

## **Comparativo de pavimentos flexibles, articulados y rígidos, según el método AASHTO 1993, en Trinidad, Bolivia**

### **Comparison of flexible, articulated and rigid pavements, according to the AASHTO 1993 method, in Trinidad, Bolivia**

Saud YUJA GÓMEZ<sup>1\*</sup>, Andrea Alejandra VELARDE RODRÍGUEZ<sup>2</sup>, Diego JUSTINIANO MENDOZA<sup>2</sup>, Juan Carlos REVILLA BERMÚDEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Docente Universitario, Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”. Trinidad, Beni, Estado Plurinacional de Bolivia.

<sup>2</sup>Ingenieros Civiles, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”. Trinidad, Beni, Estado Plurinacional de Bolivia.

Autor para correspondencia\*: syujag@uabjb.edu.bo

#### **Resumen**

La infraestructura vial es clave para el desarrollo de las ciudades, y su diseño y construcción deben ser seleccionados con base en criterios técnicos y económicos que garanticen la durabilidad y eficiencia de las obras. En este contexto, el presente estudio se centra en Trinidad, Bolivia, y tiene como objetivo evaluar y comparar tres tipos de pavimentos (flexibles, articulados y rígidos) con el fin de seleccionar la opción más adecuada para mejorar la infraestructura vial de la ciudad, considerando tanto las condiciones de tráfico como los factores geotécnicos.

El análisis comparativo técnico de pavimentos flexibles, articulados y rígidos se realizó según la metodología AASHTO 1993, con el fin de determinar la opción más conveniente para la ciudad de Trinidad. El estudio se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo, basado en la recopilación de datos de tráfico y geotécnicos. Se instalaron 20 estaciones de conteo en siete distritos urbanos de la ciudad para calcular el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) y convertir estos datos en Ejes Equivalentes de Carga (ESALs). Además, se realizaron estudios de suelo mediante ensayos de laboratorio (granulometría, límites de consistencia y capacidad de soporte). Los diseños se desarrollaron para tres niveles de CBR (2%, 6%, 10%) y diferentes categorías de tráfico, liviano (T1), mediano (T2), pesado (T3). Los tres tipos de pavimentos fueron diseñados utilizando el método AASHTO 1993, adaptado a las características locales de la ciudad.

Los resultados indicaron que los pavimentos articulados son más sensibles en suelos con CBR bajo y tráfico pesado. Los pavimentos flexibles presentaron una mayor adaptabilidad a condiciones moderadas, mientras que los pavimentos rígidos mostraron mayor estabilidad, con espesores constantes, independientemente de las condiciones de suelo o tráfico.

Se concluyó que los pavimentos rígidos son mejores para suelos de baja capacidad y tráfico intenso, mientras que los flexibles son adecuados para suelos moderados y tráfico medio. Este estudio proporciona una herramienta valiosa para optimizar diseños de pavimentos en ciudades intermedias, contribuyendo a una planificación vial más eficiente y sostenible.

*Palabras clave:* Subrasante, pavimento flexible, pavimento articulado, pavimento rígido, relación de soporte de California, tráfico promedio diario anual, ejes equivalentes de carga.

### **Abstract**

Road infrastructure is crucial for urban development, and its design and construction must be selected based on technical and economic criteria that guarantee the durability and efficiency of the works. In this context, the present study focuses on Trinidad, Bolivia, and aims to evaluate and compare three types of pavements (flexible, jointed, and rigid) in order to select the most suitable option to improve the city's road infrastructure, considering both traffic conditions and geotechnical factors.

The main objective of this research was to conduct a technical comparative analysis of flexible, jointed, and rigid pavements according to the AASHTO 1993 methodology, in order to determine the most suitable option for the city of Trinidad. The study was carried out using a quantitative approach, based on the collection of traffic and geotechnical data. Twenty counting stations were installed in seven urban districts of the city to calculate the Annual Average Daily Traffic (AADT) and convert this data into Equivalent Single Axle Loads (ESALs). Additionally, soil studies were conducted through laboratory tests (grain size distribution, consistency limits, and bearing capacity). Designs were developed for three CBR levels (2%, 6%, 10%) and different traffic categories, light (T1), medium (T2), and heavy (T3). The three types of pavements were designed using the AASHTO 1993 method, adapted to the local characteristics of the city.

The results indicated that jointed pavements are more sensitive to soils with low CBR and heavy traffic. Flexible pavements showed greater adaptability to moderate conditions, while rigid pavements showed greater stability, with constant thicknesses, regardless of soil or traffic conditions.

It was concluded that rigid pavements are better for low-capacity soils and heavy traffic, while flexible pavements are suitable for moderate soils and medium traffic. This study provides a valuable tool for optimizing pavement designs in intermediate cities, contributing to more efficient and sustainable road planning.

*Keywords:* Subgrade, flexible pavement, articulated pavement, rigid pavement, California bearing ratio, annual average daily traffic, equivalent load axles.

