la Capsula=Pc=	59,87	gr.
Peso del Suelo Seco= Ps =(P2-Pc) =	262,63	gr.
Porcentaje de Humedad = % Hu=	2,66	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Contenido de humedad de sub base.

MUESTRA TOTAL SECA		
Muestra Total Húmeda = Pht=	10881,00	gr.
Agregado Grueso (Ret N°4) =A.G.=	6251,00	gr.
Pasa N°4 Húmedo = Mh =	4630,00	gr.
PasaN°10 Seco = Ms =	4509,97	gr.
Masa del agua =	4630,00	gr.
Muestra Total Seca = Pst=	10760,97	gr.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Planilla de granulometría de la sub base.

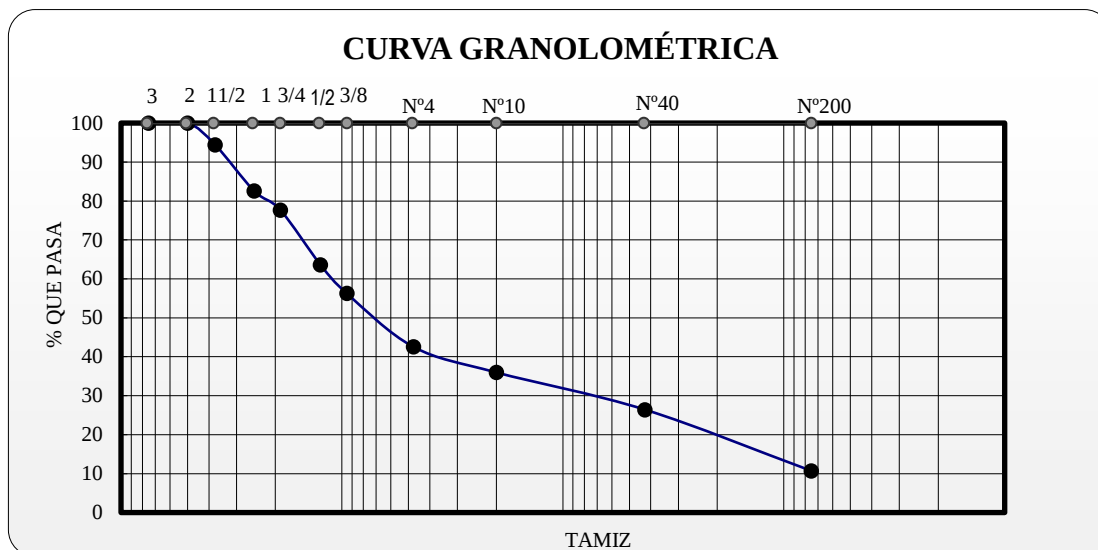
ANÁLISIS DE TAMICES DEL AGREGADO GRUESO					
Tamices	Tamaño	Peso Retenido	Retenido Acumulado		% que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	
2"	50,80	0	0	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	606	606	5,57	94,43
1"	25,40	1288	1894	17,41	82,59
3/4"	19,05	534	2428	22,31	77,69
1/2"	12,50	1533	3961	36,40	63,60
3/8"	9,50	797	4758	43,73	56,27
Nº4	4,80	1493	6251	57,45	42,55

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 42.** Granulometría del mortero subbase.

GRANULOMETRÍA DEL MORTERO DE SUELO					
Pasa Nº4 húmedo= S_h =	800,00	gr.	Pasa Nº4 seco= S_s =	779,26	gr.

ANÁLISIS DE TAMICES DEL AGREGADO FINO						
Tamices	Tamaño	Peso Retenido	Retenido Acumulado		% que pasa	% que pasa
	(mm)	gr	gr	%	de mortero	del total
Nº10	2	120,51	120,51	15,46	84,54	35,97
Nº40	0,43	174,87	295,38	37,91	62,09	26,42
Nº200	0,075	287,71	583,09	74,83	25,17	10,71

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 14. Curva granulométrica de la subbase.

Fuente: Elaboración propia.

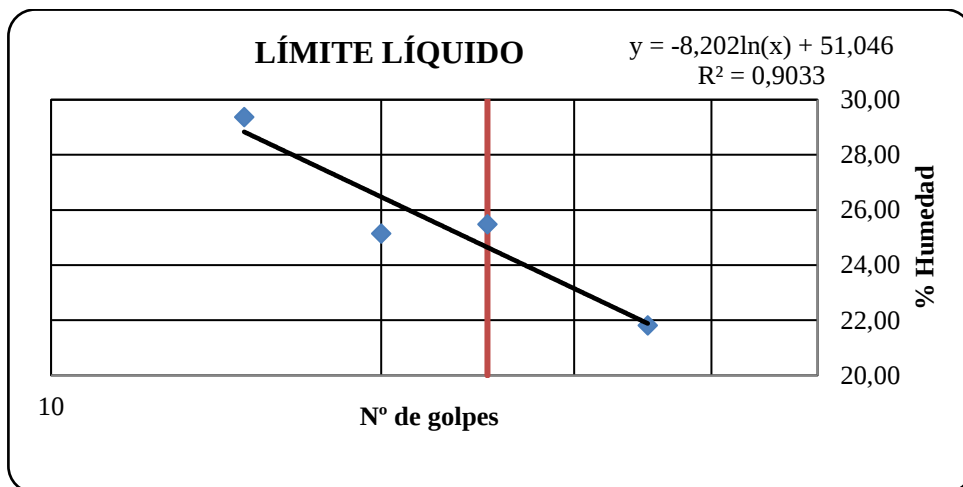
3.4.2 Límites líquido (LL) de la subbase

Se realizó el ensayo de límite líquido según ASTM D431 AASHTO T89 del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 43. Límite líquido de la subbase.

Capsula N°	1LL	2LL	3LL	4LL
N° de golpes	15	21	25	35
Suelo Húmedo + Cápsula	32,00	25,23	26,38	31,50
Suelo Seco + Cápsula	27,6	22,7	23,66	28,22
Peso del agua	4,4	2,53	2,72	3,28
Peso de la Cápsula	12,62	12,64	12,99	13,19
Peso Suelo seco	14,98	10,06	10,67	15,03
Porcentaje de humedad	29,37	25,15	25,49	21,82

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15. Limite liquido de la subbase.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Límite plástico (LP) de la subbase

El ensayo de limite plástico se realizó de acuerdo con la norma ASTM D4318 AASHTO T90, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 44. Limite plástico de la subbase.

Cápsula N°=	1LP	2LP	3LP
Peso de suelo húmedo + Cápsula	18,64	18,35	18,37
Peso de suelo seco + Cápsula	18,25	18,01	18,03
Peso de cápsula	16,05	16,06	16,12
Peso de suelo seco	2,20	1,95	1,91
Peso del agua	0,39	0,34	0,34
Contenido de humedad	17,73	17,44	17,80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Resumen resultados de límites.

Límite Líquido (LL)
20
Límite Plástico (LP)
18
Índice de plasticidad (IP)
2
Índice de Grupo (IG)
0

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Clasificación del suelo de la capa sub base

Tabla 46. Humedad natural de la subbase.

Humedad natural			
Cápsula N°=	1N	2N	3N
Peso de suelo húmedo + Cápsula	209,38	209,24	206,38
Peso de suelo seco + Cápsula	200,96	199,77	185,18
Peso de cápsula	12,67	12,61	12,77
Peso de suelo seco	188,29	187,16	172,41
Peso del agua	8,42	9,47	21,2
Contenido de humedad	4,47	5,06	12,30
Promedio =	7,28 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47. Clasificación del suelo de la capa base.

Clasificación de suelo		Descripción
AASTHO:	A-2-4(0)	Gravas y arenas arcillosas

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Ensayo de desgaste de los ángeles de la subbase

Tabla 48. Ensayo de desgaste de los ángeles.

%			Tipo de gradación (B)
Pasa	Retenido		Peso retenido
Pulgadas	Pulgadas	Milímetros	Gramos
1 1/2"	1"	25	1251,90
1"	3/4"	19	1254,20
3/4"	1/2"	12,5	1250,600
1/2"	3/8"	9,5	1250,50
Total			5007,25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49. Resumen resultados desgaste de los ángeles.

Peso original (P) =	5007,25	gr
Peso final (Pf) =	3449,2	gr
Porcentaje de desgaste	31,03	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 Ensayo de compactación Proctor T-180 de la subbase

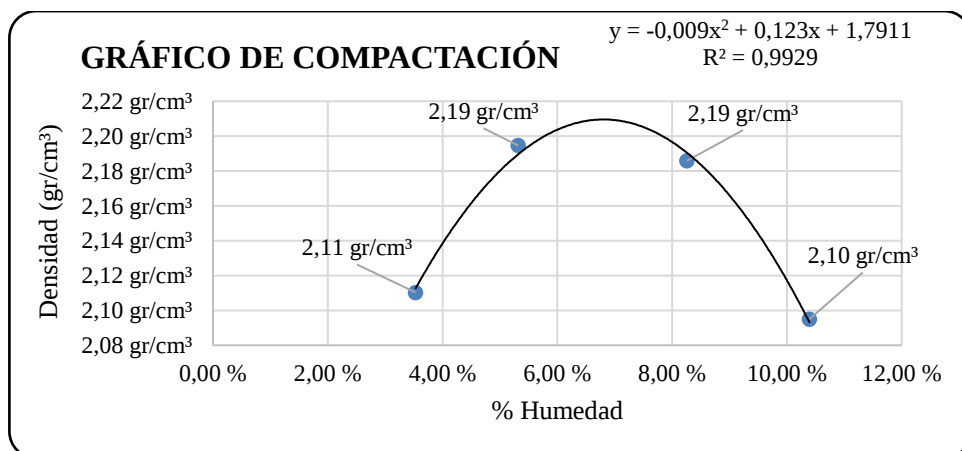
Tabla 50. Ensayo de compactación T-180.

Muestra: Única		Volumen:	2032,2	cm ³
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	11040,00	11297,00	11409,00	11200,00
Peso del molde	6600,00	6600,00	6600,00	6500,00
Peso suelo húmedo	4440,00	4697,00	4809,00	4700,00
Volumen de la muestra	2032,2	2032,2	2032,2	2032,2

Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	2,18	2,31	2,37	2,31
Cápsula N°	1sb	2sb	3sb	4sb
Peso suelo húmedo + capsula	94,65	71,72	75,23	80,42
Peso del suelo seco + capsula	91,85	68,74	70,60	74,08
Peso del agua	2,8	2,98	4,63	6,34
Peso de la cápsula	12,54	12,69	14,54	13,08
Peso suelo seco	79,31	56,05	56,06	61,00
Contenido de humedad (%)	3,53 %	5,32 %	8,26 %	10,39 %
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	2,11 gr/cm ³	2,19 gr/cm ³	2,19 gr/cm ³	2,10 gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 16. Ensayo de compactación de la subbase.



Densidad Máxima	2,21	gr/cm ³
Humedad Óptima	6,83	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7 Ensayo de CBR de la subbase

Se realizó el ensayo de CBR para nuestro suelo de acuerdo con nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (13.569 * x) + 0,9293$$

Donde:

Y = Carga (kg)

x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga = 19,3548 cm²

3.4.7.1 Resultados CBR 6,83 % humedad óptima en sub base

Tabla 51. Resultados CBR patrón subbase.

CBR 100 % D. Max.
52,44 %
CBR 95 % D. Max.
47,23 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 52. Resultados expansión CBR patrón subbase.

EXP. 100 % D. Max
0,00 %
EXP. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.2 Resultados CBR 4,00 % humedad en subbase

Tabla 53. Resultados CBR 4,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
43,37 %
CBR 95% D. Max.
39,38 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54. Resultados expansión 4,00 % humedad.

EXP. 100 % D. Max.
0,00 %
EXP. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.3 Resultados CBR 5,00 % humedad en subbase

Tabla 55. Resultados CBR 5,00 % de humedad subbase.

CBR 100 % D. Max.
48,24 %
CBR 95 % D. Max.
43,94 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Resultados expansión 5,00 % de humedad subbase.

EXP 100 % D. Max.
0,00 %
EXP 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.4 Resultados CBR 6,00 % humedad en subbase

Tabla 57. Resultados CBR 6,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
50,48 %
CBR 95 % D. Max.
44,65 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58. Resultados expansión 6,00 % de humedad.

MAX.100 % D. Max.
0,00 %
MAX. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.5 Resultados CBR 8,00 % humedad en subbase

Tabla 59. Resultados CBR 8,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
50,05 %
CBR 95 % D. Max.
44,26 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60. Resultados expansión 8,00 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
0,00 %
EXP. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.6 Resultados CBR 9,00 % humedad en subbase

Tabla 61. Resultados CBR 9,00 % humedad.

CBR 100 % D. Max
47,07 %
CBR 95 % D. Max.
42,76 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 62. Resultados expansión 9,00 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
0,00 %
EXP. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.7 Resultados CBR 10,00 % humedad en subbase

Tabla 63. Resultados CBR 10,00 % de humedad.

CBR 100 % D. Max.
42,51 %
CBR 95 % D. Max.
37,30 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 64. Resultados expansión 10,00 % de humedad.

EXP. 100 % D. Max.
0,00 %
EXP. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Caracterización de la capa base

3.5.1 Ensayo de granulometría

Se realizó el ensayo de granulometría en la capa base según ASTM D422 AASHTO T88, del “Manual de ensayos de suelos y materiales” de la Administradora Boliviana de Carreteras, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 65. Humedad higroscópica de la muestra

Humedad higroscópica		
Suelo Húmedo + Capsula=	532,90	gr.
Suelo Seco + Capsula=	529,80	gr.
Peso del Agua=	3,10	gr.
Peso de la Capsula=	49,70	gr.
Peso del Suelo Seco=	480,10	gr.
Porcentaje de Humedad=	0,65 %	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 66. Contenido de humedad de la muestra

Muestra total seca		
Muestra Total Húmeda=	11390,00	gr.
Agregado Grueso (Ret N°4) =	7848,00	gr.
Pasa N°4 Húmedo=	3542,00	gr.
PasaN°10 Seco=	3519,28	gr.
Masa del agua=	22,72	gr.
Muestra Total Seca=	11367,28	gr.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 67. Análisis granulométrico capa base.

Tamices	Tamaño	Peso Retenido	Retenido Acumulado		% que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	del total
2"	50,8	0	0	0,00	100,0
1 1/2"	38,1	625	625	5,49	94,5
1"	25,4	500	1125	9,88	90,1
3/4"	19,05	990	2115	18,57	81,4
1/2"	12,5	1070	3185	27,96	72,0
3/8"	9,5	825	4010	35,21	64,8
Nº4	4,8	2395	6405	56,23	43,8
Nº10	2	1443	7848	68,90	31,1

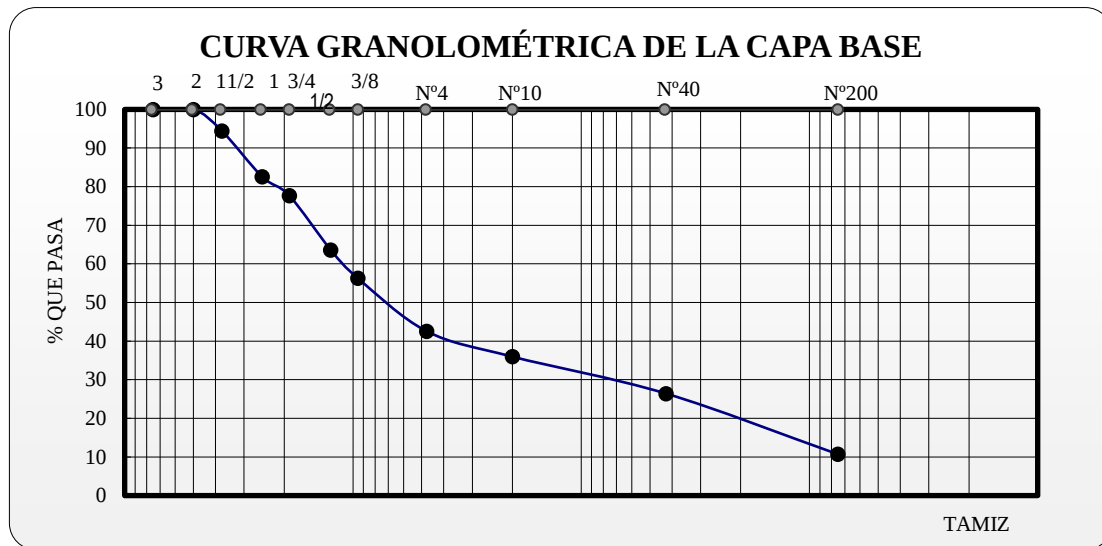
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 68. Análisis granulométrico del mortero del suelo.

Pasa Nº4 húmedo =	356,00 gr		Pasa Nº4 seco =	353,70	gr.
-------------------	-----------	--	-----------------	--------	-----

Tamices	Tamaño	Peso Retenido	Retenido Acumulado		% que pasa	% que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	de mortero	del total
Nº40	0,43	164	164,00	46,36	53,64	16,68
Nº200	0,075	102	266,00	75,20	24,80	7,71

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 17. Curva granulométrica capa base.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69. Resumen de resultados granulometría de la capa base

Resumen	
Tipo	%
Grava > N°4	56,23
Arena Gruesa	12,67
Arena Media	14,42
Arena Fina	8,97
Pasa N°200	7,71
Suma	100,00
Ret. N°10 y N°200	23,39

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Límites líquido (LL) de la capa base

El ensayo de límite líquido no pudo realizarse satisfactoriamente, ya que el material carece de la fracción fina necesaria para desarrollar una superficie de corte definida. Se clasifica como No Plástico (NP).

3.5.3 Límite plástico (LP) de la capa base

El material ensayado presenta predominio de partículas arenosas y escaso contenido de finos cohesivos, impidiendo la formación de hebras plásticas. En consecuencia, el límite plástico se reporta como No Plástico (NP).

3.5.4 Clasificación del suelo de la capa base

Tabla 70. Humedad natural de la capa base.

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula N°	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	205,36	200,01	210,99
Peso de suelo seco + Cápsula	203,8	195,23	190,56
Peso de cápsula	12,67	12,61	12,77
Peso de suelo seco	191,13	180,26	177,79
Peso del agua	1,56	4,78	20,43
Contenido de humedad	0,82	2,65	11,49
Promedio =	4,99 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71. Clasificación del suelo de la capa base.

Clasificación de suelo		Descripción
AASHTO:	A-1-a (0)	fragmentos de piedra, grava y arena

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Desgaste de los ángeles de la capa base

Tabla 72. Ensayo de desgaste de los ángeles.

%			Tipo de gradación (B)
Pasa	Retenido		Peso retenido
Pulgadas	Pulgadas	Milímetros	Gramos
1 1/2"	1"	25	1257,50
1"	3/4"	19	1256,50
3/4"	1/2"	12,5	1251,00
1/2"	3/8"	9,5	1250,00
	Total =		5015,00
Peso original =	5015,00	gr	
Peso final =	3729,80	gr	
Porcentaje de desgaste=	25,22	%	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.6 Ensayo de compactación de la capa base

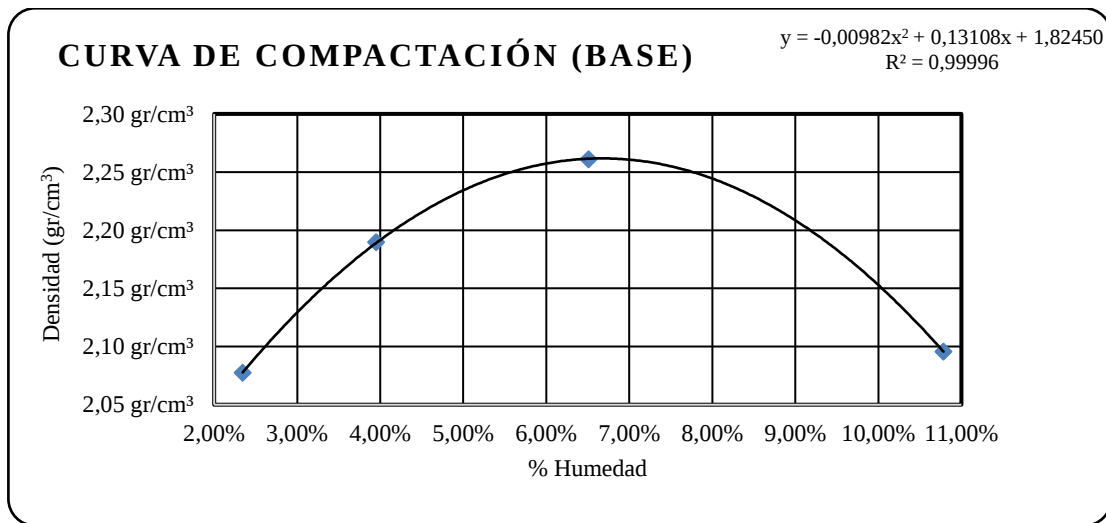
Tabla 73. Ensayo de compactación de la capa base.