## **Introducción**

La infraestructura vial es fundamental para el desarrollo económico y social, facilitando la movilidad de personas y bienes. No obstante, la construcción y el mantenimiento de carreteras son desafíos costosos y demandan soluciones duraderas por parte de los gobiernos locales. (Justiniano Mendoza, Revilla Bermúdez, & Velarde Rodríguez, 2022).

El diseño y construcción de pavimentos son claves para la durabilidad y rendimiento de las carreteras. Los pavimentos se clasifican en dos tipos principales: flexibles, hechos con capas de mezclas asfálticas, y rígidos, construidos con hormigón (Higueras Sandoval, 2010). La elección del tipo de pavimento y su diseño adecuado son esenciales para garantizar su longevidad y minimizar los costos de mantenimiento.

El diseño de pavimentos ha seguido enfoques tradicionales empíricos, siendo el método AASHTO 1993 (American Association of State Highway and Transportation Official, 1993), uno de los más utilizados para pavimentos flexibles y rígidos. En este marco, el presente estudio se enfoca en analizar técnicamente tres tipos de pavimentos: flexibles, articulados y rígidos. El objetivo es identificar la alternativa más adecuada para expandir la red vial en la ciudad de Trinidad, considerando las condiciones actuales de carga y tráfico, especialmente en un contexto de restricciones presupuestarias.

Numerosos estudios han explorado la eficacia del método AASHTO 1993 en el diseño de pavimentos. Huang, (2004) discutió las limitaciones de los enfoques puramente empíricos, sugiriendo que, aunque son útiles para condiciones específicas, pueden no ser adecuados para las demandas modernas de tráfico. El Asphalt Institute (2007) y Montejo Fonseca (2002) proporcionan guías detalladas sobre los materiales y la construcción de pavimentos asfálticos, destacando la importancia de la selección de materiales en el rendimiento del pavimento. Por otro lado, el Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH, 2013) y el estudio de Delatte (2008) sobre pavimentos de concreto remarcan las

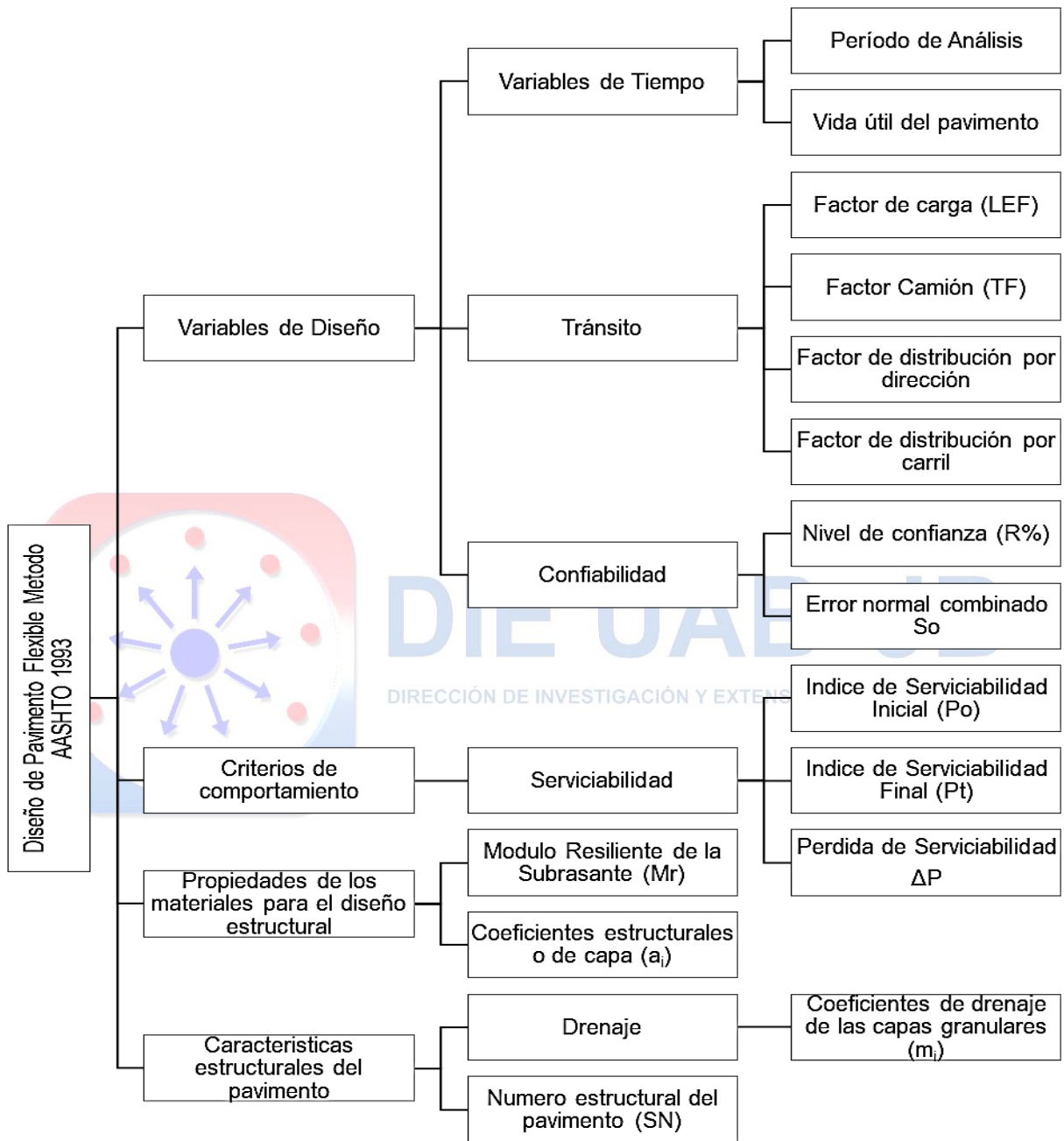
diferencias clave en el desempeño a largo plazo entre pavimentos rígidos y flexibles, señalando que la elección del material y el diseño son críticos para el éxito del pavimento.