Muestra: Única		Vol. =	2199,93	cm ³
N.º de capas=	5	5	5	5
N.º de golpes por capa=	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde=	10789,9	11120,2	11410,6	11220,1
Peso del molde=	6112,7	6112,7	6112,7	6112,7
Peso suelo húmedo=	4677,2	5007,5	5297,9	5107,4
Volumen de la muestra=	2199,9	2199,9	2199,9	2199,9
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³) =	2,13	2,28	2,41	2,32
Cápsula N° =	1cb	2cb	3cb	4cb
Peso suelo húmedo + capsula=	128,47	115,52	137,81	144,73

Peso suelo seco + cápsula=	125,78	111,60	130,00	132,10
Peso del agua=	2,69	3,92	7,81	12,63
Peso de la cápsula=	11	12,36	10,01	14,99
Peso suelo seco=	114,78	99,24	119,99	117,11
Contenido de humedad (%) =	2,34	3,95	6,51	10,78
Densidad suelo seco (gr/cm ³) =	2,08	2,19	2,26	2,10

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 18. Curva de compactación de la capa base.



Densidad Máxima	2,26	gr/cm ³
Humedad Optima	6,67	%

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7 Ensayo de CBR de la capa base

Se realizó el ensayo de CBR para el suelo de capa base de acuerdo con nuestra densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación T180, aquí solamente se incluirá los resultados obtenidos, las planillas de ensayo se encontrarán en el apartado de anexos.

Ecuación del anillo de CBR:

$$y = (13.569 * x) + 0.9293$$

Donde:

Y = Carga (kg)

x = Penetración (mm)

Área del pistón de carga = 19,3548 cm²

3.5.7.1 Resultados CBR 6,67 % humedad óptima en la capa base

Tabla 74. Resultados CBR_{CHO} patrón base.

CBR 100 % D. Max.
93,70 %
CBR 95 % D. Max.
88,77 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75. Resultados expansión CBR patrón base.

EXP. 100 % D. Max.
0,00 %
EXP. 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.2 Resultados CBR 4,00 % humedad en capa base

Tabla 76. Resultados CBR 4,00 % humedad en capa base.

CBR 100 % D. Max.
86,16 %
CBR 95 % D. Max.
81,60 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 77. Resultados expansión humedad 4,00 % en capa base.

EXP 100 % D. Max.
0,00 %
EXP 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.3 Resultados CBR 5,00 % humedad en capa base

Tabla 78. Resultados CBR 5,00 % de humedad en capa base.

CBR 100 % D. Max.
89,06 %
CBR 95 % D. Max.
84,16 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 79. Resultados expansión al 5,00 % de humedad en capa base.

EXP 100 % D. Max.
0,00

EXP 95 % D. Max.
0,00

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.4 Resultados CBR 6,00 % humedad en capa base

Tabla 80. Resultados CBR 6,00 % de humedad en capa base.

CBR 100 % D. Max.
91,85 %
CBR 95 % D. Max.
86,30 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 81. Resultados expansión al 6,00 % de humedad en capa base.

EXP 100 % D. Max.
0,00
EXP 95 % D. Max.
0,00 %

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.5 Resultados CBR 7,00 % humedad en capa base

Tabla 82. Resultados CBR 7,00 % de humedad en capa base.

CBR 100 % D. Max.
92,60 %
CBR 95% D. Max.
88,23 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 83. Resultados expansión al 7,00 % de humedad en capa base.

EXP. 100 % D. Max.
0,00
EXP 95 % D. Max.
0,00

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.6 Resultados CBR 8,00 % humedad en capa base

Tabla 84. Resultados CBR 8,00 % humedad en capa base.

CBR 100 % D. Max.
89,67 %
CBR 95 % D. Max.
84,94 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 85. Resultados expansión al 8,00 % de humedad en capa base.

EXP 100 % D. Max.
0,00
EXP. 95 % D. Max.
0,00

Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.7 Resultados CBR 9,00 % humedad en capa base

Tabla 86. Resultados CBR 9,00 % de humedad en capa base.

CBR 100 % D. Max.
86,67 %

CBR 95 % D. Max.
81,58 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 87. Resultados expansión al 9,00 % de humedad en capa base.

EXP. 100 % D. Max.
0,00
EXP. 95 % D. Max.
0,00

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E
INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de capa subrasante

Tabla 88. Resultados capa subrasante.

Humedad (%)	5,00	7,50	10,00	12,66	15,00	17,50	20,00
Densidad (gr/cm ³)	1,55	1,65	1,70	1,72	1,71	1,65	1,57
Afectación (%)	9,88	4,07	1,16	0,00	0,58	4,07	8,72
CBR%	4,25	4,84	5,50	6,83	5,35	4,36	3,39
Afectación (%)	37,77	29,16	19,47	0,00	21,78	36,26	50,40
Mr. sub rasante (Psi)	6379,13	7262,01	8254,68	10200	8018,07	6534,17	5085,00
Afectación (%)	37,46	28,80	19,07	0,00	21,39	35,94	50,15

Fuente: Elaboración propia.

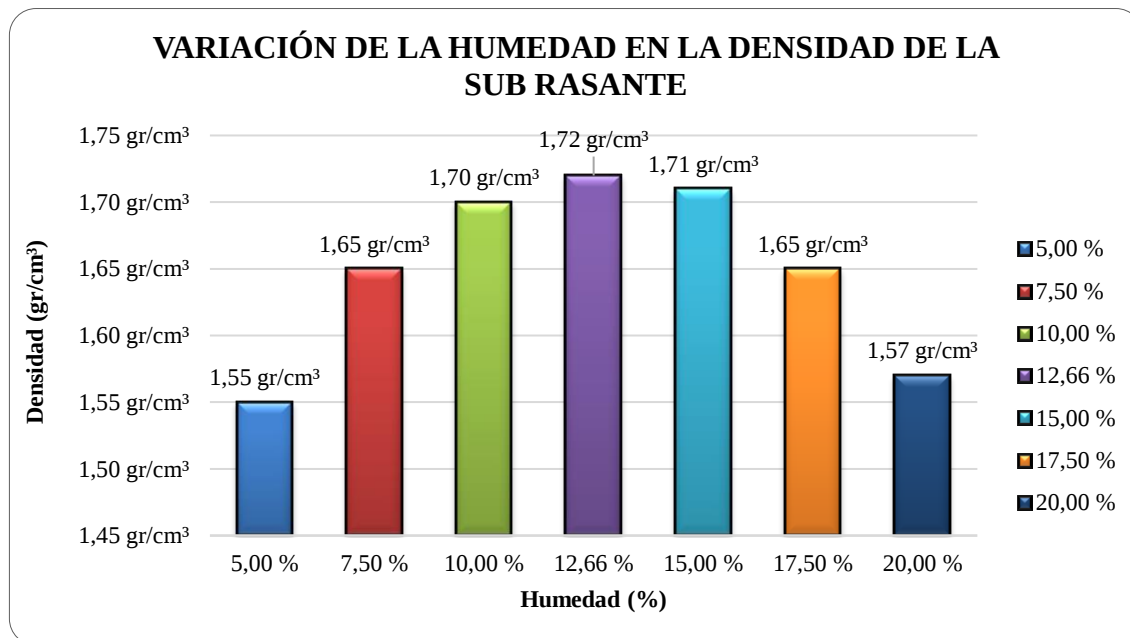
La tabla presentada permite analizar el comportamiento de la subrasante frente a diferentes condiciones de humedad. En ella se muestran tres parámetros fundamentales para la evaluación de su desempeño: la densidad, el CBR y el módulo resiliente. Estos indicadores reflejan la capacidad de la subrasante para soportar cargas y mantener la estabilidad del pavimento flexible.

Se observa que, en condiciones de humedad óptima, la subrasante alcanza sus mejores propiedades mecánicas. La densidad se maximiza, lo que indica una adecuada compactación del suelo. A su vez, el CBR presenta el valor más alto, demostrando la mayor capacidad de soporte frente a cargas aplicadas. De manera complementaria, el módulo resiliente también se incrementa en este punto, lo que significa que el suelo responde con mayor rigidez y resistencia a esfuerzos repetitivos.

Cuando la humedad disminuye por debajo del valor óptimo, la subrasante pierde compacidad y capacidad portante. El CBR y el módulo resiliente se reducen, lo que implica una menor resistencia al tránsito y mayor susceptibilidad a deformaciones. De

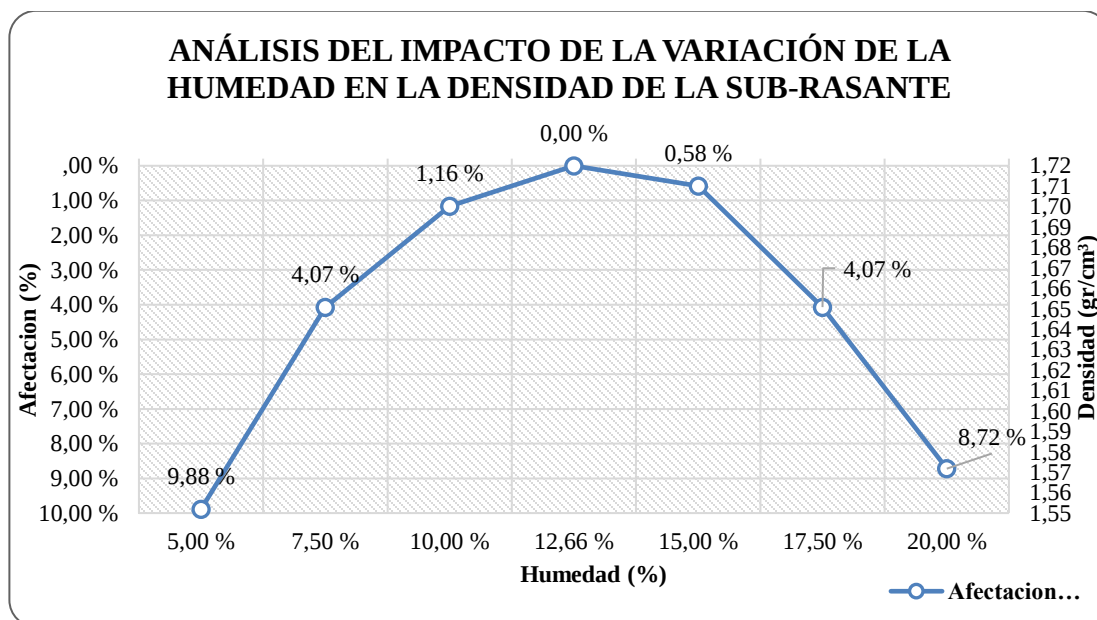
forma similar, cuando la humedad supera el nivel óptimo y se presenta un exceso de agua en los poros, la estructura del suelo se debilita.

Gráfico 19. Variación de la humedad en la densidad de la subrasante.



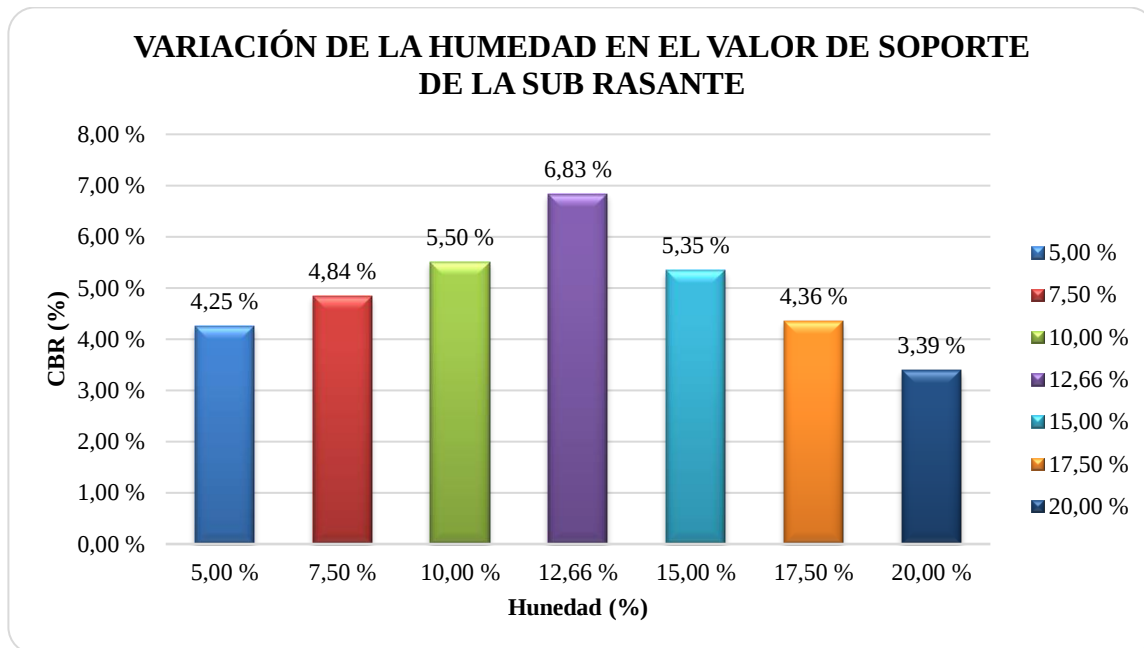
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 20. Análisis del impacto de variación de la humedad y densidad.



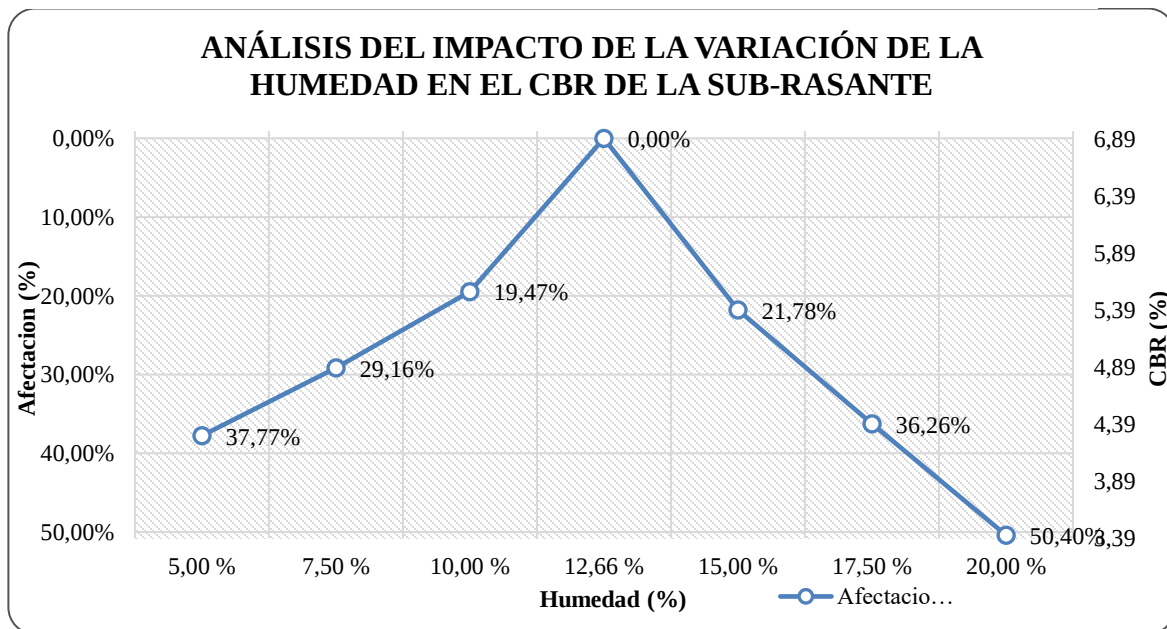
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 21. Análisis del impacto de la variación de la humedad en el CBR de la subrasante.

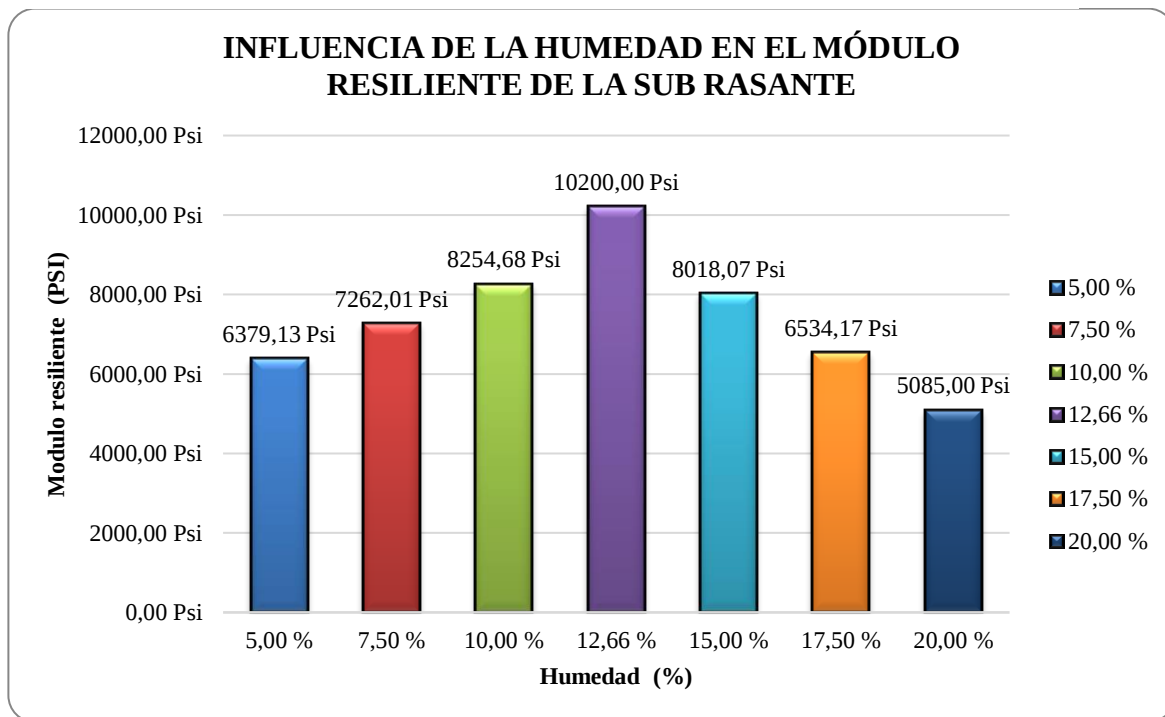


Fuente: Elaboración propia.

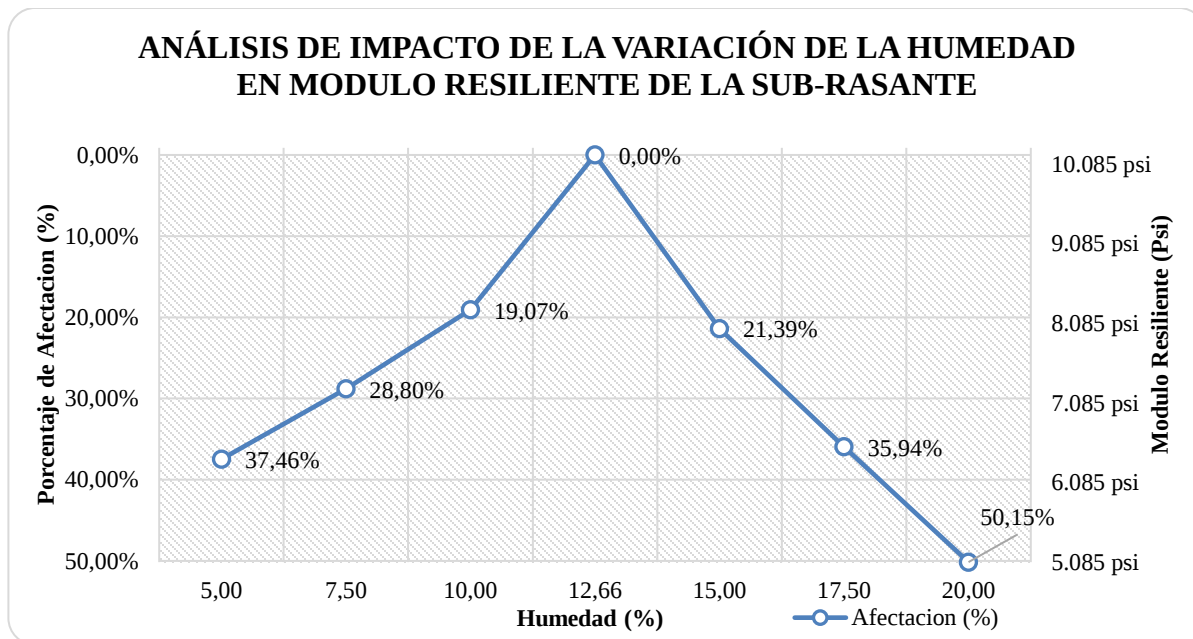
Gráfico 22. Análisis de impacto de la variación de la humedad en el CBR de la subrasante.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 23. Influencia de la humedad en el módulo resiliente de la subrasante.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 24. Análisis de impacto de la variación de la humedad en el módulo resiliente

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 5,00 %

La densidad obtenida a un contenido de humedad del 5,00 % es de 1,55 gr/cm³, con una afectación del 9,88%. Este porcentaje de afectación indica que el suelo no ha alcanzado su densidad óptima, lo cual puede comprometer su capacidad de soporte y estabilidad.

El valor del CBR (Capacidad de soporte del suelo) es de 4,25% a una humedad del 5,00 %, con una afectación del 37,77 %. Este alto porcentaje de afectación sugiere que el suelo está lejos de su condición óptima para proporcionar el soporte adecuado. Un CBR bajo indica que la subrasante no es capaz de soportar cargas pesadas sin deformarse.

El módulo resiliente (Mr.) del suelo es de 6379,13 psi a una humedad del 5,00 %, con una afectación del 37,46 %. Esto indica que la rigidez del suelo es significativamente menor de lo esperado en condiciones óptimas, lo que se traduce en una mayor deformabilidad bajo cargas repetitivas.