Este estudio se centra en un análisis técnico de tres tipos de pavimentos: flexibles, articulados y rígidos, aplicando el método AASHTO 1993 para determinar la opción más adecuada para la ciudad de Trinidad. En primer lugar, se recopilaron datos sobre el tráfico vehicular mediante estaciones de conteo en siete distritos de la ciudad, lo que permitió calcular el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) y convertirlo en Ejes Equivalentes de Carga (ESALs). Además, se realizaron estudios geotécnicos para determinar las propiedades del suelo, como la granulometría, los límites de consistencia y la capacidad de soporte. Con estos datos, se diseñaron los tres tipos de pavimentos, evaluando sus costos iniciales y de mantenimiento. Finalmente, se realizó un análisis comparativo de los tres tipos de pavimentos.

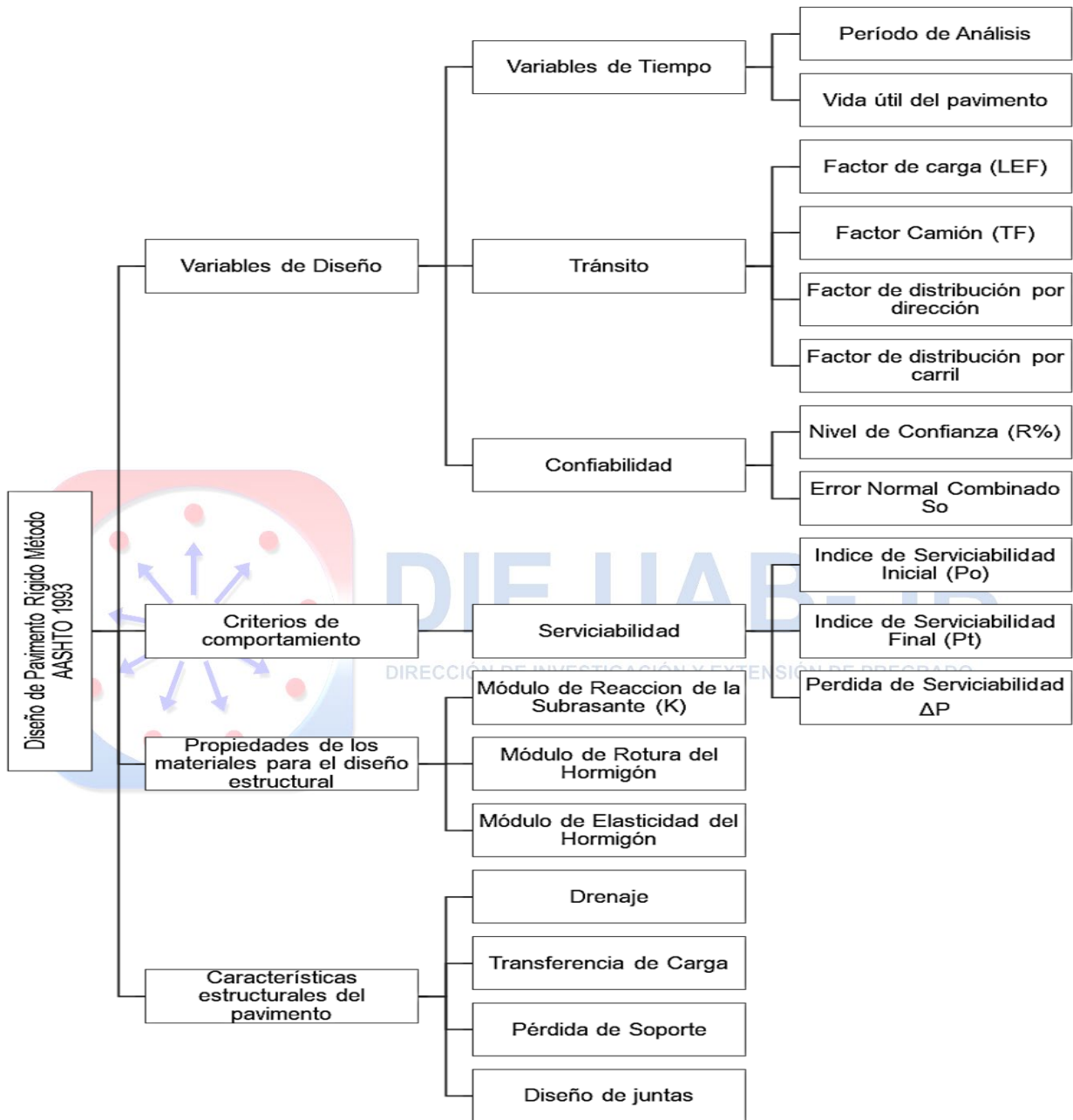
### **Materiales y métodos**

Esta investigación se basa en un enfoque cuantitativo, analítico y comparativo para evaluar el desempeño de tres tipos de pavimentos, flexibles, rígidos y articulados, mediante el método AASHTO 1993 (American Association of State Highway and Transportation Official, 1993), en las condiciones específicas de la ciudad de Trinidad, proyectado a 20 años. Este método de diseño considera diferentes parámetros necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura de los pavimentos flexibles, articulados y rígidos (Figuras 1–2).

La metodología del estudio se desarrolló en varias etapas clave, comenzando con la recolección de datos críticos sobre las condiciones de tráfico, incluyendo tipo de vehículos, peso, distribución de ejes y volumen diario, así como información geotécnica del suelo y las condiciones climáticas de Trinidad. Posteriormente, se convirtieron las cargas vehiculares en Ejes Equivalentes de Carga Estándar (ESAL) utilizando factores de equivalencia basados en un eje estándar de 18 kips (80kN). Con esta información, se estimó el número total de ESAL que el pavimento deberá soportar durante su vida útil. Finalmente, se seleccionaron los materiales y espesores de las capas del pavimento para garantizar que resistieran el tráfico proyectado y cumplieran con los requisitos de servicio.



**Figura 1.** Variables para el diseño de pavimentos flexibles y articulados según el método AASHTO (1993).



**Figura 2.** Variables para el diseño de pavimentos rígido según el método AASHTO (1993).

*Estudio del tránsito vehicular*

El método AASHTO simplifica el diseño de pavimentos al convertir el tráfico mixto en un equivalente de cargas de 18 kips, conocido como ESAL, que mide el daño causado por un eje estándar al