4.1.1.1 Impacto de la Humedad Moderada

El impacto de la humedad baja de la sub rasante del CBR a 4,25% es indicativo de un pobre desempeño en términos de capacidad de soporte. Para aplicaciones en vías urbanas, este valor es insuficiente, ya que podría llevar a fallas prematuras del pavimento.

El impacto de la humedad baja de la sub rasante con un Mr. a 6379,13 psi, aunque no es extremadamente bajo, todavía no es ideal. El suelo mostrará mayor deformación bajo cargas repetitivas, comprometiendo la integridad del pavimento a largo plazo.

4.1.1.2 Afectación del Suelo:

Densidad: La afectación del 9,88% en la densidad refleja que el suelo no está en su mejor estado compactado, lo que podría haberse logrado con un mejor control de la humedad durante la compactación.

CBR y Mr: Las afectaciones de 37,77% y 37,46% en el CBR y Mr, respectivamente, muestran que el suelo está significativamente por debajo de su capacidad máxima. Esto implica que, bajo la humedad actual, el suelo no proporciona el soporte ni la rigidez necesarios para un desempeño adecuado del pavimento.

4.1.2 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 7,50%

A una humedad del 7,50%, la densidad del suelo es de 1,65 gr/cm³. La afectación en la densidad es del 4,07%, lo que sugiere que el suelo está relativamente cerca de su densidad óptima. Este nivel de afectación indica una mejor compactación en comparación con valores de humedad más bajos o más altos.

El valor del CBR a una humedad del 7,50% es de 4,84%, con una afectación del 29,16%. Este valor de CBR aún es bajo para aplicaciones en pavimentos, pero muestra una mejora en comparación con humedades más bajas. La afectación considerable del CBR sugiere que, aunque el suelo tiene un mejor desempeño, aún no está en su condición óptima para proporcionar el soporte adecuado.

El módulo resiliente (Mr) a una humedad del 7,50% es de 7262,01 psi, con una afectación del 28,80%. Este valor de Mr, aunque mejor que en humedades más bajas, sigue siendo subóptimo. La afectación en Mr indica que el suelo todavía tiene una rigidez menor de la esperada en condiciones óptimas.

4.1.2.1 Impacto de la Humedad Moderada

La densidad de 1,65 gr/cm³ sugiere que el suelo está mejor compactado que a una humedad más baja, pero aún no ha alcanzado su densidad máxima. La afectación del 4,07% es relativamente baja, indicando que el suelo está más cerca de su condición óptima.

El CBR de 4,84% es una ligera mejora comparada con una humedad del 5%. Sin embargo, este valor aún es insuficiente para aplicaciones en vías urbanas, ya que podría resultar en fallas prematuras del pavimento bajo cargas de tráfico pesado.

Un Mr de 7262,01 psi es indicativo de una mayor rigidez del suelo en comparación con humedades más bajas, pero aún está por debajo del valor óptimo. El suelo mostrará una mejor resistencia a la deformación, aunque todavía no es ideal.

4.1.2.2 Afectación del Suelo

La afectación del 4,07% en la densidad refleja que el suelo no está en su estado óptimo de compactación, pero está significativamente mejor que a una humedad del 5%. Esto sugiere que con un pequeño ajuste en la humedad, la densidad podría acercarse al valor óptimo.

Las afectaciones del 29,16% y 28,80% en el CBR y Mr, respectivamente, indican que el suelo todavía no está en su mejor condición de soporte y rigidez. Estas propiedades son cruciales para la estabilidad y durabilidad del pavimento.

4.1.3 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 10,00 %

A una humedad del 10,00%, la densidad del suelo es de 1,70 gr/cm³. La afectación en la densidad es del 1,16%, lo que indica que el suelo está muy cerca de su densidad óptima. Este nivel de afectación es bajo, sugiriendo una buena compactación y una adecuada relación entre el contenido de humedad y la densidad.

El valor del CBR a una humedad del 10,00% es de 5,50%, con una afectación del 19,47%. este valor de CBR es mejor que en niveles de humedad más bajos, lo que indica una mayor capacidad de soporte del suelo, aunque sigue siendo inferior a lo deseable para soportar cargas pesadas de tráfico urbano.

El módulo resiliente (Mr) a una humedad del 10,00% es de 8254,68 psi, con una afectación del 19,07%. Este valor de Mr es indicativo de una mayor rigidez del suelo en comparación con niveles de humedad más bajos, aunque sigue sin ser óptimo.

4.1.3.1 Impacto de la Humedad Moderada-Alta:

La densidad de 1,70 gr/cm³ sugiere que el suelo está muy cerca de su condición óptima de compactación. La baja afectación del 1,16% indica que el suelo ha sido compactado eficientemente.

Mejora en CBR: El CBR de 5,50% es una mejora significativa en comparación con niveles de humedad más bajos, lo que sugiere una mejor capacidad de soporte del suelo. Sin embargo, para aplicaciones en vías urbanas, es deseable un CBR más alto.

Un Mr de 8254,68 psi indica una mejora en la rigidez del suelo en comparación con niveles de humedad más bajos, lo que significa que el suelo será menos deformable bajo cargas repetitivas.

4.1.3.2 Afectación del Suelo

La afectación del 1,16% en la densidad refleja que el suelo está en una buena condición de compactación, muy cerca de su densidad óptima.

Las afectaciones del 19,47 % y 19,07 % en el CBR y Mr, respectivamente, indican que el suelo todavía tiene margen para mejorar en términos de capacidad de soporte y rigidez. Sin embargo, estos valores de afectación son considerablemente menores que en condiciones de humedad más bajas.

4.1.4 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 12,66 %

A una humedad del 12,66 %, la densidad del suelo es de 1,72 gr/cm³. La afectación en la densidad es del 0,00 %, lo que indica que el suelo ha alcanzado su densidad óptima. Este valor de densidad es el más alto alcanzado en las condiciones de humedad estudiadas, sugiriendo una excelente compactación y cohesión del suelo en estas condiciones.

El valor del CBR a una humedad del 12,66 % es de 6,83 %, con una afectación del 0,00%. Este valor de CBR es el más alto observado en las condiciones de humedad estudiadas, lo que indica una capacidad de soporte máxima del suelo. Este valor es adecuado para aplicaciones en pavimentos urbanos, proporcionando una base sólida y estable.

El módulo resiliente (Mr) a una humedad del 12,66 % es de 10200 psi, con una afectación del 0,00 %. Este valor de Mr es el más alto registrado en las condiciones de humedad estudiadas, lo que indica una rigidez máxima del suelo. Esto sugiere que el suelo será menos deformable bajo cargas repetitivas, ofreciendo un buen desempeño a largo plazo.

4.1.4.1 Impacto de la Humedad Óptima

La densidad de 1,72 gr/cm³ alcanzada a una humedad del 12,66 % indica que el suelo ha sido compactado de manera óptima. La ausencia de afectación (0,00 %) en la densidad sugiere que esta es la condición ideal para la compactación del suelo A-4.

El CBR de 6,83 % es el valor más alto observado, indicando que el suelo tiene su máxima capacidad de soporte a esta humedad. Este valor es adecuado para soportar las cargas de tráfico en vías urbanas.

El Mr de 10200 psi a una humedad del 12,66 % indica que el suelo tiene su mayor rigidez en estas condiciones. Esto significa que el suelo será menos susceptible a la deformación bajo cargas repetitivas, lo que es crucial para la durabilidad del pavimento.

4.1.4.2 Afectación del Suelo

La afectación del 0,00 % en la densidad refleja que el suelo está en su estado óptimo de compactación, logrando la mayor densidad posible.

La afectación del 0,00 % en el CBR y Mr indica que el suelo ha alcanzado sus valores máximos de capacidad de soporte y rigidez, respectivamente. Estas condiciones son ideales para el desempeño del pavimento.

4.1.5 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 15,00 %

A una humedad del 15,00 %, la densidad del suelo es de 1,71 gr/cm³. La afectación en la densidad es del 0,58%, lo que sugiere que el suelo está cerca de su densidad óptima, aunque no es la máxima alcanzada en las condiciones de humedad estudiadas. Esta densidad indica una buena compactación del suelo.

El valor del CBR a una humedad del 15,00 % es de 5,35 %, con una afectación del 21,78 %. Aunque este valor de CBR es relativamente alto, la afectación indica que el suelo no está en su condición óptima de capacidad de soporte, mostrando una disminución comparada con el valor óptimo observado a una humedad del 12,66 %.

El módulo resiliente (Mr) a una humedad del 15,00 % es de 8018,07 psi, con una afectación del 21,39 %. Este valor de Mr, aunque razonable, muestra una rigidez menor en comparación con la condición óptima observada a una humedad del 12,66 %.

4.1.5.1 Impacto de la Humedad Moderadamente Alta

La densidad de 1,71 gr/cm³ sugiere que el suelo ha sido compactado de manera efectiva. La afectación del 0,58% indica que el suelo está cerca de su densidad óptima, aunque no en su mejor condición.

El CBR de 5,35% es menor que el máximo valor observado a una humedad del 12,66 %, lo que indica que la capacidad de soporte del suelo disminuye ligeramente con un aumento en la humedad. La afectación del 21,78 % refleja que el suelo no está en su mejor condición para soportar cargas de tráfico urbano.

Un Mr de 8018,07 psi muestra que el suelo tiene una rigidez razonable, pero inferior al valor óptimo observado a una humedad del 12,66 %. La afectación del 21,39 % sugiere que el suelo será más susceptible a la deformación bajo cargas repetitivas.

4.1.5.2 Afectación del Suelo

La afectación del 0,58 % en la densidad indica que el suelo está cerca de su estado óptimo de compactación, aunque no en su condición más óptima.

Las afectaciones del 21,78 % en el CBR y 21,39 % en el Mr indican que el suelo, aunque tiene un desempeño aceptable, está lejos de su capacidad y rigidez máximas.

4.1.6 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 17,50 %

A una humedad del 17,50 %, la densidad del suelo es de 1,65 gr/cm³. La afectación en la densidad es del 4,07 %, lo que sugiere que el suelo está relativamente cerca de su densidad óptima. Sin embargo, la afectación indica que podría mejorarse la compactación del suelo para alcanzar una densidad más alta.

El valor del CBR a una humedad del 17,50 % es de 4,36 %, con una afectación del 36,26 %. Este valor de CBR es relativamente bajo, lo que indica una capacidad de soporte deficiente del suelo. La alta afectación sugiere que el suelo no está en su mejor condición para

El módulo resiliente (Mr) a una humedad del 17,50 % es de 6534,17 psi, con una afectación del 35,94 %. Este valor de Mr indica una rigidez relativamente baja del suelo. La alta afectación sugiere que el suelo no está en su mejor condición para resistir deformaciones bajo cargas de tráfico.

4.1.6.1 Impacto de la Humedad Alta

La densidad de 1,65 gr/cm³ sugiere que el suelo ha sido compactado, pero la afectación del 4,07 % indica que aún se puede mejorar la compactación para alcanzar una densidad más alta y una mejor capacidad de soporte.

El CBR de 4,36 % es bajo y la alta afectación del 36,26% indica que el suelo no tiene una capacidad de soporte adecuada para cargas de tráfico urbano. Esto puede resultar en deformaciones prematuras del pavimento y problemas de estabilidad.

Mr de 6534,17 psi muestra una rigidez relativamente baja del suelo, lo que sugiere una mayor susceptibilidad a deformaciones bajo cargas repetitivas. La alta afectación del 35,94% indica que el suelo está lejos de su condición óptima en términos de rigidez.

4.1.6.2 Afectación del Suelo

Densidad: La afectación del 4,07 % en la densidad indica que el suelo no está en su mejor condición de compactación, lo que afecta su capacidad de soporte y rigidez.

Las altas afectaciones del 36,26 % en el CBR y 35,94 % en el Mr sugieren que el suelo no está en su mejor condición para soportar cargas de tráfico urbano y resistir deformaciones.

4.1.7 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 20,00 %

A una humedad del 20,00 %, la densidad del suelo es de 1,57 gr/cm³. La afectación en la densidad es del 8,72 %, lo que indica que el suelo está lejos de su densidad óptima. Esta baja densidad sugiere una compactación deficiente del suelo.

El valor del CBR a una humedad del 20,00 % es de 3,39 %, con una afectación del 50,40%. Este valor de CBR es muy bajo, indicando una capacidad de soporte extremadamente deficiente del suelo. La alta afectación sugiere que el suelo está muy por debajo de su capacidad de soporte esperada.

El módulo resiliente (Mr) a una humedad del 20,00% es de 5085,00 psi, con una afectación del 50,15%. Este valor de Mr indica una rigidez muy baja del suelo. La alta afectación sugiere que el suelo está muy por debajo de su rigidez esperada.

4.1.7.1 Impacto de la Humedad Alta

La densidad de 1,57 gr/cm³ sugiere que el suelo no ha sido compactado adecuadamente, con una alta afectación del 8,72% indicando una compactación deficiente.

Capacidad de Soporte Severamente Reducida: El CBR de 3,39% es extremadamente bajo, lo que sugiere que el suelo no tiene capacidad de soporte suficiente para cargas de tráfico. La alta afectación del 50,40% indica que el suelo está muy por debajo de su capacidad de soporte esperada.

Rigidez del Suelo Reducida: El Mr de 5085,00 psi es muy bajo, indicando una rigidez extremadamente baja del suelo. La alta afectación del 50,15% sugiere que el suelo está muy por debajo de su rigidez esperada.

4.1.7.2 Afectación del Suelo

Densidad: La alta afectación del 8,72% en la densidad indica que el suelo no ha sido compactado adecuadamente y está lejos de su densidad óptima.

CBR y Mr: Las altas afectaciones del 50,40% en el CBR y 50,15% en el Mr sugieren que el suelo está muy por debajo de su capacidad de soporte y rigidez esperadas.

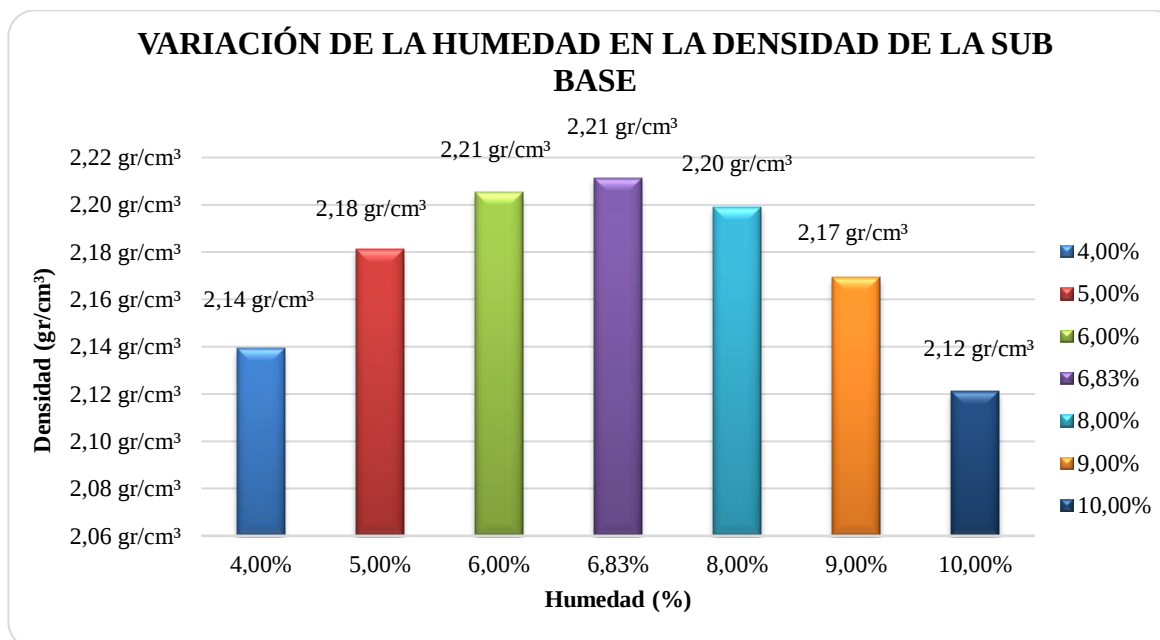
4.2 Impacto de la Humedad en las Propiedades Mecánicas de la Sub Base

La siguiente tabla representa un análisis detallado de cómo diferentes niveles de humedad afectan diversas propiedades mecánicas de una sub base compuesta por suelo tipo A-2-4 (gravas y arenas arcillosas). Se han evaluado parámetros clave como la densidad, la capacidad de soporte (CBR), el módulo resiliente (Mr), y el espesor de la capa de subbase. Cada uno de estos parámetros se analiza en función del porcentaje de afectación, proporcionando una visión integral de cómo la humedad influye en la calidad y el desempeño del material de subbase en pavimentos flexibles en vías urbanas.

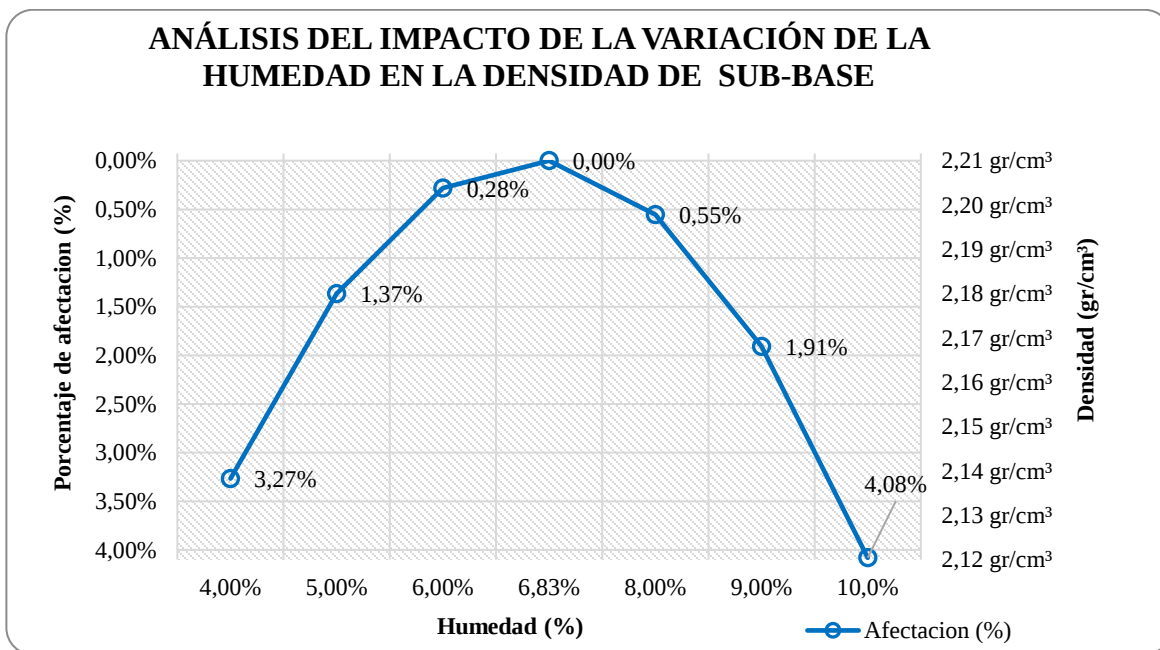
Tabla 89. Resultados capa sub base.

	W1	W2	W3	W _{CHO}	W4	W5	W6
Humedad (%)	4,00 %	5,00 %	6,00 %	6,83 %	8,00 %	9,00 %	10,00 %
Densidad (gr/cm³)	2,14 gr/cm ³	2,18 gr/cm ³	2,21 gr/cm ³	2,21 gr/cm ³	2,20 gr/cm ³	2,17 gr/cm ³	2,12 gr/cm ³
Afectación (%)	3,27 %	1,37 %	0,28 %	0,00 %	0,55 %	1,91 %	4,08 %
CBR (%)	43,37 %	48,24 %	50,48 %	52,44 %	50,05 %	47,07 %	42,51 %
Afectación (%)	17,29 %	8,01 %	3,73 %	0,00 %	4,56 %	10,24 %	18,93 %
Mr. Sub Base (Psi)	17190,91 psi	17647,30 psi	17835,07 psi	17926,88 psi	17814,68 psi	17537,50 psi	17110,33 psi
Afectación (%)	4,11 %	1,56 %	0,51 %	0,00 %	0,63 %	2,17 %	4,55 %
Espesor (cm)	28 cm	23 cm	19 cm	15 cm	20 cm	27 cm	36 cm
Afectación (%)	83,33 %	66,67 %	50,00 %	0,00 %	33,33 %	66,67 %	83,33 %

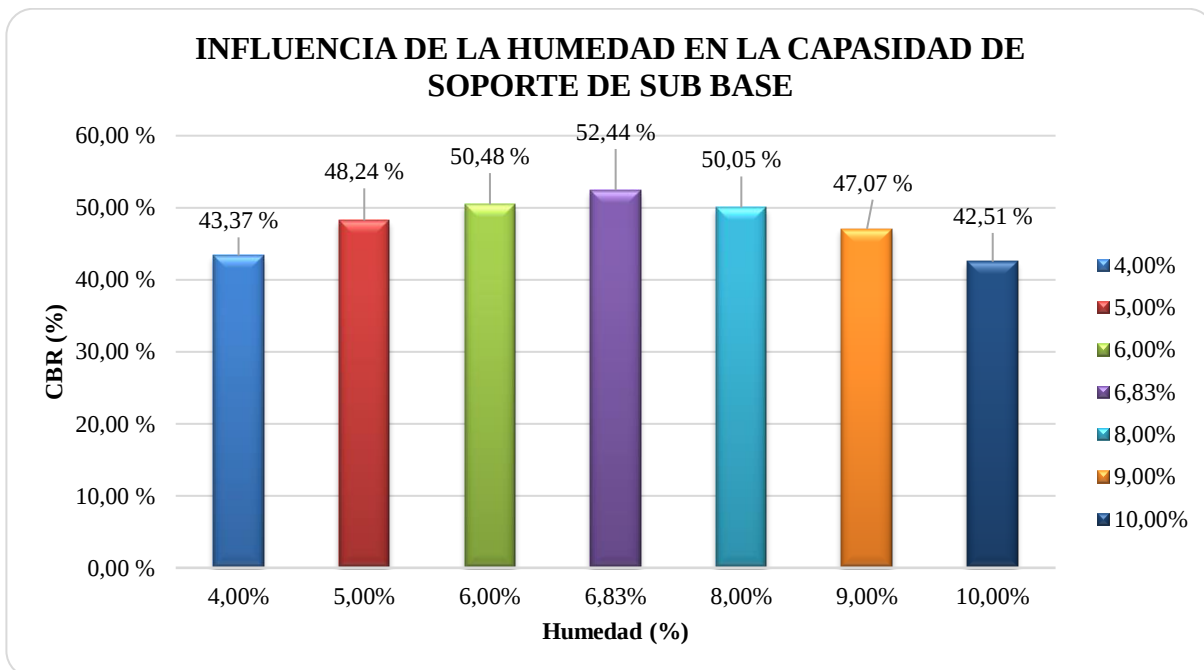
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 25. Variación de la densidad de la sub base con cambios en la humedad

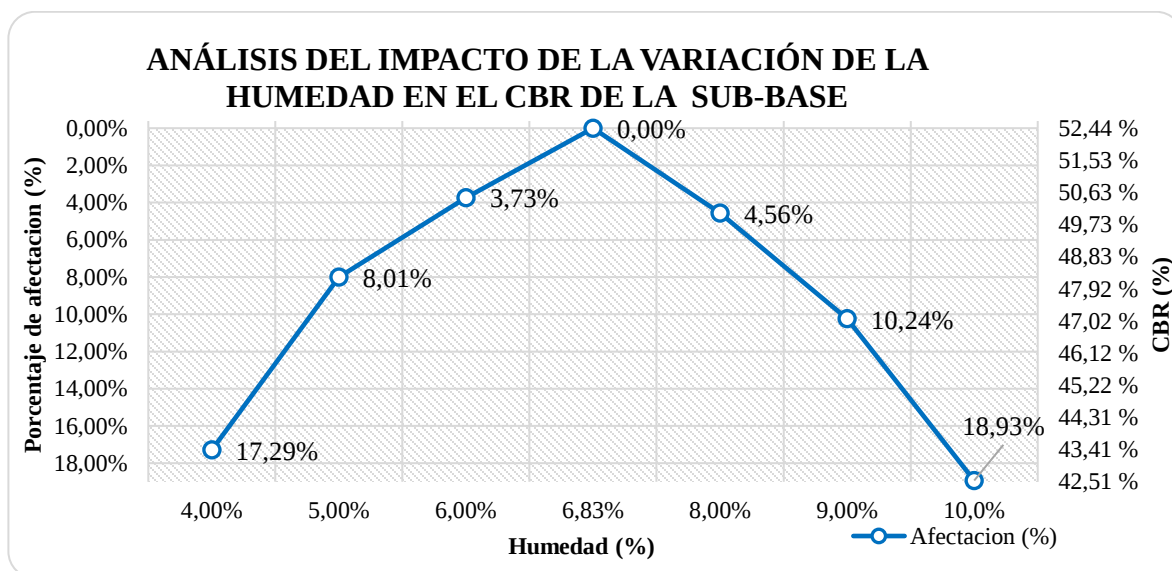
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 26. Impacto del porcentaje de afectación en la densidad de la sub base

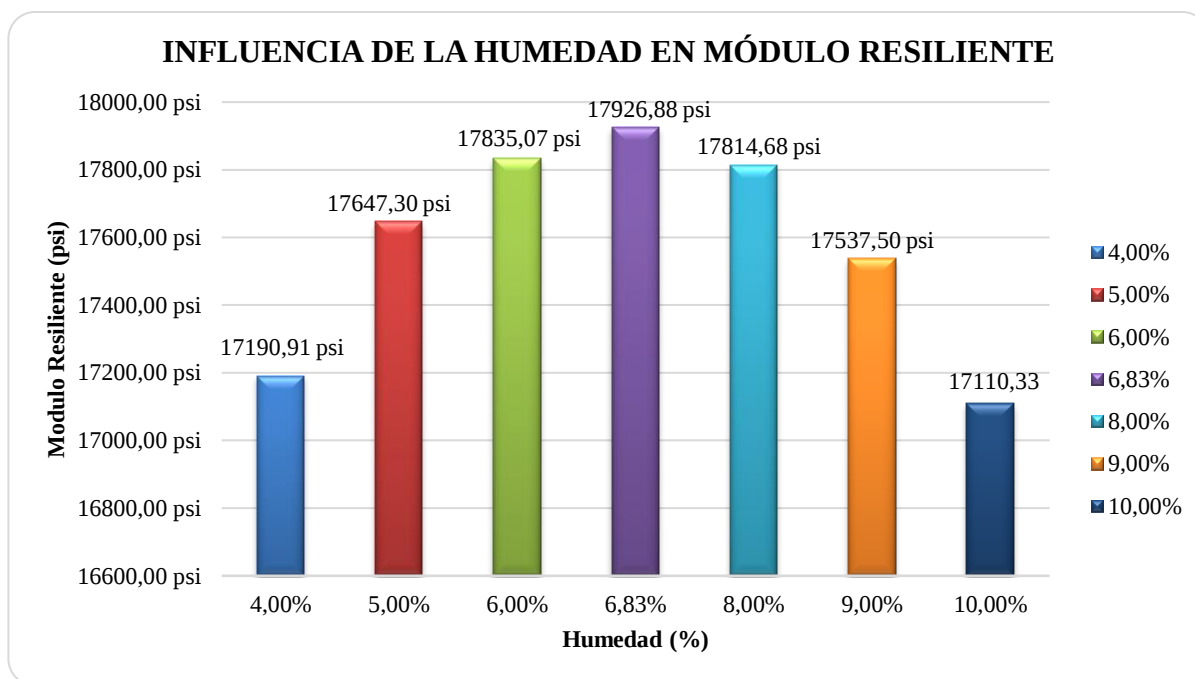
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 27. Variación del CBR de la subbase con cambios en la humedad

Fuente: Elaboración propia.

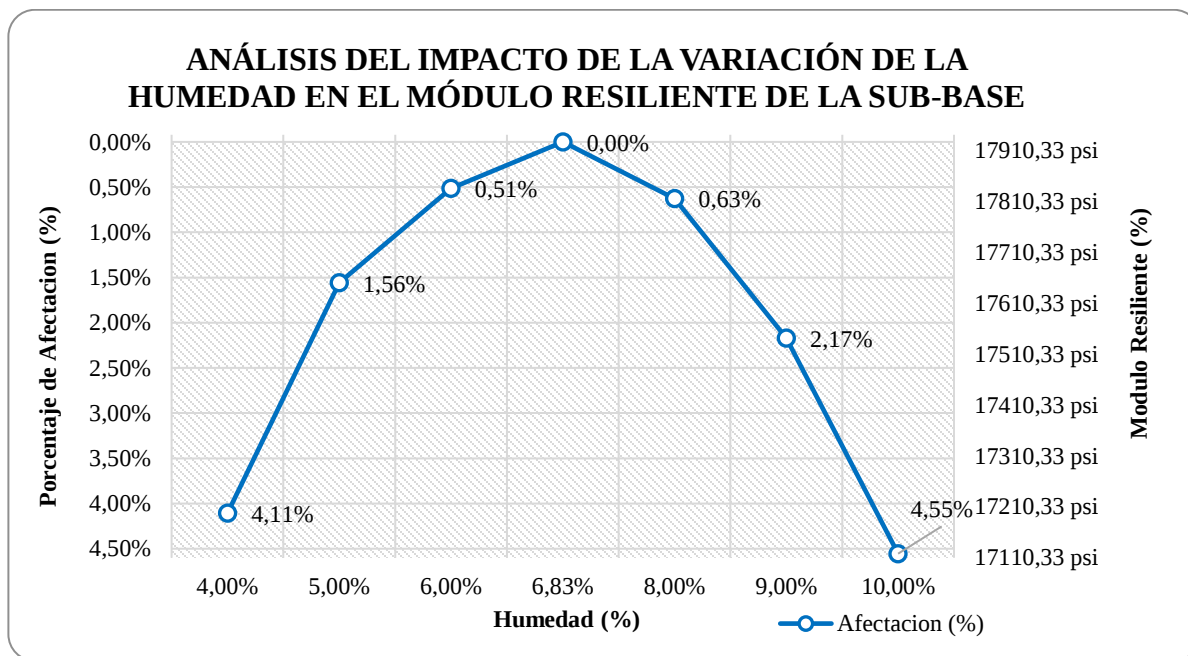
Gráfico 28. Impacto del porcentaje de afectación del CBR de la sub base

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 29. Variación del módulo resiliente de la sub base con cambios en la humedad

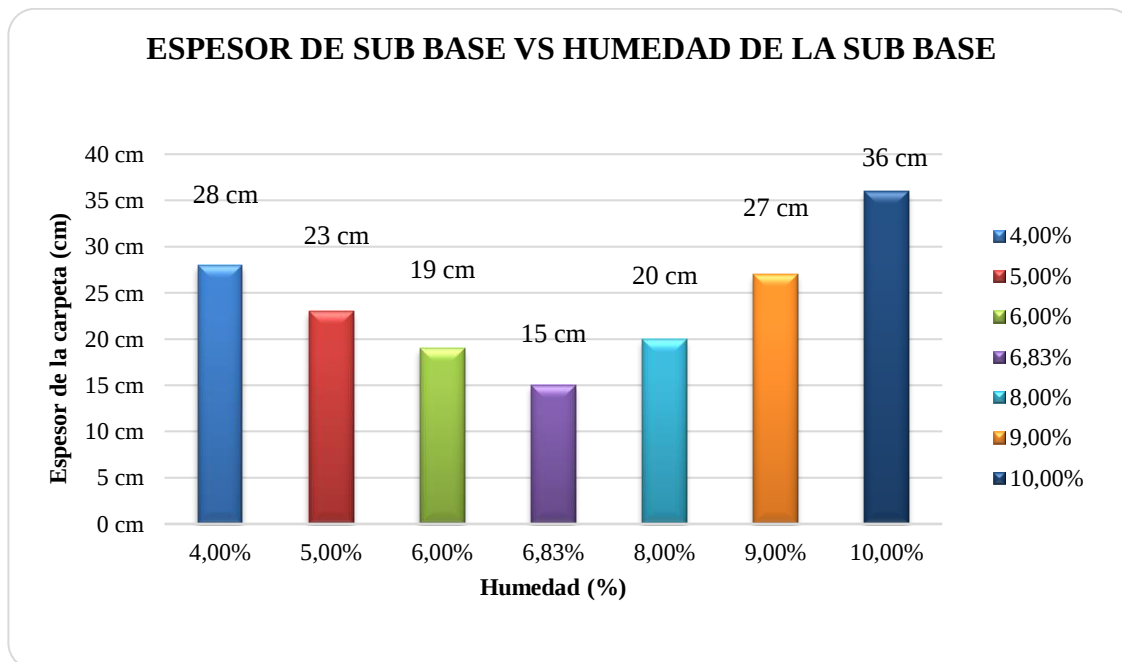
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 30. Impacto del porcentaje de afectación en el módulo resiliente de la sub base

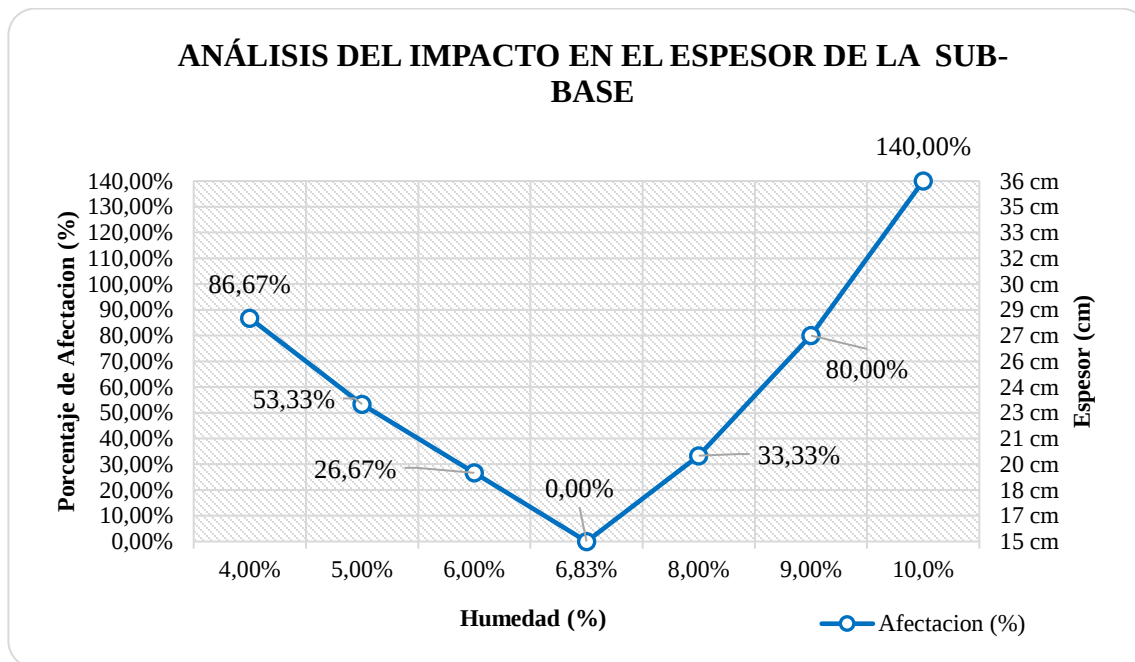


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 31. Variación del espesor de la sub base con cambios en la humedad



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 32. Impacto del porcentaje de afectación en el espesor de la subbase

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 4,00%

Una humedad del 4,00% es relativamente baja, lo que sugiere que el suelo no está saturado y, por lo tanto, debería tener una buena capacidad de soporte. Sin embargo, es importante considerar cómo esta humedad se compara con el óptimo de compactación determinado en el laboratorio.

La densidad de 2,14 gr/cm³ indica una buena compactación del material de sub base. Una alta densidad es deseable porque proporciona una base estable para las capas superiores del pavimento, reduciendo el potencial de asentamientos diferenciales y mejorando la durabilidad de la estructura del pavimento.

El California Bearing Ratio (CBR) del 43,37 % es bastante alto y refleja una capacidad de soporte considerable del material de sub base. Este valor es muy positivo, ya que sugiere que el material puede resistir cargas pesadas, lo cual es fundamental para el tráfico urbano.

El módulo resiliente (M_r) con un valor de 17190,91 psi es indicativo de un material que puede recuperarse bien después de ser sometido a cargas de tráfico, lo que es beneficioso para la longevidad del pavimento.

Un espesor de sub base de 28 cm es estándar y generalmente adecuado para vías urbanas con tráfico moderado a pesado. Este espesor proporciona una base suficientemente fuerte para soportar las cargas de tráfico sin experimentar deformaciones significativas.

4.2.1.1 Porcentajes de Afectación

Afectación de la humedad es 3,27 % este nivel de afectación en la humedad es bajo, lo que indica que la variación de humedad en la sub base es mínima y no debería afectar significativamente su desempeño.

Un 17,29 % de afectación en el CBR sugiere cierta variabilidad en la capacidad de soporte, posiblemente debido a cambios en las condiciones de humedad o la compactación. Este es un punto a monitorear ya que puede influir en la estabilidad a largo plazo del pavimento.

Un 4,11 % de afectación en el módulo resiliente es relativamente bajo, indicando que la elasticidad del material no está siendo significativamente comprometida por las condiciones de tráfico y clima.

La capa de subbase tiene una profundidad de 28 cm. La profundidad de la sub base es crucial para la distribución de cargas y la estabilidad del pavimento. La afectación del 83.33 % en la capa de subbase podría implicar una débil sub rasante.

4.2.2 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 5,00 %

La densidad registrada es de 2,18 gr/cm³ indica una buena compactación, que es crucial para proporcionar una base sólida y estable para el pavimento. Esta densidad es

ligeramente superior a la del análisis anterior, lo que puede implicar una mejora en la compactación y, por ende, en la capacidad de soporte.

La afectación de 1,37 % podría referirse a una reducción de la densidad bajo ciertas condiciones adversas, como la variación de humedad. Sin embargo, este valor es relativamente bajo, sugiriendo que la sub base mantiene su densidad de manera bastante uniforme.

El CBR registrado es de 48,24 %. indica que el material tiene una buena capacidad de soporte de carga, lo que es favorable para el desempeño del pavimento.

La afectación del 8,01 % en el CBR sugiere que bajo ciertas condiciones (como cambios en la humedad), la resistencia del suelo puede disminuir. No obstante, este porcentaje de afectación es moderado, indicando una resistencia relativamente estable.

El módulo resiliente (Mr) es de 17647,30 psi. indica que el suelo tiene buena capacidad para soportar cargas dinámicas sin deformarse significativamente.

La afectación del 1,56 % en el Mr sugiere una leve disminución de la elasticidad bajo ciertas condiciones adversas. Este valor es bajo, indicando que el material mantiene su elasticidad de manera bastante constante.

La capa de subbase tiene una profundidad de 23 cm. La profundidad adecuada es crucial para la distribución de cargas y la estabilidad del pavimento.

La afectación del 66,67 % en la capa de subbase podría indicar variabilidad en la calidad o compactación del material a diferentes profundidades. Esto es debido a una baja compactación de la sub rasante por no haber llegado a su humedad optima.

4.2.3 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la subbase a una humedad del 6,00 %

La densidad registrada es de 2,21 gr/cm³. Una alta densidad indica una buena compactación, que es esencial para proporcionar una base sólida y estable para el pavimento. Este valor sugiere una excelente compactación del material.

La afectación de 0,28 % en la densidad es muy baja, indicando que la densidad del material se mantiene estable incluso bajo condiciones variables, lo cual es positivo para la durabilidad y la capacidad de carga de la sub base.

Un valor de 50,48 % en el CBR indica una alta capacidad de soporte de carga, lo cual es ideal para una sub base en vías urbanas.

La afectación del 3,73 % en el CBR sugiere que bajo ciertas condiciones (como cambios en la humedad), la resistencia del suelo puede disminuir ligeramente. Este valor de afectación es bajo, indicando una resistencia relativamente estable.

El módulo resiliente (Mr) es de 17835,07 psi. indica que el suelo tiene buena capacidad para soportar cargas dinámicas sin deformarse significativamente.

La afectación del 0,51 % en el Mr sugiere una mínima disminución de la elasticidad bajo ciertas condiciones adversas. Este valor es muy bajo, indicando que el material mantiene su elasticidad de manera bastante constante.

La capa de subbase tiene una profundidad de 19 cm. La profundidad adecuada es crucial para la distribución de cargas y la estabilidad del pavimento.

La profundidad de la capa de subbase de 19 cm es adecuada, aunque la afectación del 25,00 % indica variabilidad en la calidad a diferentes profundidades

4.2.4 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la subbase a una humedad del 6,83 %

La densidad optima registrada es de 2,21 gr/cm³. Una densidad alta indica una buena compactación, esencial para proporcionar una base sólida y estable para el pavimento. Este valor sugiere una excelente compactación del material, lo cual es positivo para la capacidad de soporte de la sub base.

La afectación de 0,00 % en la densidad sugiere que el valor de densidad se mantiene constante sin variaciones significativas bajo diferentes condiciones. Esto es ideal, ya que indica una estabilidad en la densidad del material.

El CBR de 52,44 % es bastante alto, lo cual es muy positivo para la capacidad de carga del pavimento. El Mr de 17926,88 psi indica una excelente elasticidad y resistencia a cargas repetitivas. Ambos valores sugieren que la sub base tiene un desempeño estructural sobresaliente, esencial para la durabilidad del pavimento.

La profundidad de la capa de subbase de 15 cm es adecuada y la ausencia de afectación indica una estructura uniforme y consistente. Esto es esencial para asegurar la distribución uniforme de las cargas y la estabilidad del pavimento.

4.2.5 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 8,00 %

La densidad registrada es de 2,20 gr/cm³. Este valor sugiere una buena compactación del material, lo cual es esencial para proporcionar una base sólida y estable para el pavimento.

La afectación del 0,55 % en la densidad indica una ligera variación bajo diferentes condiciones, lo cual sugiere que la densidad se mantiene bastante constante, con una pequeña influencia de humedad.

El valor de CBR registrado es de 50,05 %. El CBR es una medida de la resistencia al esfuerzo de corte del suelo en comparación con un suelo estándar. Un valor de 50,05

% indica una buena capacidad de soporte de carga, adecuada para la sub base en vías urbanas.