pavimento. Para calcularlo, se consideran las cargas por eje, la configuración de los ejes y su frecuencia. En este estudio, la fase inicial incluyó un conteo vehicular en siete de los ocho distritos urbanos de la ciudad, con 20 estaciones ubicadas en vías de alto flujo durante siete días consecutivos (Figura 3). En cada estación, se registraron datos durante un promedio de 14 horas diarias, abarcando tanto tráfico diurno como nocturno, diferenciando el tráfico según la clasificación vehicular establecida en la metodología de evaluación de proyectos viales de la Administradora Boliviana de Carreteras ((ABC), 2011), que agrupa los vehículos en 13 categorías, desde automóviles y camionetas hasta camiones y maquinaria pesada.



**Figura 3.** Distribución espacial de las 20 estaciones de conteo vehicular en Trinidad.

El tráfico promedio diario anual (TPDA) se determinó a partir del promedio del tráfico diario registrado y se ajustó para reflejar el volumen anual, según la fórmula:

$$TPDA = \frac{\sum_{i=1}^n Vi}{n}$$

donde  $V_i$  es el número de vehículos contados en el día  $i$ , y  $n$  es el número total de días de conteo. El TPDA se convirtió en unidades equivalentes de ejes simples de 18 kip (ESALs) utilizando la

metodología de AASHTO (1993), permitiendo estimar el daño acumulado en el pavimento debido al tráfico vehicular.

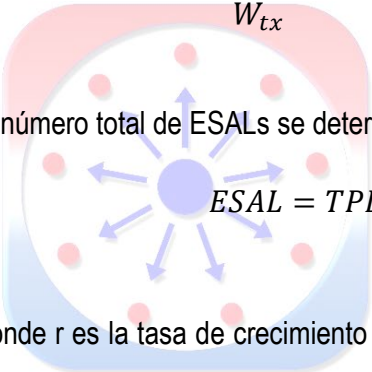
La proyección del tráfico se expresa en términos de ESALs esperados para el periodo de diseño, teniendo en cuenta factores como el crecimiento anual, la distribución direccional del tráfico (DD), el porcentaje en el carril de diseño (DL) y el Factor de Equivalencia de Carga (LEF). El tráfico acumulado en el carril de diseño se calcula mediante la ecuación:

$$W_{18} = D_D * D_L * w_{18}$$

Donde  $w_{18}$  son las unidades ESAL acumuladas para una sección de la carretera. Los LEF cuantifican el daño causado por las cargas vehiculares en comparación con un eje de referencia de 18 kip.

$$LEF = \frac{\text{N}^\circ \text{ de ESALs de 80 KN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{N}^\circ \text{ de ejes de X kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$
$$= \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

El número total de ESALs se determina usando la siguiente fórmula:


$$ESAL = TPD \times D_D \times D_L \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{Ln(1+r)} \times FC$$

Donde  $r$  es la tasa de crecimiento del tráfico,  $n$  es el periodo de diseño y  $FC$  es el factor de camión, que es el cociente de los ESALs entre el número de camiones. Estos cálculos permiten evaluar el daño proyectado y optimizar el diseño estructural del pavimento.