La afectación del 4,56 % en el CBR sugiere que la resistencia del suelo disminuye bajo ciertas condiciones, debido a la variación en la humedad. Este porcentaje de afectación es moderado, indicando que el material tiene una resistencia relativamente estable.

El módulo resiliente (Mr) es de 17814,68 psi. Un Mr alto indica que el suelo tiene buena capacidad para soportar cargas dinámicas sin deformarse significativamente.

La afectación del 0,63 % en el Mr sugiere una mínima variación en la elasticidad del suelo bajo diferentes condiciones. Este valor es bajo, indicando que el material mantiene su elasticidad de manera bastante constante.

El CBR de 50,05 % es bastante alto, lo cual es positivo para la capacidad de carga del pavimento. El Mr de 17814,68 psi indica una buena elasticidad y resistencia a cargas repetitivas. Ambos valores sugieren que la sub base tiene un buen desempeño estructural, esencial para la durabilidad del pavimento.

La profundidad de la capa de subbase de 20 cm es adecuada, aunque la afectación del 33,33 % sugiere variabilidad en la calidad a diferentes profundidades. Esto es debido que se tiene una sub rasante débil con capacidad portante de 5,35 % esto refleja un aumento en el espesor de la sub base para una mejor resistencia

4.2.6 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 10,00 %

Este valor de la humedad es alto y puede afectar negativamente la compactación y las propiedades mecánicas del suelo.

La densidad es relativamente baja comparada con valores ideales para una sub base compactada. La afectación del 4,08 % indica una variabilidad significativa, sugiriendo inconsistencias en la compactación del material, debido a la alta humedad.

El CBR de 42,51 % sugieren que el material no está completamente compacto y tiene una menor capacidad de soporte en comparación con anteriores casos..

El Mr de 17110,33 psi es alto, indicando buena elasticidad del suelo. Sin embargo, la afectación del 4,55 % señala que la elasticidad del material varía bajo diferentes condiciones, debido a la alta humedad.

La profundidad de la capa de subbase de 36 cm es adecuada para la distribución de cargas y la estabilidad del pavimento. Sin embargo, la alta afectación del 83,33 % sugiere una variabilidad significativa desde el punto de vista económico. Este valor alto del espesor se debe a que debajo de esta capa se encuentra la subrasante, la cual tiene un CBR de 3,39 %, un valor demasiado bajo debido al exceso de humedad presente en el suelo limo arcilloso. Para ser más precisos, en 5000 gramos de suelo limoso arcilloso, se encuentra 1000 ml de agua. Esta condición lleva a un aumento del espesor de la subrasante para compensar los esfuerzos adicionales que debe soportar debido a la baja capacidad de soporte del suelo.

Este análisis destaca cómo el exceso de humedad en la subrasante afecta directamente el diseño de la sub base, aumentando su espesor para garantizar la estabilidad del pavimento. Sin embargo, este aumento en el espesor también conlleva costos adicionales, lo que subraya la importancia de abordar las condiciones de la subrasante desde una perspectiva económica y de ingeniería para optimizar el diseño y la construcción del pavimento.

4.3 Análisis de capa base

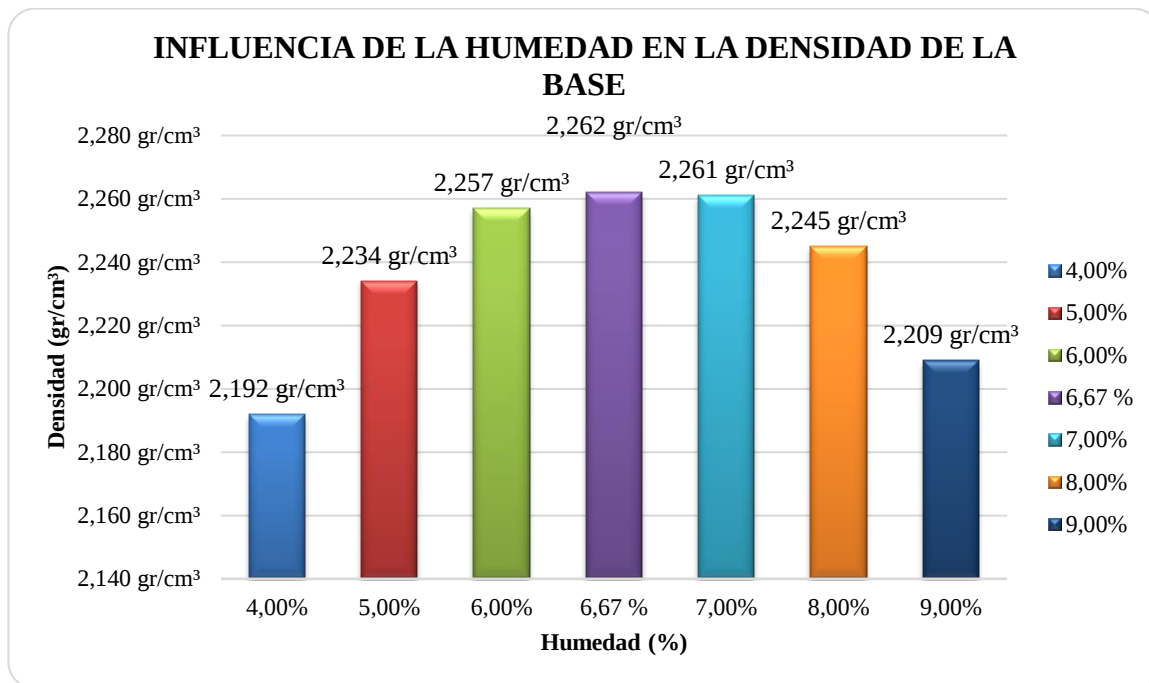
La tabla proporciona resultados significativos de pruebas de laboratorio que incluyen humedad, densidad, CBR (California Bearing Ratio), módulo resiliente (Mr) y espesor de la base, junto con el porcentaje de afectación de cada parámetro. Estos datos son esenciales para evaluar la idoneidad y el comportamiento del material de la base bajo diferentes condiciones y su capacidad para soportar las demandas del tráfico urbano.

Tabla 90. Resultados capa base.

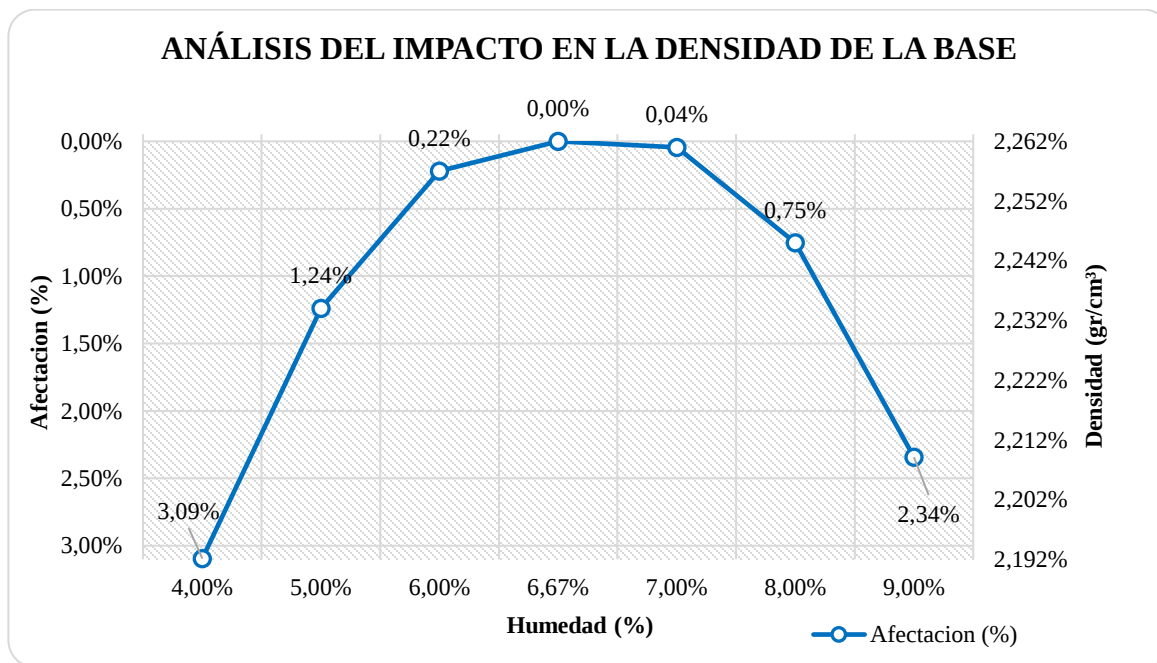
	W1	W2	W3	W _{CHO}	W4	W5	W6
Humedad (%)	4,00%	5,00%	6,00%	6,67 %	7,00%	8,00%	9,00%
Densidad (gr/cm ³)	2,192 gr/cm ³	2,234 gr/cm ³	2,257 gr/cm ³	2,262 gr/cm ³	2,261 gr/cm ³	2,245 gr/cm ³	2,209 gr/cm ³
Afectación (%)	3,09%	1,24%	0,22%	0,00%	0,04%	0,75%	2,34%
CBR%	86,16 %	89,06 %	91,85 %	93,70 %	92,60 %	89,67 %	86,67 %
Afectación (%)	8,05%	4,95%	1,97%	0,00%	1,17%	4,30%	7,50%
Mr. (psi)	28846,37 psi	29088,54 psi	29320,99 psi	29475,00 psi	29383,33 psi	29138,89 psi	28888,89 psi
Afectación (%)	2,13%	1,31%	0,52%	0,00%	0,31%	1,14%	1,99%
Espesor (cm)	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
Afectación (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fuente: Elaboración propia.

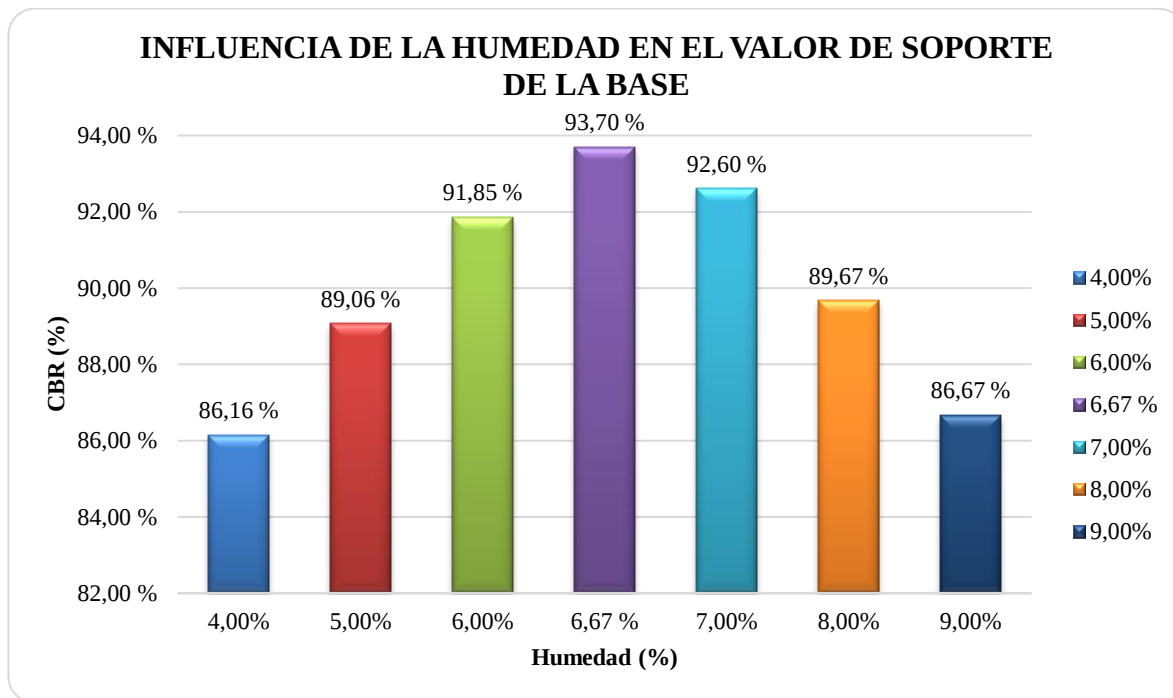
El análisis detallado de estos resultados permitirá comprender cómo las variaciones en la humedad, densidad y otros parámetros influyen en las propiedades mecánicas del material, proporcionando información valiosa para la optimización del diseño de pavimentos urbanos y la toma de decisiones en la construcción de infraestructuras viales sostenibles y de alta calidad.

Gráfico 33. Variación de la humedad en la densidad de la base

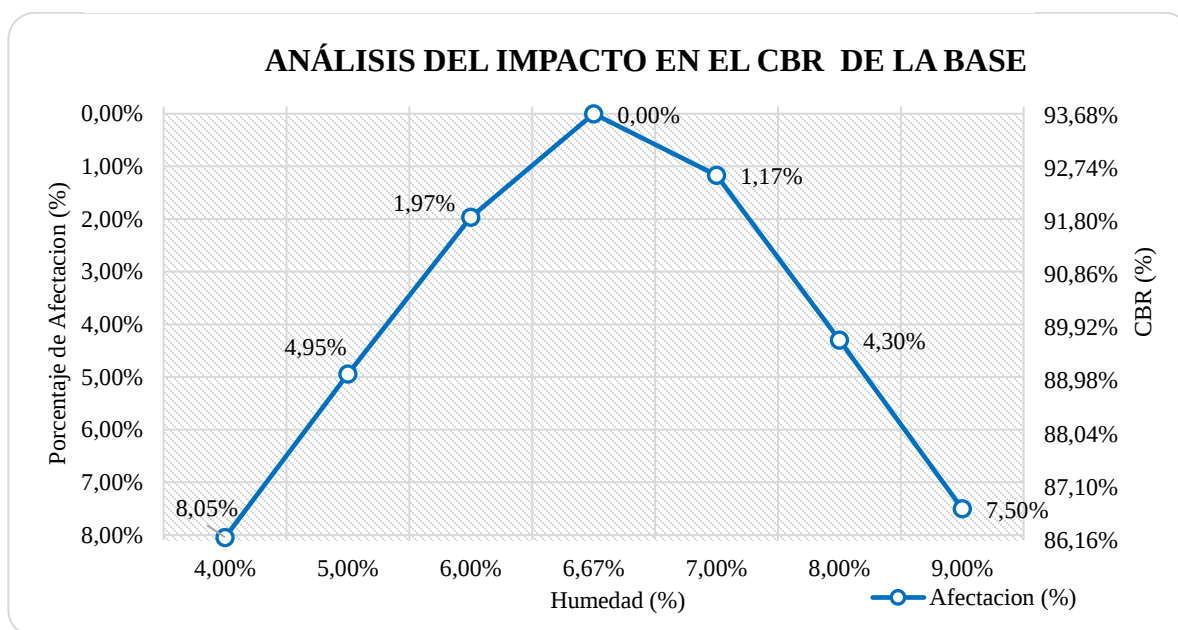
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 34. Análisis del impacto de la densidad en la capa base.

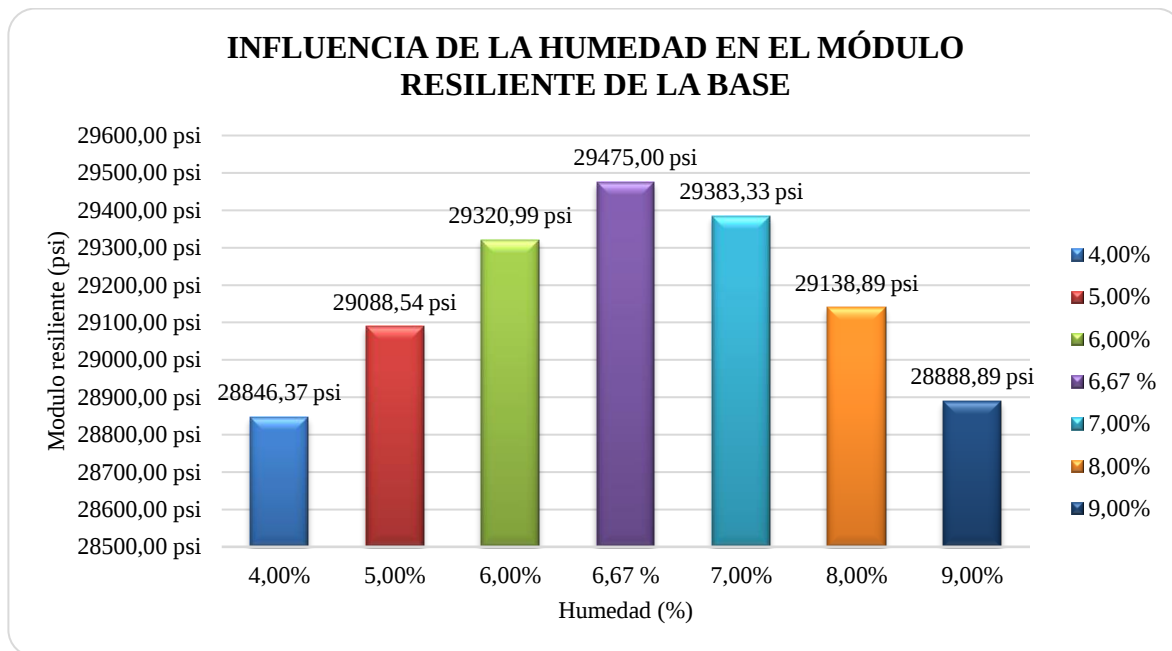
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 35. Influencia de la humedad en el valor de soporte de la capa base.

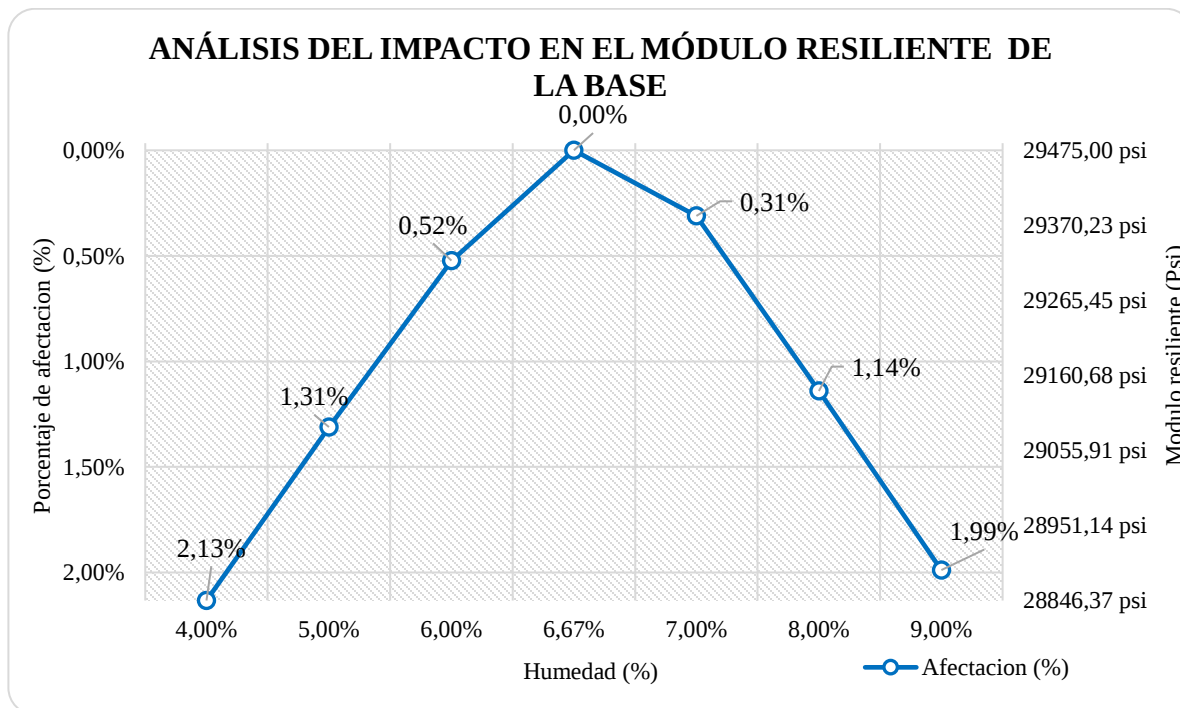
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 36. Análisis del impacto en el CBR de la base.

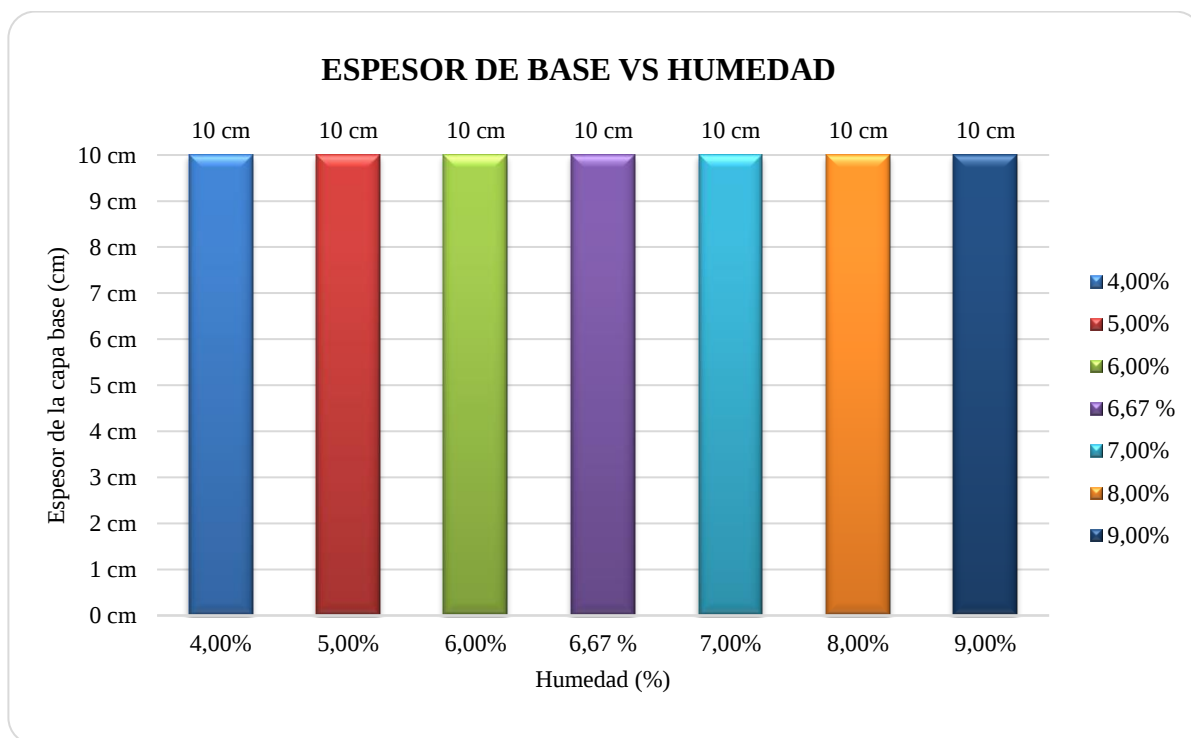
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 37. Influencia de la humedad en el módulo resiliente de la base.

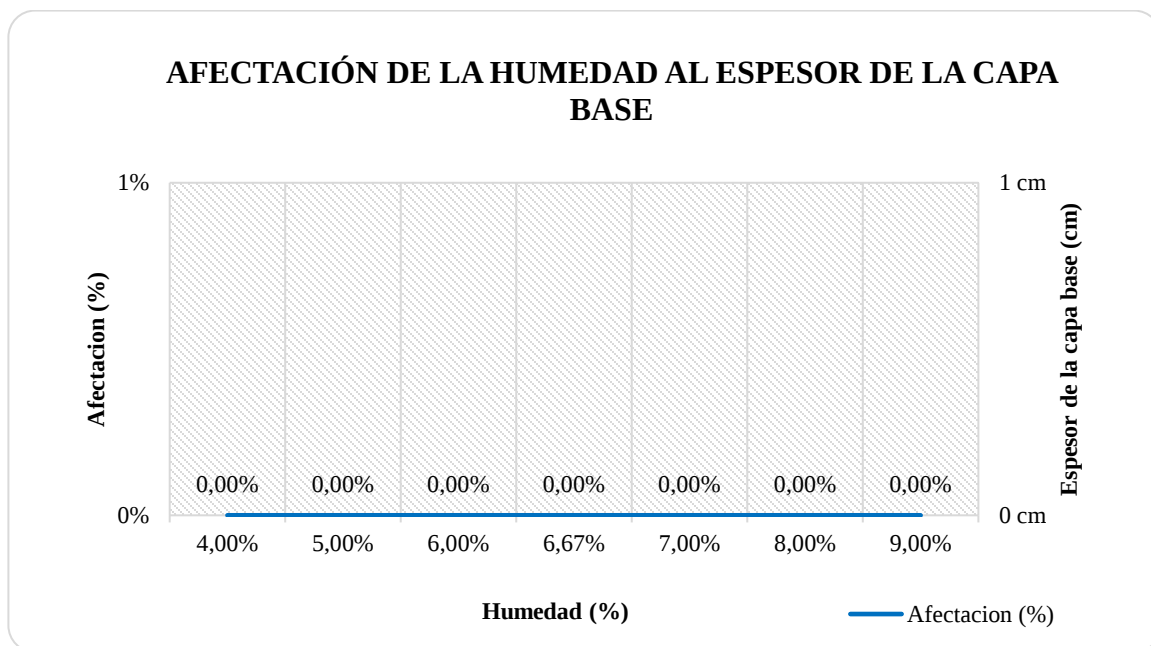
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 38. Análisis del impacto en el módulo resiliente de la base.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 39. Espesor de base vs humedad.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 40. Afectación de la humedad al espesor de la base.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 4,00 %

La humedad del 4 % es relativamente baja, lo cual es adecuado para un tipo de suelo A-1-a(0) (suelo granular con fragmentos de piedra, grava y arena). Un contenido de humedad adecuado es crucial para lograr la compactación óptima del suelo, lo cual influye directamente en su capacidad portante y en la densidad lograda durante la construcción.

La densidad seca de 2,19 gr/cm³ indica una buena compactación del material. En el diseño de pavimentos, una densidad adecuada es esencial para garantizar la estabilidad y durabilidad del pavimento. La densidad lograda debe compararse con la densidad máxima obtenida en ensayos Proctor para asegurar que se ha alcanzado una compactación satisfactoria.

El valor del CBR (California Bearing Ratio) de 86,16 % es alto, lo que indica una excelente capacidad portante del material de la base. Este parámetro es fundamental para determinar la resistencia del material bajo condiciones de carga. Un alto valor de CBR sugiere que el material puede soportar altas cargas sin deformarse significativamente, lo cual es ideal para pavimentos urbanos.

El módulo resiliente (Mr) de 28846,37 psi es un indicador de la rigidez del material de la base. Un alto valor de Mr es deseable ya que indica que el material puede soportar cargas repetidas sin sufrir deformaciones permanentes. Este parámetro es crucial para el diseño de pavimentos flexibles, ya que un mayor Mr contribuye a una mayor vida útil del pavimento.

El espesor de la capa base de 10 cm es estándar para muchas aplicaciones de pavimentos urbanos. Este espesor debe ser suficiente para proporcionar soporte adecuado y distribuir las cargas sobre la subbase y subrasante de manera efectiva.

4.3.1.1 Afectación por humedad

Una afectación del 3,09 % en la densidad debido a la humedad sugiere que cambios en el contenido de humedad del material no afectan significativamente su rendimiento. Este valor bajo es positivo, indicando que el material tiene buena estabilidad frente a la variación de humedad.

Una afectación del 8,05 % en el valor del CBR indica una ligera reducción en la capacidad portante bajo condiciones desfavorables. Este nivel de afectación es relativamente bajo y sugiere que el material mantiene una buena resistencia incluso bajo condiciones menos ideales.

Una afectación del 2,13 % en el módulo resiliente indica una mínima disminución en la rigidez del material. Esto es un indicador favorable, ya que sugiere que el material mantiene su capacidad de soportar cargas repetidas con muy poca degradación.

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal, mostrando que el material mantiene su espesor inicial, sin presentar deformaciones o pérdidas de material significativas.

4.3.2 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 5,00 %

El contenido de humedad del 5 % es razonablemente adecuado para este tipo de suelo granular. Un nivel de humedad bien controlado es crucial para lograr una compactación óptima y maximizar la capacidad portante del material.

Una densidad de 2,23 gr/cm³ indica una excelente compactación del material, sugiriendo que se han seguido correctamente las prácticas de construcción para lograr una densidad cercana a la máxima Proctor. Esto es esencial para la estabilidad y durabilidad de la base.

Un valor de CBR de 89,06 % es muy alto y muestra que el material tiene una excelente capacidad portante. Esto es crucial para el diseño de pavimentos urbanos que deben soportar cargas de tráfico pesadas y frecuentes.

El módulo resiliente (Mr) de 29088,54 psi indica una alta rigidez del material, lo cual es favorable para soportar cargas repetitivas sin deformaciones permanentes. Esto asegura una mayor vida útil del pavimento.

Un espesor de base de 10 cm es típico y adecuado para aplicaciones urbanas, proporcionando el soporte necesario para distribuir las cargas de manera efectiva sobre la subrasante.

4.3.2.1 Afectación por humedad

Una afectación del 1,24 % sugiere que el rendimiento del material es relativamente insensible a variaciones menores en el contenido de humedad, lo cual es positivo, ya que indica estabilidad del material bajo condiciones de humedad fluctuante.

Una afectación del 4,95 % en el CBR indica una leve disminución en la capacidad portante bajo condiciones menos ideales, pero este nivel de afectación es bajo y muestra que el material mantiene una buena resistencia incluso con pequeñas variaciones en condiciones de campo.

Una afectación del 1,31 % en el módulo resiliente es mínima, indicando que el material conserva su rigidez y capacidad para soportar cargas repetitivas sin significativas pérdidas

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal y muestra que el material mantiene su integridad dimensional, asegurando la estabilidad del pavimento.

4.3.3 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 6,00 %

Un contenido de humedad del 6 % es ligeramente más alto que en casos anteriores, pero sigue siendo adecuado para este tipo de suelo granular. La humedad es crucial para alcanzar la compactación óptima, lo que afecta directamente la densidad y la capacidad portante del material.

Una densidad de 2,26 gr/cm³ indica una compactación excelente del material. Este valor cercano a la máxima densidad seca sugiere que el material ha sido compactado adecuadamente, lo cual es fundamental para la estabilidad y durabilidad del pavimento.

Un valor de CBR del 91,85 % es muy alto, lo que indica una excelente capacidad portante del material. Esto es esencial para los pavimentos urbanos que deben soportar cargas pesadas y frecuentes, asegurando una base fuerte y estable.

El módulo resiliente (Mr) de 29320,99 psi sugiere una alta rigidez del material, lo cual es favorable para soportar cargas repetitivas sin sufrir deformaciones permanentes. Un Mr alto contribuye a una mayor vida útil del pavimento, proporcionando una base sólida.

Un espesor de 10 cm es típico y adecuado para aplicaciones urbanas. Este espesor permite una distribución efectiva de las cargas hacia la subrasante, asegurando una estructura de pavimento duradera.

4.3.3.1 Afectación por humedad

Una afectación del 0,22 % por variaciones en el contenido de humedad indica que el rendimiento del material es casi insensible a cambios menores en la humedad. Esto es muy positivo, mostrando una alta estabilidad del material bajo condiciones de humedad fluctuante.

Una afectación del 1,97 % en el CBR es mínima, lo que sugiere que la capacidad portante del material disminuye muy poco bajo condiciones desfavorables. Este bajo nivel de

Una afectación del 0,52 % en el módulo resiliente indica una reducción insignificante en la rigidez del material. Esto es altamente favorable, ya que el material mantiene su capacidad para soportar cargas repetitivas con mínima degradación.

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal y muestra que el material mantiene su integridad dimensional, asegurando la estabilidad del pavimento sin pérdidas de material significativas.

4.3.4 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 6,67 %

Un contenido de humedad del 6,67 % está en el rango aceptable para suelos granulares. Este nivel de humedad es crucial para lograr la compactación óptima del material, influenciando directamente su densidad y capacidad portante.

Una densidad de 2,262 gr/cm³ sugiere una excelente compactación del material. Este valor es densidad máxima Proctor indica que se ha alcanzado una compactación adecuada, fundamental para la estabilidad y durabilidad del pavimento.

Un valor de CBR de 93,70 % es extremadamente alto, lo que indica una excelente capacidad portante del material. Este parámetro es crucial para pavimentos urbanos que deben soportar cargas pesadas y frecuentes, asegurando una base fuerte y estable.

El módulo resiliente (Mr) de 29475,00 psi indica una alta rigidez del material. Un alto Mr es favorable para soportar cargas repetitivas sin sufrir deformaciones permanentes, contribuyendo a una mayor vida útil del pavimento.

Un espesor de 10 cm es estándar y adecuado para aplicaciones urbanas. Este espesor proporciona un soporte suficiente y distribuye las cargas efectivamente hacia la subrasante.

4.3.4.1 Afectación por humedad

Una afectación del 0,00 % por variaciones en el contenido de humedad indica que el rendimiento del material es completamente insensible a cambios menores en la humedad. Esto es extremadamente positivo, mostrando una alta estabilidad del material bajo condiciones de humedad fluctuante.

Una afectación del 0,00 % en el CBR sugiere que la capacidad portante del material no se ve afectada por variaciones en las condiciones. Este nivel de afectación nulo indica una resistencia y estabilidad excepcionales del material.

Una afectación del 0,00 % en el módulo resiliente indica que la rigidez del material se mantiene constante. Esto es altamente favorable, ya que el material conserva su capacidad para soportar cargas repetitivas sin degradación significativa.

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal, mostrando que el material mantiene su integridad dimensional y garantiza la estabilidad del pavimento sin pérdidas de material significativas.

4.3.5 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 7,00 %

Un contenido de humedad del 7 % es un poco más alto, pero sigue siendo manejable para suelos granulares. La humedad adecuada es esencial para alcanzar la máxima densidad y optimizar la capacidad portante del material. En este caso, la afectación por humedad es mínima, indicando estabilidad bajo condiciones húmedas.

Una densidad de 2,261 gr/cm³ refleja una excelente compactación del material. Este valor, cercano a la densidad máxima Proctor, sugiere que se ha alcanzado una compactación óptima, lo cual es fundamental para la estabilidad y durabilidad del pavimento.

Un valor de CBR del 92,60 % es extremadamente alto, indicando una excelente capacidad portante del material. Este parámetro es crucial para pavimentos urbanos que deben soportar cargas pesadas y frecuentes, garantizando una base fuerte y estable.

El módulo resiliente (M_r) de 29383,33 psi indica una alta rigidez del material. Un M_r alto es favorable para soportar cargas repetitivas sin deformaciones permanentes, contribuyendo a una mayor vida útil del pavimento.

Un espesor de 10 cm es típico y adecuado para aplicaciones urbanas. Este espesor proporciona suficiente soporte y distribuye las cargas efectivamente hacia la subrasante.

4.3.5.1 Afectación por humedad

Una afectación del 0,04 % por variaciones en el contenido de humedad indica que el rendimiento del material es casi insensible a cambios menores en la humedad. Esto es extremadamente positivo, mostrando una alta estabilidad del material bajo condiciones de humedad fluctuante.

Una afectación del 1,17 % en el CBR sugiere que la capacidad portante del material disminuye muy poco bajo condiciones menos ideales. Este bajo nivel de afectación indica una alta resistencia y estabilidad del material.

Una afectación del 0,31 % en el módulo resiliente indica una reducción mínima en la rigidez del material. Esto es altamente favorable, ya que el material mantiene su capacidad para soportar cargas repetitivas sin degradación significativa.

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal, mostrando que el material mantiene su integridad dimensional, asegurando la estabilidad del pavimento sin pérdidas de material significativas.

4.3.6 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 8,00 %

Un contenido de humedad del 8 % es relativamente alto para suelos granulares, pero dentro de un rango manejable. La humedad influye significativamente en la compactación y capacidad portante del material. En este caso, la afectación por humedad es del 0,75 %, lo cual es bajo, indicando que el material mantiene una estabilidad razonable bajo variaciones de humedad.

Densidad (gr/cm³): 2,25 gr/cm³

Una densidad de 2,245 gr/cm³ refleja una excelente compactación del material. Este valor, cercano a la densidad máxima Proctor, sugiere que se ha logrado una compactación adecuada, fundamental para la estabilidad y durabilidad del pavimento.

Un valor de CBR del 89,67 % es muy alto, indicando una excelente capacidad portante del material. Este parámetro es crucial para pavimentos urbanos que deben soportar cargas pesadas y frecuentes, garantizando una base fuerte y estable.

El módulo resiliente (Mr) de 29138,89 psi indica una alta rigidez del material. Un Mr alto es favorable para soportar cargas repetitivas sin deformaciones permanentes, contribuyendo a una mayor vida útil del pavimento.

Un espesor de 10 cm es típico y adecuado para aplicaciones urbanas. Este espesor proporciona suficiente soporte y distribuye las cargas efectivamente hacia la subrasante.

4.3.6.1 Afectación por humedad

Una afectación del 0,75 % por variaciones en el contenido de humedad indica que el rendimiento del material es ligeramente sensible a cambios menores en la humedad. Aunque es bajo, muestra que un aumento en la humedad puede tener un impacto leve en la capacidad portante del material.

Una afectación del 4,30 % en el CBR sugiere una disminución moderada en la capacidad portante del material bajo condiciones desfavorables. Este nivel de afectación es aceptable, pero indica la necesidad de un control adecuado de las condiciones de humedad durante la

Una afectación del 1,14 % en el módulo resiliente indica una reducción mínima en la rigidez del material. Esto es favorable, ya que el material mantiene una alta capacidad para soportar cargas repetitivas con poca degradación.

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal, mostrando que el material mantiene su integridad dimensional, asegurando la estabilidad del pavimento sin pérdidas de material significativas.

4.3.7 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 9,00 %

Un contenido de humedad del 9 % es relativamente alto para suelos granulares, lo que puede influir en la compactación y capacidad portante del material. En este caso, la afectación por humedad es del 2,34 %, lo cual indica una sensibilidad moderada a cambios en la humedad, sugiriendo que el material podría perder algo de su capacidad portante en condiciones muy húmedas.

Una densidad de 2,209 gr/cm³ refleja una buena compactación del material, aunque ligeramente inferior a los valores óptimos observados en densidades cercanas a 2,262 gr/cm³. Este valor indica que, aunque la compactación es adecuada, puede ser sensible a las variaciones en el contenido de humedad.

Un valor de CBR del 86,67 % sigue siendo alto, indicando una buena capacidad portante del material. Sin embargo, la afectación del 7,50 % sugiere que la capacidad portante disminuye notablemente con el aumento de la humedad, lo cual es un aspecto a considerar para el diseño y mantenimiento del pavimento.

El módulo resiliente (Mr) de 28888,89 psi indica una buena rigidez del material, aunque ligeramente inferior a los valores óptimos anteriores. La afectación del 1,99 %

sugiere que la rigidez del material disminuye en condiciones de alta humedad, pero no de manera crítica.

Un espesor de 10 cm es adecuado para aplicaciones urbanas. La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal, mostrando que el material mantiene su integridad dimensional, asegurando la estabilidad del pavimento sin pérdidas de material significativas.

4.3.7.1 Afectación por humedad

Una afectación del 2,34 % por variaciones en el contenido de humedad indica que el rendimiento del material es moderadamente sensible a cambios en la humedad. Esto sugiere la necesidad de un control adecuado de las condiciones de humedad durante la construcción y operación.

Una afectación del 7,50 % en el CBR sugiere una disminución significativa en la capacidad portante del material bajo condiciones desfavorables. Este nivel de afectación es notable y destaca la importancia de mantener la humedad bajo control para preservar la capacidad portante.

Una afectación del 1,99 % en el módulo resiliente indica una reducción moderada en la rigidez del material. Esto es aceptable, pero sugiere que el material mantiene una buena capacidad para soportar cargas repetitivas con poca degradación.

La ausencia de afectación en el espesor de la base (0,00 %) es ideal, mostrando que el material mantiene su integridad dimensional, asegurando la estabilidad del pavimento sin pérdidas de material significativas.

4.3.8 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 9,00 %

La densidad es ligeramente inferior a los valores anteriores, y una afectación del 1,91 % indica cierta variabilidad. Esto sugiere que el suelo no está tan bien compactado como en condiciones ideales, debido al alto contenido de humedad.

El CBR de 47,07 % es aceptable, aunque no tan alto como en otros casos. La afectación del 10,24 % es significativa y sugiere que la capacidad de soporte del suelo disminuye considerablemente debido a la humedad elevada.