#### Estudios de suelos

Se llevaron a cabo dos estudios geotécnicos, para cuatro distritos (segundo, cuarto y octavo), dos por cada uno de ellos, para obtener muestras de suelo de la subrasante, las cuales fueron sometidas a ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades físico-mecánicas (granulometría, límites de consistencia (Atterberg), compactación (Proctor modificado) y capacidad de soporte (California Bearing Ratio)).

Sin embargo, para la evaluación de pavimentos en Trinidad consideró tres niveles de CBR al 2%, 6%, y 10% que permitió realizar un análisis más exhaustivo y representativo de las variaciones en la calidad del suelo y su impacto en el diseño de pavimentos.

En el diseño de pavimentos, dos aspectos fundamentales son el Módulo de Resiliencia ( $M_r$ ) y el Módulo de Reacción de la Subrasante ( $k$ ). El  $M_r$ , utilizado en el método AASHTO, mide la energía de deformación por unidad de volumen que un material puede soportar antes de alcanzar su límite elástico. Dado que no todos los países cuentan con equipos de laboratorio para medirlo, se utilizan correlaciones, como la propuesta por AASHTO:  $M_r = 1,500 \times \text{CBR}$  (en psi y CBR en % para suelos finos con  $\text{CBR} \leq 10\%$ ). Por otro lado, el Módulo de Reacción de la Subrasante ( $k$ ), o "Coeficiente de Balasto", mide el soporte que las capas inferiores proporcionan a la losa de hormigón en pavimentos rígidos. Aunque su medición directa es costosa y compleja, se pueden emplear correlaciones, como la sugerida por AASHTO:  $k \text{ (psi/in)} = M_r \text{ (psi)} / 19.4$ , dado que los pavimentos rígidos son poco sensibles al valor exacto de "k".

#### *Diseño de Pavimentos*

En el marco de este estudio comparativo, se diseñaron tres tipos de pavimentos: flexible, rígido y articulado, utilizando el método AASHTO 93. Este enfoque permite considerar variables clave como el módulo resiliente de la subrasante, el período de diseño, el nivel de confiabilidad y el número proyectado de ESALs (Ejes Simples Equivalentes de 18 kip). A continuación, se describe de forma resumida el diseño de cada tipo de pavimento

#### *Pavimentos Flexibles*

El diseño de pavimentos flexibles, basado en el método AASHTO 1993, se centra en calcular el espesor adecuado de las capas del pavimento para soportar las cargas proyectadas durante su vida útil. Las variables clave incluyen:

- Carga de Tráfico ( $W_{18}$ ): Número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kip (8,2 t) a lo largo de la vida útil del pavimento.
- Índice de Serviciabilidad (PSI): Calidad del pavimento al inicio ( $p_i$ ) y al final de su vida útil ( $p_t$ ). La pérdida de serviciabilidad ( $\Delta\text{PSI}$ ) se calcula como la diferencia entre estos valores.
- Módulo Resiliente (MR): Indica la capacidad del suelo para resistir deformaciones bajo carga.
- Número Estructural (SN): Determina la capacidad del pavimento para soportar las cargas de tráfico.
- Confiabilidad (R) y Desviación Estándar ( $S_o$ ): Factores que reflejan la incertidumbre en la predicción del comportamiento del pavimento.

El diseño de pavimentos flexibles se lleva a cabo utilizando la ecuación AASHTO-93, que incluye todas estas variables para calcular el número estructural (SN) y determinar los espesores de las capas. Estos espesores se ajustan para cumplir con los requisitos de confiabilidad y durabilidad, asegurando un desempeño adecuado durante el período de diseño. La ecuación básica de diseño de pavimentos flexibles propuesta por AASHTO 93, es la siguiente:

$$\log(W_{18}) = Z_R S_0 + 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log(M_R) - 8,07$$

### *Pavimentos Rígidos*

El diseño de pavimentos rígidos también sigue el método AASHTO 1993, centrado en determinar el espesor de las losas de concreto que soportarán las cargas de tráfico proyectadas. Las variables fundamentales son:

- Carga de Tráfico (W18): Al igual que en los pavimentos flexibles, representa el número total de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kip.
- Índice de Serviciabilidad ( $\Delta PSI$ ): Pérdida de calidad del pavimento a lo largo de su vida útil.
- Módulo de Rotura ( $S_c$ ): Resistencia del concreto a la flexión.
- Módulo de Elasticidad ( $E_c$ ): Rigidez del concreto.
- Módulo de Reacción ( $k$ ): Capacidad del sistema de soporte (subbase y subrasante) para resistir las deformaciones.
- Factor de Transferencia de Carga ( $J$ ): Eficiencia con que las cargas se transfieren entre las losas de concreto.