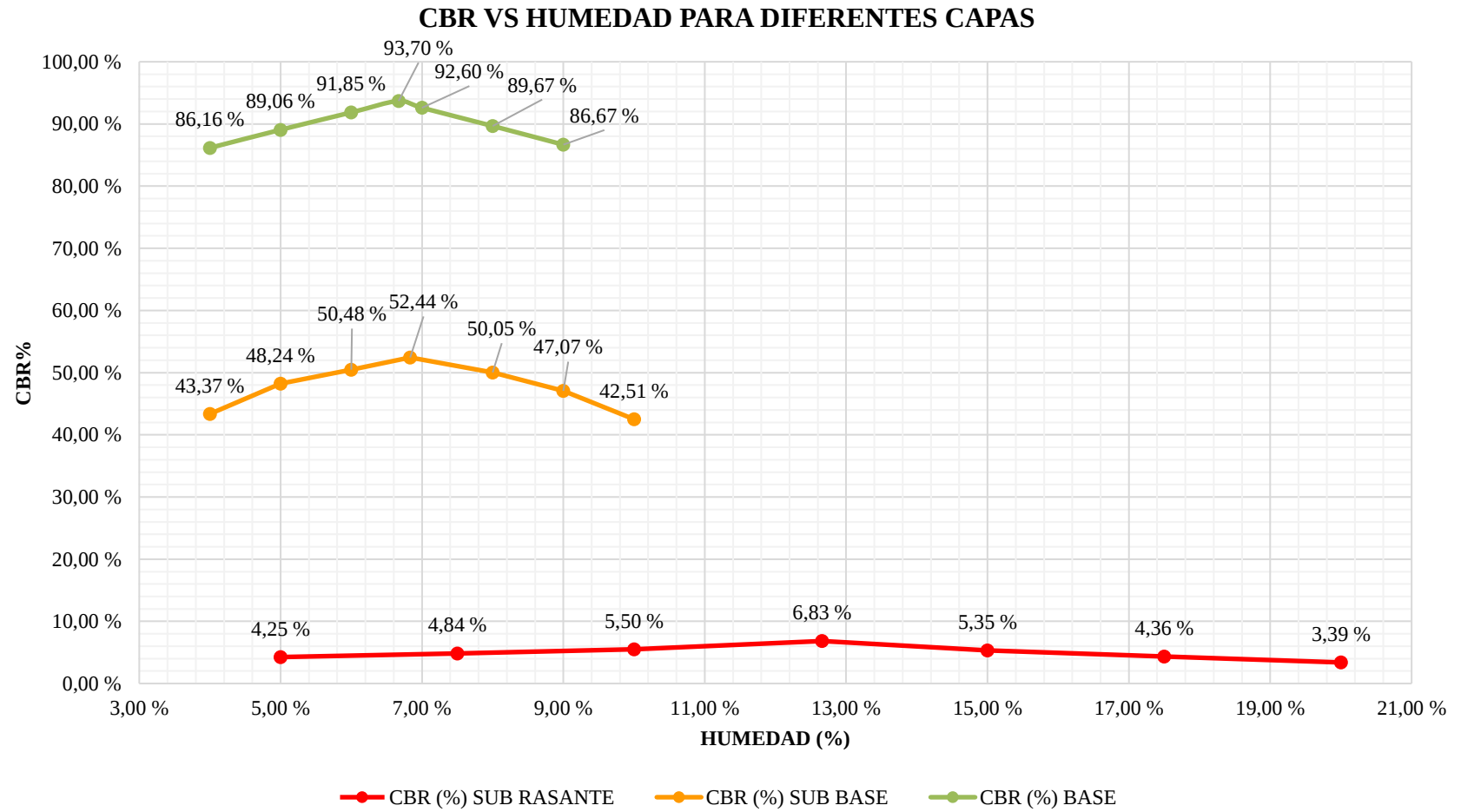
El módulo resiliente (M_r) es relativamente alto, indicando buena elasticidad del suelo. Sin embargo, la afectación del 2,17 % señala una ligera disminución en la elasticidad bajo ciertas condiciones, lo cual es influenciado por la humedad.

La densidad de 2,17 gr/cm³ y el CBR de 47,07 % son indicativos de una buena, aunque no óptima, capacidad de soporte del suelo. La afectación del 1,91 % en la densidad y del 10,24 % en el CBR sugiere que el suelo no está completamente estable y puede experimentar variaciones significativas en sus propiedades mecánicas bajo diferentes condiciones. Esto podría afectar la durabilidad y la funcionalidad del pavimento.

La profundidad de 27 cm es adecuada para la distribución de cargas y la estabilidad del pavimento. Sin embargo, la alta afectación del 83,33 % indica una variabilidad significativa en la calidad y compactación del material a diferentes profundidades. Esto se debe a un bajo CBR de la subrasante del 4,36 %, causado por un exceso de humedad. En 5000 gramos de suelo limoso arcilloso hay 875 ml de agua, lo que compromete la estabilidad de la sub base.

4.4 Comportamiento del CBR frente a la variación de humedad en capas de pavimento flexible

La gráfica que se presenta a continuación fue elaborada a partir de los resultados obtenidos en laboratorio, analizando la variación del CBR en función de diferentes contenidos de humedad para cada capa del pavimento. Para ello se procesaron los datos de la subrasante, subbase y base, identificando sus humedades óptimas y rangos críticos. De esta manera se visualiza de forma comparativa el efecto de la humedad sobre la capacidad portante de los materiales.

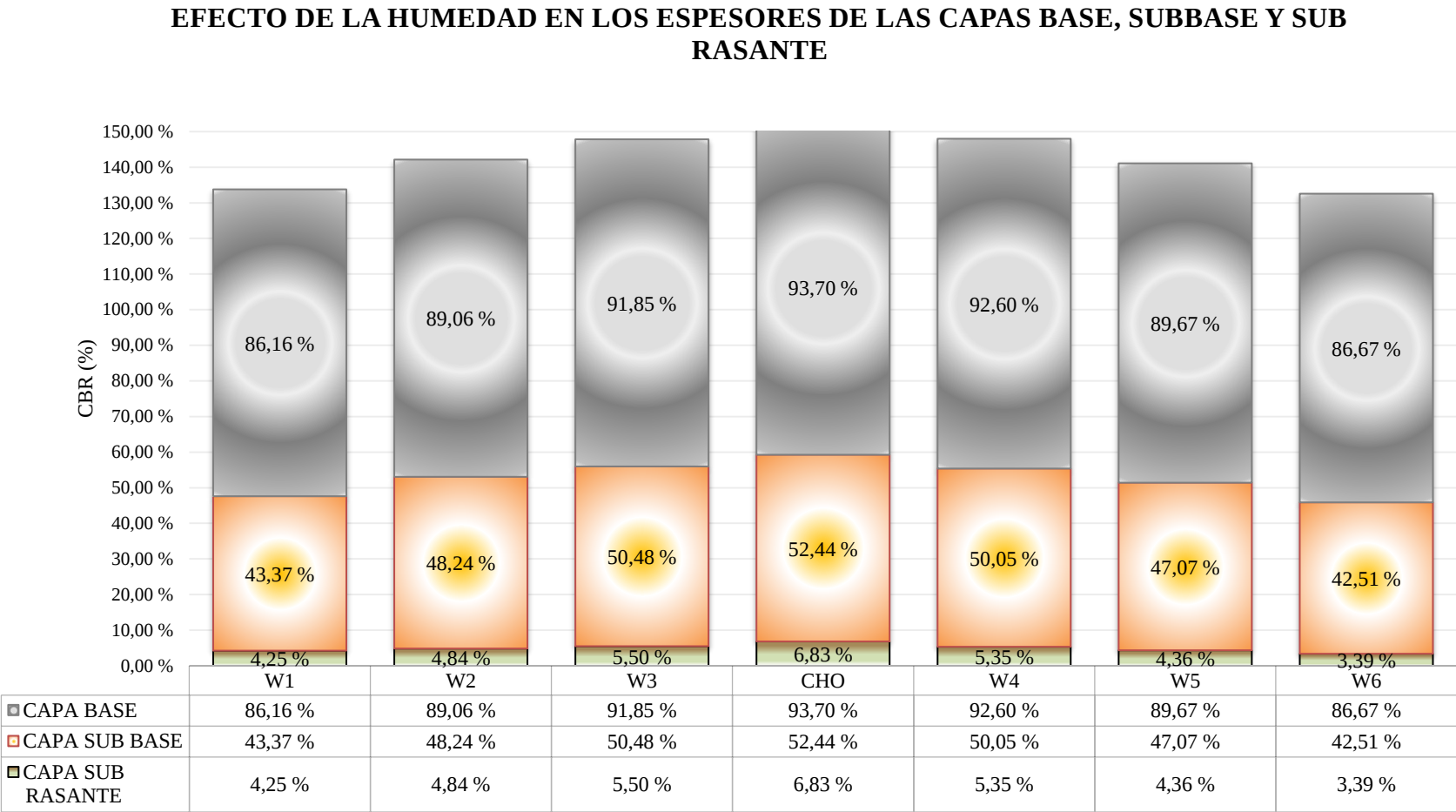
Gráfico 41. CBR vs humedad para diferentes capas

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica evidencia el comportamiento característico de las tres capas que conforman la estructura de un pavimento flexible —subrasante, subbase y base— frente a la variación del contenido de humedad. En todas ellas se observa una tendencia común: el CBR aumenta progresivamente conforme la humedad se aproxima a un valor óptimo, alcanzando un máximo en este punto, para luego descender a medida que la humedad continúa incrementándose. Este comportamiento responde a la interacción entre las partículas del suelo y el agua presente en los vacíos, que, en proporciones adecuadas, favorece la compactación y la resistencia, pero en exceso provoca la pérdida de estabilidad. Al comparar las tres capas, la base es la que registra los valores más altos de CBR, seguida de la subbase y finalmente la subrasante. Esta diferencia es coherente con la naturaleza de los materiales que componen cada estrato: los materiales de la base suelen ser granulares y de mayor calidad, diseñados para proporcionar una alta capacidad de soporte, mientras que la subrasante, al ser el terreno natural o ligeramente mejorado, presenta propiedades mecánicas más bajas y mayor sensibilidad a la variación de humedad.

El análisis también demuestra que el incremento de humedad por encima del nivel óptimo provoca una reducción significativa en la capacidad de soporte de los materiales. En la base, aunque se observa una disminución, esta es más moderada debido a la naturaleza granular del material. La subbase presenta una pérdida intermedia de resistencia, mientras que la subrasante es la más afectada, con reducciones muy marcadas en su capacidad portante. Esto confirma que, dentro de las tres capas, la subrasante constituye el punto crítico de la estructura, dado que su variabilidad frente a la humedad puede condicionar el desempeño del pavimento en conjunto. De esta manera, puede afirmarse que cada capa posee un rango de humedad óptimo en el cual se maximiza su resistencia y, por ende, se asegura un mejor comportamiento estructural. Sin embargo, cuando se supera dicho rango, el exceso de agua reduce los enlaces internos del suelo, incrementa la presión de poros y disminuye su capacidad de soportar cargas. Este fenómeno tiene especial relevancia en la subrasante, ya que su debilidad repercute directamente sobre la estabilidad general del pavimento, obligando a incrementar espesores de diseño o aplicar técnicas de mejoramiento para compensar la pérdida de soporte.

Gráfico 42. CBR vs humedad para diferentes capas



Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista constructivo, este análisis implica que el control del contenido de humedad durante la compactación de cada capa es un aspecto crítico en la ejecución de obras viales. Lograr que los materiales se encuentren próximos a su humedad óptima no solo garantiza alcanzar la máxima densidad y capacidad portante, sino que también evita la necesidad de sobredimensionar la estructura. Particular atención debe prestarse a la subrasante, pues su comportamiento condiciona la respuesta global del pavimento: una subrasante con exceso de humedad comprometerá la estabilidad del sistema y reducirá su vida útil, mientras que una base bien controlada permitirá mantener el diseño eficiente y duradero.

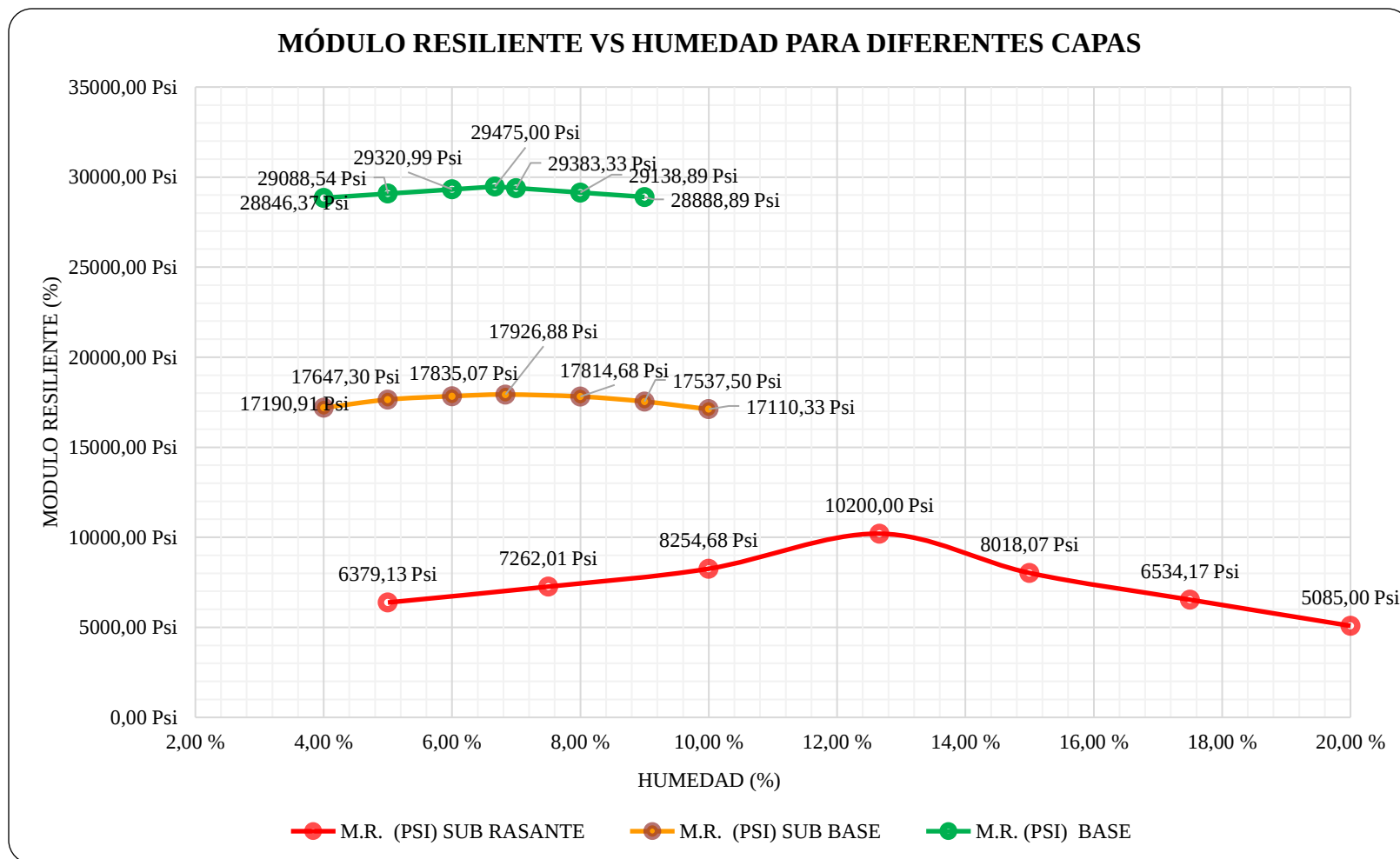
En conclusión, el estudio de la gráfica reafirma la importancia de considerar la variación de la humedad como un factor determinante en el diseño y construcción de pavimentos flexibles. Mantener a cada capa en su rango de humedad óptima maximiza su capacidad portante y asegura un mejor desempeño estructural, mientras que desviaciones hacia condiciones más secas o más húmedas generan pérdidas significativas de resistencia, siendo la subrasante la más vulnerable y la base la más tolerante. Por ello, la gestión y el control de la humedad en campo no solo es una recomendación técnica, sino una necesidad indispensable para garantizar la estabilidad, economía y durabilidad de las vías urbanas.

4.5 Efecto de la variación de la humedad sobre el módulo resiliente en diferentes capas de pavimento flexible

La siguiente gráfica fue elaborada a partir de los resultados de laboratorio obtenidos para las capas de base, subbase y subrasante del pavimento. En ella se representa la relación entre el contenido de humedad y el módulo resiliente (MR), parámetro que constituye un indicador fundamental de la rigidez de los materiales frente a cargas repetitivas. El MR es ampliamente utilizado en el diseño de pavimentos, ya que permite estimar la capacidad estructural y la durabilidad de las capas sometidas a esfuerzos continuos generados por el tránsito.

Al analizar los datos en función de la humedad, la gráfica permite identificar el rango en el cual cada capa alcanza su mejor desempeño mecánico, es decir, su humedad óptima.

Gráfico 43. Módulo Resiliente vs humedad para diferentes capas



Fuente: Elaboración propia.

La tendencia general muestra que el módulo resiliente de las tres capas. Base, subbase y subrasante se incrementa hasta alcanzar un máximo en su respectiva humedad óptima, y posteriormente disminuye conforme la humedad continúa aumentando. Este comportamiento refleja que, en condiciones controladas, la humedad favorece la compactación y cohesión de los materiales, pero cuando excede el rango ideal genera una pérdida de rigidez debido a la saturación de los vacíos y la reducción de fricción interna.

La capa base es la que evidencia mayor estabilidad: su MR se mantiene relativamente alto en un rango amplio de humedades, lo que demuestra que es la capa más tolerante a las variaciones. La subbase presenta un comportamiento intermedio: aunque conserva una rigidez aceptable, muestra una disminución progresiva cuando la humedad supera los valores óptimos. Finalmente, la subrasante es la más sensible; pequeños incrementos de humedad más allá de su condición óptima generan descensos significativos en su módulo resiliente, reduciendo drásticamente su capacidad para resistir cargas repetitivas.

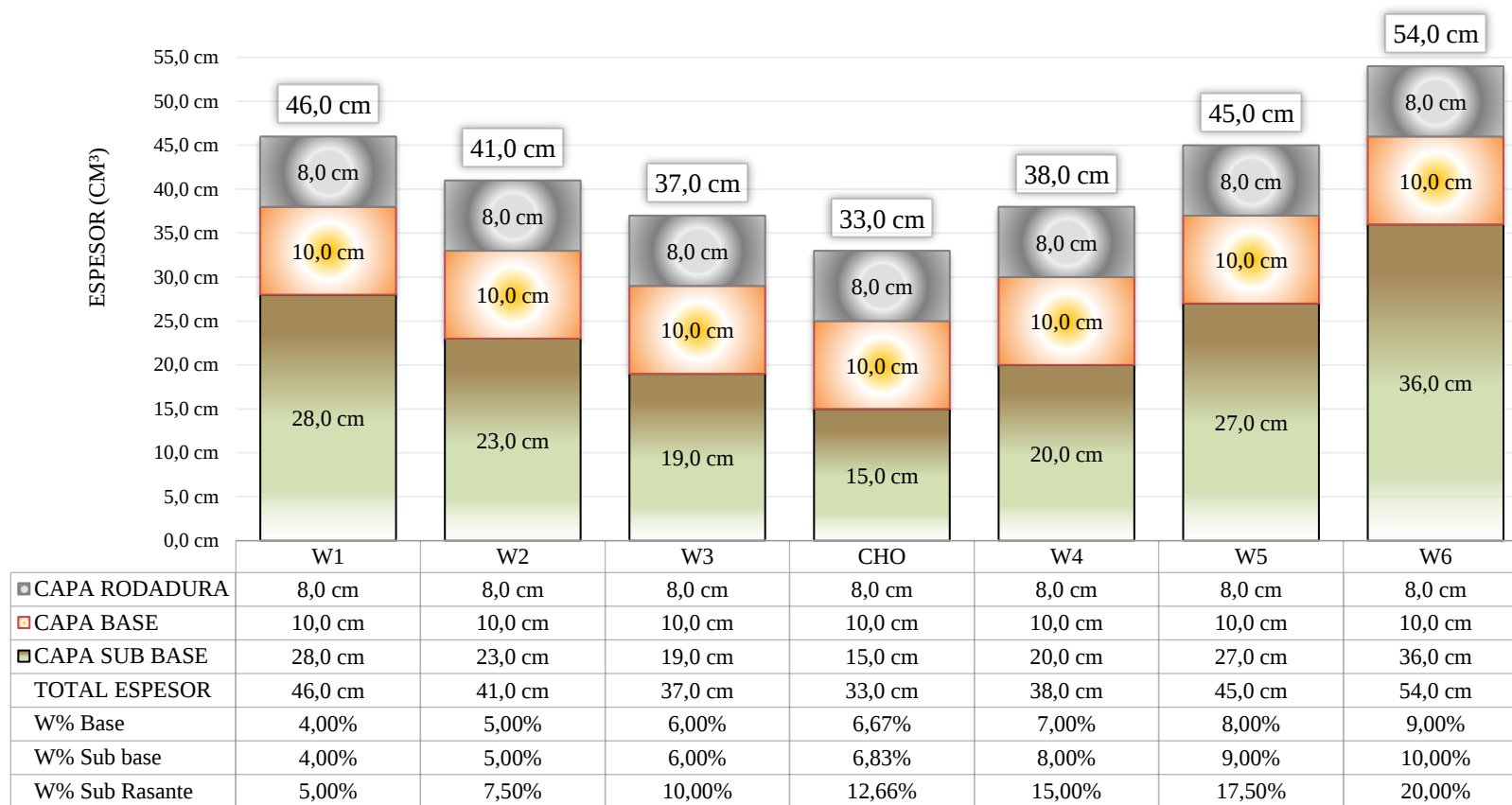
4.6 Efecto de la humedad en los espesores de las capas de rodadura, base y subbase

La gráfica fue construida a partir de los resultados reales obtenidos en laboratorio, en los cuales se evaluó la influencia de la variación del contenido de humedad sobre las propiedades mecánicas de la subrasante. Con base en dichos ensayos, se procedió al diseño estructural del pavimento, determinando los espesores requeridos de la capa de rodadura, base y subbase para cada condición de humedad. Posteriormente, estos valores fueron organizados y representados de manera gráfica con el propósito de mostrar, de forma clara y comparativa, cómo cambia la estructura del pavimento en función de la humedad.

Este procedimiento permite visualizar la tendencia general del comportamiento: a medida que la subrasante se acerca a su humedad óptima, los espesores de diseño tienden a reducirse, mientras que cuando la humedad se aleja de dicho valor, los espesores aumentan de forma significativa. De esta manera, la gráfica constituye una herramienta de apoyo para interpretar el impacto directo que tiene la variación de la humedad sobre el diseño y estabilidad de las diferentes capas del pavimento flexible.

Gráfico 44. Diseño de espesores de pavimento en función de humedades.