El diseño incluye la ecuación AASHTO-93 para pavimentos rígidos, que permite calcular el espesor de la losa de concreto, ajustando los parámetros de confiabilidad, el diseño de juntas y la transferencia de carga para asegurar un rendimiento óptimo. La ecuación empírica de AASHTO, se muestra a continuación.

$$\log W_{18} = Z_r S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.625 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32 P_t) \log \left[ \frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left( D^{0.75} - 18.42 \left( \frac{K}{E_c} \right)^{0.25} \right)} \right]$$

### *Pavimentos Articulados*

Los pavimentos articulados están formados por adoquines o losetas de concreto colocadas sobre una capa de arena y una base granular. Este tipo de pavimento es adecuado para áreas con tráfico ligero o moderado, como zonas peatonales o calles secundarias. Aunque AASHTO no ofrece una metodología específica para este tipo de pavimento, se pueden aplicar los principios de diseño de pavimentos flexibles para el dimensionamiento de la base y subbase.

En general, el método AASHTO 1993 permite ajustar los diseños de pavimento considerando la interacción de diversas variables para garantizar su durabilidad y rendimiento durante el periodo de diseño, optimizando los espesores y materiales según el tipo de pavimento y las condiciones del tráfico proyectado.

### **Resultados**

#### *Datos de tráfico vehicular*

Los resultados del conteo vehicular realizado en las 20 estaciones distribuidas en siete, de los ocho distritos de la zona urbana de la ciudad de Trinidad revelan que el 86.18% del parque vehicular está compuesto por motocicletas, seguido por autos, jeeps y vagonetas con un 7.64%, y camionetas ligeras con un 2.82%. El transporte colectivo y los vehículos de carga tienen una representación mínima, con camiones y buses ocupando menos del 1.0% cada uno. Esto sugiere que la movilidad en esta área está predominantemente marcada por vehículos ligeros, con un uso reducido de transporte público y carga pesada (Tabla 1).

Tipo de Vehículo	Total	%
Motocicletas	252.710	86.18%
Autos, Jeep y Vagonetas	22.392	7.64%
Camionetas (hasta 2 ton)	8.266	2.82%
Minibuses (hasta 15 pasajeros)	86.0	0.03%
Microbuses (hasta 21 pasajeros; de 2 ejes)	38.0	0.01%
Buses Medianos (hasta 35 pasajeros; de 2 ejes)	36.0	0.01%
Buses Grandes (más de 35 pasajeros; de 3 ejes)	50.0	0.02%
Camiones Medianos (de 2,5 a 10,0 t; de 2 ejes)	1.713	0.58%
Camiones Grandes (más de 10 t; de 2 ejes)	969.0	0.33%
Camiones Grandes (más de 10 t; de 3 ejes)	512.0	0.17%
Camiones Semirremolque	127.0	0.04%
Camiones Remolque	86.0	0.03%
Otros vehículos (no motocicletas)	6.242	2.13%
<b>TOTAL</b>	<b>293.227</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 1.** Distribución porcentual por tipo de vehículos en Trinidad (Justiniano Mendoza, Revilla Bermúdez, & Velarde Rodríguez, 2022).

*Conversión a Ejes Equivalentes de Carga (ESALs)*

A partir de los datos de tráfico, se calcularon los Ejes Equivalentes de Carga (ESALs) para cada tipo de vehículo y de pavimentos, utilizando los Factores de Equivalencia de Carga por Eje (LEF). Se aplicó un índice de serviciabilidad final Pt de 2 para ambos tipos de pavimentos, un numero estructural SN de 2.5 para pavimentos flexibles y una altura de losa rígida de 8 pulgadas como datos de partida.

Los resultados señalan que los ejes equivalentes, ESAL, totales proyectados a 20 años, varían desde 400 mil ejes equivalentes a casi 10 millones para la vía más transitada (Tabla 2).

Estación	Flexible/Articulado	Rígido
<b>E1</b>	6.162.426	7.851.654
<b>E2</b>	6.491.422	9.532.805
<b>E3</b>	3.385.752	4.306.732

Estación	Flexible/Articulado	Rígido
E4	2.350.781	3.130.401
E5	2.411.393	2.974.287
E6	2.508.057	3.941.448
E7	1.879.553	2.436.217
E8	1.219.274	1.519.815
E9	409.699	549.735
E10	1.574.537	1.622.929
E11	4.802.018	6.167.411
E12	1.216.232	1.575.832
E13	3.015.336	3.796.805
E14	1.224.105	1.767.252
E15	5.915.110	7.083.497
E16	4.528.508	5.913.966
E17	1.644.981	2.276.216
E18	852.742	964.990
E19	1.068.269	1.482.267
E20	3.591.312	5.396.126

**Tabla 2.** Ejes equivalentes (EE), por Estación de Aforo. Proyección a 20 año. Elaboración propia según (American Association of State Highway and Transportation Official, 1993), con base a datos de (Justiniano Mendoza, Revilla Bermúdez, & Velarde Rodríguez, 2022).

#### *Estudio de suelos*

Las pruebas de laboratorio realizadas en las muestras de suelo recolectadas mostraron que la subrasante en la mayoría de las vías analizadas está compuesta predominantemente de suelos arcillosos con un índice de plasticidad promedio de 19.0%. Los valores promedio de CBR obtenidos fueron de 2.0%, lo cual refleja una baja capacidad de soporte de la subrasante. La granulometría de las muestras reveló que el 40.0% del material pasa a través del tamiz No. 200, indicando una estructura de suelo de grano fino, lo cual influye directamente en el diseño del pavimento.