EFFECTO DE LA HUMEDAD EN LOS ESPESORES DE LAS CAPAS DE RODADURA, BASE Y SUBBASE



Fuente: Elaboración propia.

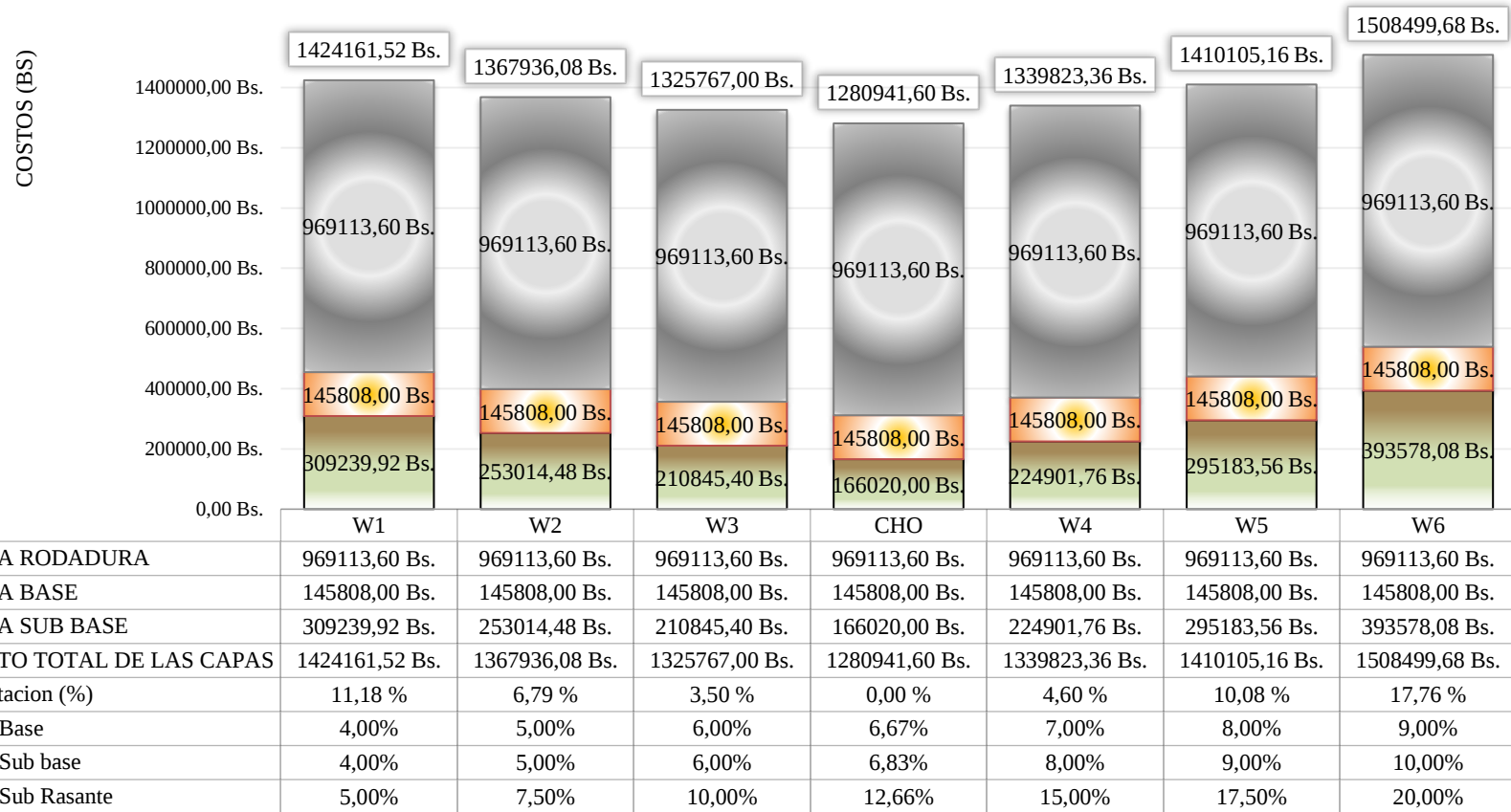
De manera general, se observa que el espesor total del pavimento disminuye cuando las capas trabajan cerca de su humedad óptima, alcanzando el valor mínimo en dicha condición. Sin embargo, a medida que la humedad se aleja del valor óptimo, especialmente en la subrasante, los espesores requeridos aumentan de forma considerable, llegando casi a duplicarse en condiciones de sobre humedad. Esto confirma que la humedad es un factor determinante en el diseño estructural y que su control adecuado permite optimizar los espesores y garantizar la estabilidad del pavimento. capacidad estructural.

4.7 Costo de materiales según espesores determinados por la variación de humedad

La siguiente gráfica evidencia que el costo total de materiales de la estructura del pavimento flexible está directamente condicionado por la variación de la humedad, principalmente en lo que respecta al espesor de la capa subbase. Tanto la capa de rodadura, con un costo constante de 969.113,60 Bs para un espesor de 8 cm, como la capa base, con 145.808,00 Bs para un espesor de 10 cm, no presentan variaciones significativas, por lo que su incidencia en el costo total es estable. En cambio, la subbase muestra un comportamiento altamente sensible: en la condición de humedad óptima (CHO, 6,83 %) se requiere un espesor de 15 cm, que representa un costo mínimo de 166.020,00 Bs, alcanzando un costo total de la estructura de 1.280.941,60 Bs. En contraste, con un contenido de humedad de 10,0 % (W6) la resistencia del suelo disminuye considerablemente, lo que obliga a incrementar el espesor de la subbase hasta 36 cm, elevando su costo a 393.578,08 Bs y generando el mayor costo total registrado de 1.508.499,68 Bs. La diferencia entre estos dos escenarios extremos supera los 227.000 Bs, lo que confirma que la humedad es un factor determinante en la economía del diseño. De esta manera, trabajar en torno a la humedad óptima no solo garantiza un mejor desempeño estructural de la subbase, sino que también representa una optimización económica relevante en la construcción de pavimentos flexibles.

Gráfico 45. Costo de materiales de las capas del pavimento flexible

COSTO DE MATERIALES SEGÚN ESPESORES DETERMINADOS POR LA VARIACIÓN DE HUMEDAD



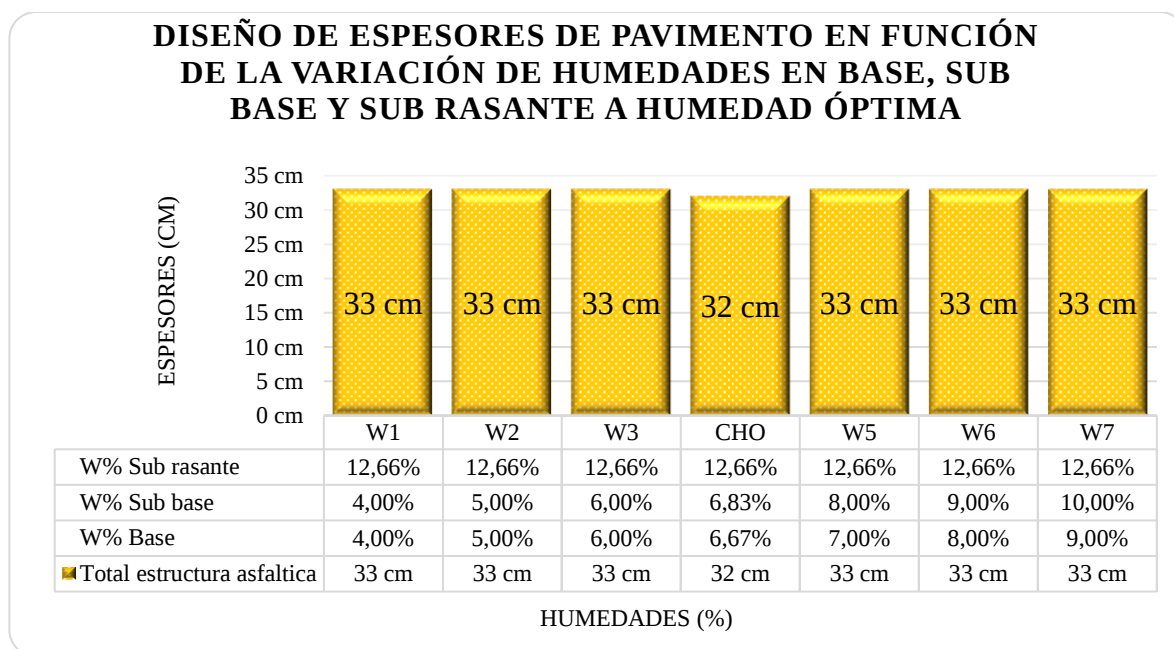
Fuente: Elaboración propia

4.8 Evaluación del efecto de la humedad en el espesor de pavimentos flexibles mediante escenarios de simulación (E1, E2 y E3).

Para el siguiente análisis, se realizaron diseños de pavimentos con diferentes contenidos de humedad en las capas de base, subbase y subrasante. Se compararon tres escenarios:

4.8.1 Escenario 1: Diseño con la subrasante a humedad óptima

Gráfico 46. Diseño de espesores de pavimento en función de la variación de humedad.



Fuente: Elaboración propia.

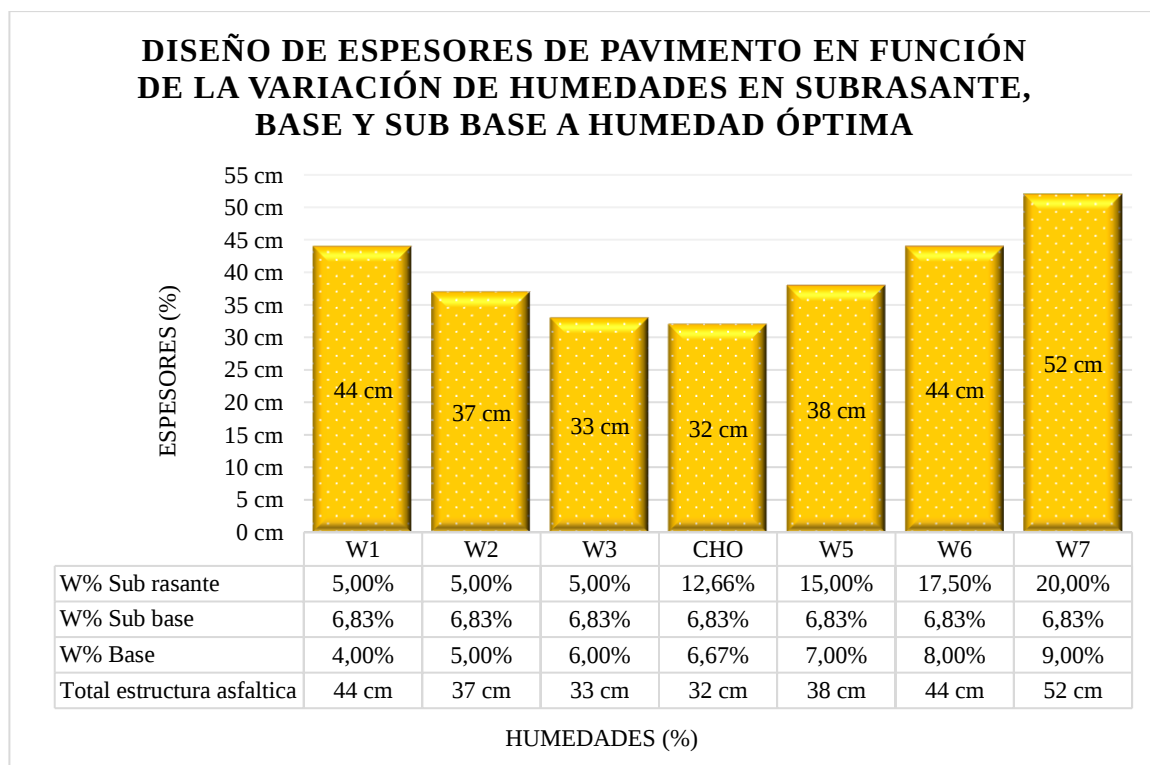
Mantener la subrasante a una humedad óptima del 12,66 % garantiza una densidad y compactación adecuadas del suelo, lo que a su vez se refleja en espesores uniformes de sub base, base y carpeta de rodadura. Este control preciso de la humedad en la capa más profunda del pavimento minimiza las fluctuaciones en la capacidad de carga del suelo y, por ende, en los requisitos de espesor de las capas superiores.

Además, cuando se logra esta estabilidad en la subrasante, la variabilidad en la humedad de la base y la subbase tiene un impacto mucho menor en la estructura general del pavimento. Esto significa que la estructura total del pavimento es considerablemente más consistente y predecible en comparación con escenarios donde la subrasante no está controlada.

Como resultado, la variación en el espesor total del pavimento es mínima, oscilando solo ligeramente entre 32 cm y 52 cm. Esta uniformidad en la estructura no solo mejora la resistencia y la durabilidad del pavimento, sino que también reduce la necesidad de mantenimiento preventivo y correctivo a largo plazo. El control de la humedad en la subrasante es fundamental para lograr un diseño de pavimento más eficiente y confiable.

4.8.2 Escenario 2: Diseño con la sub base a humedad óptima

Gráfico 47. Diseño de espesores de pavimento en función de la variación de humedad.



Fuente: Elaboración propia.

Mantener la sub base constante a humedad óptima (6,83 %) y la subrasante con humedades variables resulta en espesores alterados debido a la debilidad de la subrasante. Esta condición obliga a incrementar los espesores de la estructura del pavimento para compensar la disminución en la resistencia de la subrasante, lo que, a su vez, aumenta los espesores de la carpeta asfáltica específicamente la sub base.

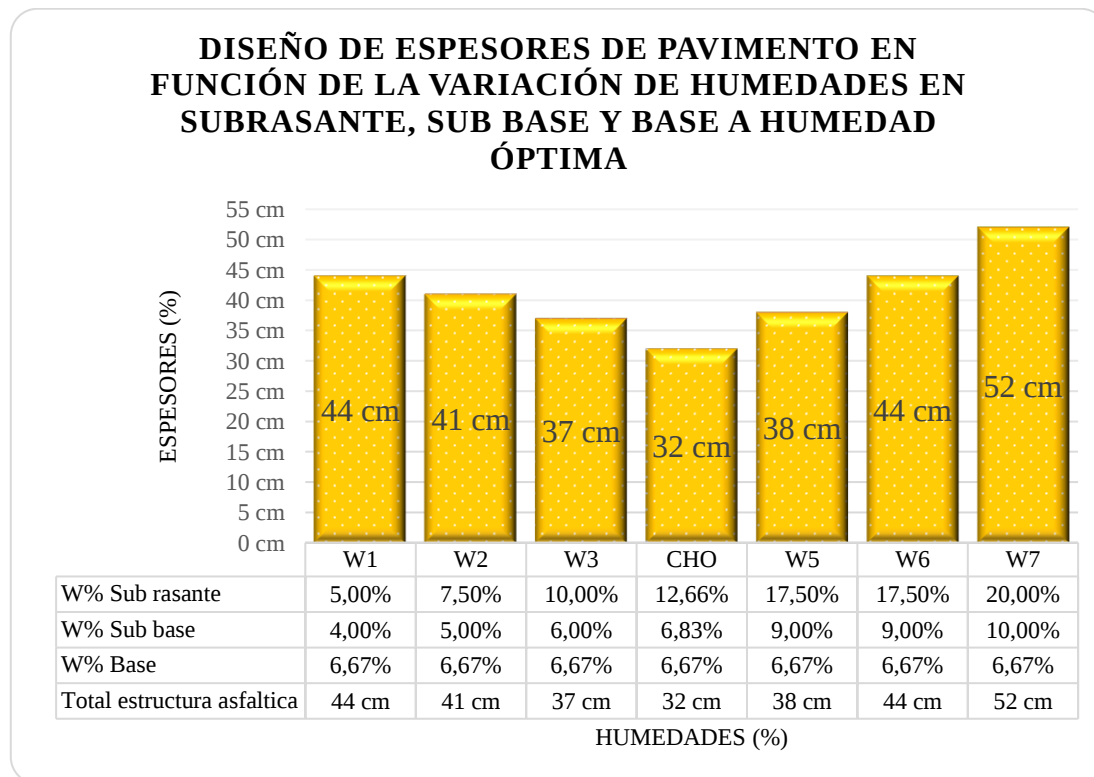
La estructura total del pavimento varía de 32 cm a 52 cm, mostrando la importancia de controlar la humedad en múltiples capas.

Sin embargo, los espesores de la base y la subrasante aún afectan significativamente la estructura total.

Los cambios en la humedad sub rasante siguen teniendo un impacto significativo.

4.8.3 Escenario 3: Diseño con la base a humedad óptima

Gráfico 48. Diseño de espesores de pavimento en función de la variación de humedad.



Fuente: Elaboración propia.

Mantener la base a humedad óptima garantiza que su espesor permanezca constante y no se vea significativamente afectado por las variaciones de humedad. Esto proporciona una base sólida y estable para las capas superiores del pavimento. Sin embargo, cuando la subrasante tiene humedades variables, la estructura del pavimento en su conjunto esta puede verse comprometida. La subrasante con humedades variables puede presentar debilidades estructurales que obligan a compensar mediante aumentos en los espesores de otras capas. Específicamente, se requiere un incremento en los espesores de la sub base para mantener la integridad estructural y la capacidad de carga del pavimento. Esta necesidad de compensación es crítica para prevenir deformaciones y fallos prematuros en el pavimento.

La estructura total del pavimento varía de 32 cm a 52 cm, indicando la influencia de la humedad en la subrasante y subbase.

Mantener la sub rasante a humedades óptimas reduce la variabilidad en los espesores necesarios.

De manera general, los tres escenarios evidencian que:

- La subrasante es la capa más determinante en el diseño estructural.
- La subbase y base aportan sensibilidad secundaria.
- Los espesores mínimos se presentan siempre en la humedad óptima.
- Desviaciones hacia mayores humedades generan un incremento significativo en los espesores requeridos.

Este análisis confirma que el control de la humedad en campo es un factor decisivo para la estabilidad y economía de los pavimentos flexibles.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los resultados experimentales demuestran de manera concluyente que la variación del contenido de humedad influye de forma directa y significativa en el valor soporte (CBR) de las capas de subrasante, subbase y base de un pavimento flexible. Esto confirma la validez del título, el cumplimiento de los objetivos planteados y la comprobación de la hipótesis de investigación.
- El análisis de laboratorio evidenció que el aumento de la humedad ocasiona una disminución progresiva de la capacidad de soporte de los materiales, siendo la subrasante la capa más vulnerable a este fenómeno debido a su composición y menor calidad estructural. Esta reducción compromete su función de sostén, incrementa los espesores requeridos y acelera el deterioro del pavimento.
- La subbase y la base, si bien presentan una mayor resistencia inicial por la naturaleza de sus materiales, también mostraron pérdidas de capacidad portante al superar los niveles de humedad óptimos. Aunque en menor proporción que la subrasante, los cambios observados en estas capas confirman que ninguna de ellas es inmune al efecto del agua, lo que repercute en la estabilidad global del pavimento.
- La investigación confirma que la interacción entre humedad y capacidad de soporte es un factor crítico en el diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles urbanos. Ignorar esta variable puede derivar en fallas prematuras, incremento de costos de mantenimiento y reducción de la vida útil de las vías.
- En síntesis, el estudio permitió comprobar que el control de la humedad debe ser considerado como un parámetro fundamental dentro del diseño estructural de pavimentos flexibles en vías urbanas, ya que constituye la principal condición que asegura la eficiencia y durabilidad de la infraestructura vial.

5.2 Recomendaciones

- Implementar programas sistemáticos de control de humedad en obra, mediante ensayos periódicos y verificaciones constantes del contenido de agua en la subrasante, subbase y base. De esta forma se garantizará que las capas trabajen en condiciones cercanas a su humedad óptima de compactación.
- Evitar la ejecución de trabajos de conformación, compactación y colocación de capas estructurales en épocas de alta pluviosidad, ya que la presencia de agua en exceso altera el comportamiento de los suelos y reduce drásticamente su capacidad de soporte.
- Incorporar en el diseño de proyectos viales urbanos factores de corrección que contemplen la variación de humedad, ajustando los espesores de las capas y considerando escenarios de saturación. Esto permitirá que los pavimentos estén mejor preparados para condiciones climáticas adversas.
- Fomentar la ejecución periódica de ensayos de laboratorio (CBR, límites de Atterberg, Proctor modificado, etc.) tanto en la fase de diseño como en las etapas de mantenimiento. Estos controles permitirán identificar a tiempo pérdidas de capacidad portante y planificar acciones correctivas.
- Promover la investigación y aplicación de técnicas de estabilización de suelos (con cal, cemento, emulsiones asfálticas, geotextiles o aditivos químicos) que reduzcan la susceptibilidad de las capas a la humedad, especialmente en zonas urbanas con suelos finos o expansivos.
- Diseñar e implementar sistemas de drenaje eficientes que incluyan cunetas, subdrenes, capas drenantes, pendientes transversales adecuadas y sellado de juntas. Estas medidas son esenciales para evitar la acumulación de agua en la estructura del pavimento, reduciendo la saturación de la subrasante, subbase y base, y prolongando la vida útil de la vía.

- Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen este estudio incorporando ensayos a escala real y análisis de tránsito vehicular combinado con condiciones de humedad, de modo que se generen criterios de diseño aún más representativos y aplicables a la realidad urbana de Tarija y otras regiones del país.