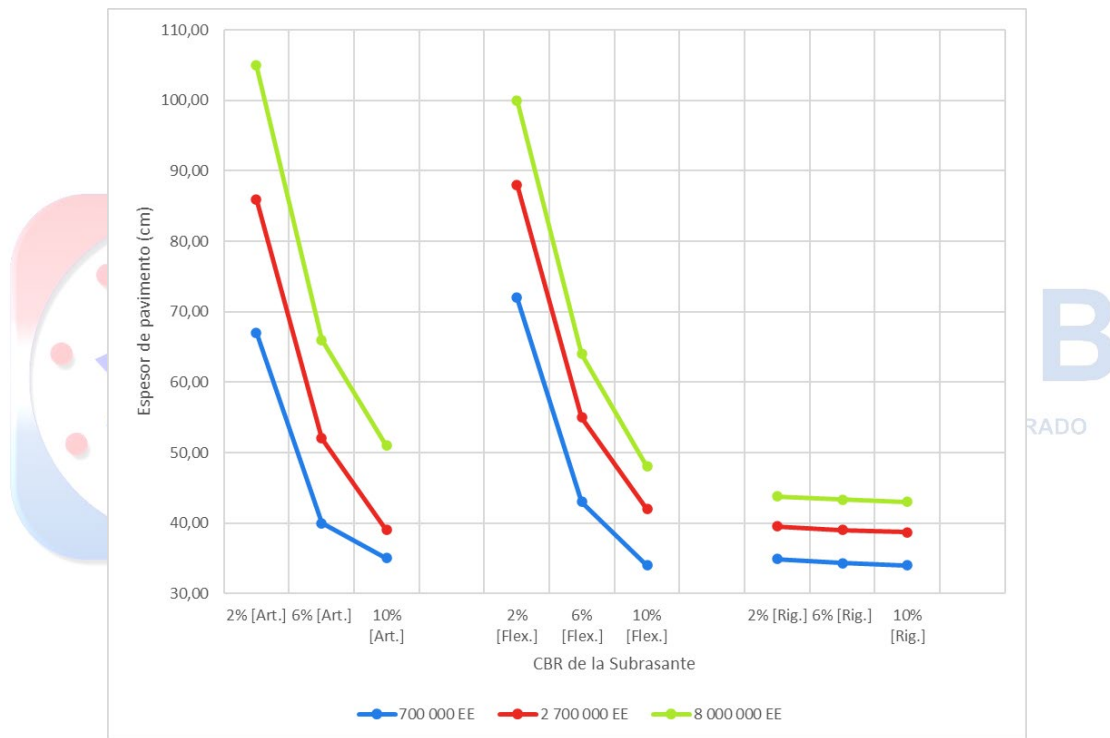
### Diseño de pavimentos

Se diseñaron los pavimentos considerando los siguientes escenarios principales:

Tres tipos de suelo de base: Se evaluaron subrasantes con valores de CBR de 2.0%, 6.0% y 10.0%, lo que representa una variación en la capacidad de soporte del suelo.

Tres niveles de tráfico: Se establecieron tres categorías de tráfico, T1, T2 y T3, con 700 000, 2 700 000 y 8 000 000 de ejes equivalentes, lo que refleja diferentes intensidades de uso.

Finalmente, utilizando la metodología AASHTO se diseñaron tres tipos de pavimentos, cuyos resultados se sintetizan en la Figura 4.



**Figura 4.** Espesores de pavimentos en función al tipo de tránsito vehicular y CBR de la subrasante. Elaboración propia con base a datos de (Justiniano Mendoza, Revilla Bermúdez, & Velarde Rodríguez, 2022).

### Discusiones

Este estudio ofrece un análisis integral del diseño de pavimentos flexibles, rígidos y articulados para la capital beniana, basado en estudios empíricos de tráfico y suelos. Los resultados proporcionan una base sólida para la toma de decisiones sobre la selección y diseño de pavimentos en regiones con condiciones similares.

### *Análisis del Tráfico Vehicular y ESALs Proyectados*

El Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) mostró un predominio de motocicletas, pero el diseño de pavimentos se determinó principalmente por la fracción de vehículos pesados, ya que estos generan mayor daño al pavimento. Aunque las motocicletas son el vehículo más común, las estrategias de diseño deben centrarse en mitigar el desgaste provocado por el tráfico pesado. Esto puede lograrse mediante el refuerzo de zonas con mayor carga vehicular, rutas exclusivas para vehículos pesados o monitoreo constante de las condiciones del pavimento.

A nivel social y ambiental, la alta presencia de motocicletas responde a factores como accesibilidad, costos y preferencias locales, mientras que el tráfico pesado es clave para la industria y transporte de mercancías. El diseño vial debe equilibrar estas dinámicas, garantizando la durabilidad sin comprometer la movilidad urbana.

### *Estudios de suelos*

Los estudios revelaron una subrasante compuesta principalmente por suelos arcillosos con alto índice de plasticidad, lo que predispone a grietas y deformaciones. El CBR promedio del 2.0% indica una baja capacidad de soporte, subrayando la necesidad de fortalecer las capas de base y sub-base. La estabilización de suelos o la inclusión de capas estructurales más resistentes es fundamental para evitar un deterioro prematuro, particularmente en pavimentos flexibles, que dependen más del soporte de la sub-base.

### *Evaluación de los diseños de pavimentos*

Los pavimentos articulados son altamente sensibles al CBR y al tráfico, con espesores de hasta 105.0 cm en suelos de CBR bajo (2.0%) y alto tráfico, que disminuyen significativamente con un mejor CBR (6.0–10.0%). Esto resalta la importancia de una subrasante de calidad para reducir costos de construcción. En contraste, los pavimentos flexibles, aunque también dependen del CBR, muestran una menor variabilidad. Sus espesores oscilan de 72.0 cm con un CBR de 2.0% a 34.0 cm con un CBR de 10.0% en tráfico bajo, con menos reducción en la sub-base en comparación con los articulados. Los pavimentos rígidos son los menos sensibles al CBR, con espesores casi constantes, lo que los hace ideales para suelos de baja calidad y tráfico pesado. Este estudio sugiere que, aunque los pavimentos articulados y flexibles requieren ajustes según las condiciones del suelo y tráfico, los pavimentos rígidos ofrecen un diseño más estable.

### *Implicaciones prácticas*

Este estudio proporciona una guía útil para seleccionar el tipo de pavimento según el tráfico y las condiciones del suelo. Los pavimentos articulados y flexibles necesitan mayores ajustes según el CBR y la intensidad del tráfico, mientras que los pavimentos rígidos ofrecen un diseño más estable y menos dependiente de la calidad de la subrasante. En proyectos con tráfico pesado constante y suelos de baja calidad, el pavimento rígido es una opción preferible. Sin embargo, los pavimentos flexibles pueden ser más adecuados en suelos con CBR medio o alto y tráfico moderado, pero siempre debe realizarse un análisis detallado de las condiciones locales.

### *Limitaciones*

Este estudio presenta sus limitaciones. Se centró en un rango limitado de CBR y en el método AASHTO 1993, lo que restringe la aplicación de los resultados a otras regiones y condiciones de tráfico. Además, la falta de un análisis económico completo impide evaluar la viabilidad de cada opción. Se recomienda ampliar el rango de CBR, integrar métodos de diseño más recientes como el MEPDG, y realizar análisis de costo-beneficio a largo plazo. También sería útil realizar estudios en diferentes climas y monitorear el desempeño de los pavimentos a lo largo del tiempo para obtener soluciones más sostenibles y eficientes.

### **Agradecimientos**

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas e instituciones. Agradecemos sinceramente a las principales autoridades de la Universidad Autónoma del Beni "José Ballivián", en las personas del Rector, Vicerrector, Decano de la Facultad de Ingeniería, director, docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, sede Trinidad, por proporcionar las instalaciones y los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. A los colegas del laboratorio de materiales de construcción, quienes contribuyeron con su tiempo y esfuerzo en la realización de los ensayos y la recopilación de datos.

### **Referencias bibliográficas**

- (ABC), A. B. (2011). Manual de Metodología de Evaluación de Proyectos Viales. La Paz: ABC.
- American Association of State Highway and Transportation Official. (1993). AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO.

- Asphalt Institute. (2007). MS 22: Principles of Construction of Hot - Mix Asphalt Pavements. Lexington: Asphalt Institute.
- Bowles, J. (1981). Manual de laboratorio de suelos. México: McGRAW-HILL.
- Delatte, N. (2008). Concrete pavement design, construction and performance. New York: Taylor&Francis.
- Higuera Sandoval, C. (2010). Nociones sobre metodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Tunja, Boyaca - Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Higuera Sandoval, C. H. (2010). Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos de carreteras. Tunja-Boyacá - Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Uptc.
- HORMIGÓN, I. B. (06 de Octubre de 2024). ibch.com. Obtenido de [https://www.ibch.com/wp-content/uploads/2022/01/Dossier\\_Pavimentos\\_Rigidos.pdf](https://www.ibch.com/wp-content/uploads/2022/01/Dossier_Pavimentos_Rigidos.pdf)
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- IBCH, I. B. (2013). DIPAV V2.0 Manual del usuario. La Paz: IBCH.
- Justiniano Mendoza, D., Revilla Bermúdez, J. C., & Velarde Rodríguez, A. A. (2022). Tesis de Grado Análisis comparativo técnico - económico de pavimentos para ampliar la cobertura vial de la ciudad de Trinidad, Beni. Trinidad: Universidad Autónoma del Beni José Ballivián.
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2006). Materials for Civil and Construction Engineers (2nd ed.). Pearson Education.
- Montejo Fonseca, A. (2002). Ingeniería de pavimentos. Bogotá: Agora Editores.
- Yoder, E., & Witczak, M. (1975). Principles of Pavement Design (2nd ed.). Danvers. MA: Wiley.